



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA DO AMAZONAS**  
**CAMPUS MANAUS DISTRITO INDUSTRIAL**  
**CURSO ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**



**WARLEY MATHEUS SANTOS NOGUEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE E FIRMWARE PARA GERENCIAMENTO  
DE ENERGIA ELÉTRICA.**

**MANAUS - AM**

**2024**

**WARLEY MATHEUS SANTOS NOGUEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE E FIRMWARE PARA GERENCIAMENTO  
DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Amazonas, *Campus* Manaus  
Distrito-Industrial, Curso de Bacharelado em  
Engenharia de Controle e Automação para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
de Controle e Automação.

T

Orientador: Prof. Me. Marlos Rodrigues

**MANAUS - AM**

**2024**

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

N778d Nogueira, Warley Matheus Santos.  
Desenvolvimento de Hardware e Firmware para gerenciamento de energia elétrica / Warley Matheus Santos Nogueira. — Manaus, 2024. 46f.: il. color.

Monografia (Graduação) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus* Manaus Distrito Industrial, Curso de Engenharia de Controle e Automação, 2024.

Orientador: Prof.º Marlos André Silva Rodrigues, Me.

1. Internet das coisas. 2. IoT. 3. LoRa. 4. Energia Elétrica. I. Rodrigues, Marlos André Silva. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Título.

CDD 629.89

Elaborada por Oziane Romualdo de Souza (CRB11/ nº 734)

**WARLEY MATHEUS SANTOS NOGUEIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE HARDWARE E FIRMWARE PARA GERENCIAMENTO  
DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Amazonas, *Campus* Manaus  
Distrito-Industrial, Curso de Bacharelado em  
Engenharia de Controle e Automação para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Me. Marlos Rodrigues

Aprovado em 15 de Março de 2024

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Me. Marlos Rodrigues

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM)

Prof. Dr. Alyson de Jesus dos Santos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM)

Prof. José Fabio de Lima Nascimento

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a aqueles que fizeram parte de todo meu processo de graduação. Cada pessoa fez parte e forneceu o suporte necessário para a finalização da minha graduação.

Agradeço aos meus pais, Tatiana e Wander, que sempre se esforçaram para me proporcionar condições de estudar, sempre me motivaram e acreditaram que eu poderia alcançar meus objetivos. Agradeço os seus conselhos e as suas cobranças que me trouxeram a esse momento.

Agradeço a minha namorada, Annamel, por todo apoio nos momentos em que mais precisei de forças e por sempre me motivar a ir mais adiante acreditando nos grandes resultados que eu poderia alcançar.

Agradeço ao Polo de Inovação Manaus juntamente ao Prof. Me. Marlos Rodrigues, por todo apoio técnico e crescimento profissional proporcionado, acredito que todo esse conhecimento me tornou um bom profissional.

Agradeço a Deus, por sempre me guiar e colocar em meu caminho as pessoas certas para o meu sucesso. Obrigado por me fornecer condições de chegar até esse momento.

"Todas as vitórias ocultam uma abdicação" - BEAUVOIR, Simone

## RESUMO

A indústria global, em meio às preocupações ambientais, busca reduzir sua pegada de carbono através de estratégias sustentáveis, com ênfase na eficiência energética. Esta que não apenas diminuem o consumo de eletricidade, crucial devido à indústria ser uma grande consumidora de energia, mas também mitigam as mudanças climáticas e elevam a competitividade ao reduzir custos e aumentar a produtividade. A eficiência energética, uma solução abrangente, encontra destaque nas tecnologias emergentes, como a utilização de sistema sem fio como o sistema *LoRa* (*Long Range*). Aplicada no Gerenciamento de Consumo de Energia Elétrica baseado em Internet das coisas (*Internet of Thing* ou *IoT*), a *LoRa* eficientemente monitora e controla o consumo em larga escala, destacando-se por transmitir dados em longas distâncias com baixo consumo de energia, vital em ambientes industriais extensos. Entretanto, a implantação da *LoRa* enfrenta desafios, como a integração de sistemas legados, garantia da segurança dos dados e otimização da rede para máximo desempenho com mínimo consumo energético. Baseado nestas premissas, este trabalho tem o objetivo de desenvolvimento de hardware e firmware para gerenciamento de energia em uma indústria de Manaus, possibilitando uma gestão eficiente em ambientes industriais, permitindo medidas corretivas para redução do consumo e otimização do uso da energia elétrica.

**Palavras-chave:** Internet das Coisas, LoRa, Gerenciamento de Consumo de Energia Elétrica, Indústria.

## ABSTRACT

Amidst environmental concerns, the global industry aims to reduce its carbon footprint through sustainable strategies, focusing on energy efficiency. These strategies not only decrease electricity consumption, which is crucial due to the industry's being a major energy consumer but also mitigate climate change and enhance competitiveness by reducing costs and increasing productivity. Energy efficiency, a comprehensive solution, gains prominence in emerging technologies, such as using wireless systems like LoRa (Long Range). Implemented in Electricity Consumption Management based on the Internet of Things (IoT), LoRa efficiently monitors and controls consumption on a large scale. It stands out for transmitting data over long distances with low energy consumption, which is crucial in extensive industrial environments. However, deploying LoRa faces challenges like integrating legacy systems, ensuring data security, and optimizing the network for maximum performance with minimal energy consumption. Based on these premises, this project aims to develop hardware and firmware for energy management in an industry in Manaus, enabling efficient management in industrial settings, allowing corrective measures for consumption reduction, and optimizing the use of electrical energy.

**Keywords:** Internet of Things, LoRa, Electricity Consumption Management, Industry.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>FIGURA 1</b> - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA POR SETOR (EM %). .....	13
<b>FIGURA 2</b> - MODELO DO LAYOUT DO PROJETO.....	19
<b>FIGURA 3</b> - IMAGENS DO ESQUEMA DE LIGAÇÃO ELÉTRICA (A), LAYOUT (B) E ESQUEMA ELÉTRICO (C) DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO. ....	30
<b>FIGURA 4</b> - GATEWAY DRAGINO. ....	31
<b>FIGURA 5</b> - RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES (PLATAFORMA PROIOT). ....	32
<b>FIGURA 6</b> - DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE DE TESTE.....	32
<b>FIGURA 7</b> - PORTA SERIAL VISTA PELO TERA TERM.....	33
<b>FIGURA 8</b> - CONFIGURAÇÃO DE FREQUÊNCIA DE SUB-BANDA.....	34
<b>FIGURA 9</b> - CONFIGURAÇÕES GATEWAY. ....	34
<b>FIGURA 10</b> - UPLINKS REALIZADOS. ....	35
<b>FIGURA 11</b> - UPLINKS NO CHIRPSTACK.....	35
<b>FIGURA 12</b> - TABELA COM AS ESTRUTURAS DE CADA TIPO DE UPLINKS. ....	36
<b>FIGURA 13</b> - CÓDIGO DA ESTRUTURA DO PAYLOAD DE DADOS. ....	36
<b>FIGURA 14</b> - TABELAS COM OS DADOS A SEREM TRANSMITIDOS POR UPLINKS LORAWAN. ....	37
<b>FIGURA 15</b> - BIBLIOTECA ADE7880. ....	37
<b>FIGURA 16</b> - CÓDIGO PARA TESTE DO ADE.....	38
<b>FIGURA 17</b> - SAÍDA DO MONITOR SERIAL DURANTE O TESTE. ....	38
<b>FIGURA 18</b> - CONFIGURAÇÃO PARA OS PARÂMETROS DE ENDPOINT VIA LORAWAN. ....	39
<b>FIGURA 19</b> - INTERPRETADOR PARA CONVERSÃO DO PAYLOAD. ....	39
<b>FIGURA 20</b> - TABELA DE CASOS DE TESTE.....	40
<b>FIGURA 21</b> - TELA DE LCD DO ENDPOINT.....	41
<b>FIGURA 22</b> - BIBLIOTECA PARA UTILIZAÇÃO DA TELA LCD. ....	41
<b>FIGURA 23</b> - TELAS DE AJUSTES PARA FATOR DE POTÊNCIA (A) E ADIÇÃO DOS CODEC NO CHIRPSTACK (B). ....	42
<b>FIGURA 24</b> - CÓDIGO PARA GRAVAÇÃO DE DADOS NA MEMÓRIA FLASH DO ENDPOINT.....	42
<b>FIGURA 25</b> - BIBLIOTECA PARA GRAVAÇÃO DE DADOS NA MEMÓRIA FLASH DO ENDPOINT. ....	43
<b>FIGURA 26</b> - REFATORAÇÃO ADICIONAL NO CODEC.....	43
<b>FIGURA 27</b> – MÁQUINA DE ESTADO.....	44
<b>FIGURA 28</b> - TESTES DE BANCADA (A) E VALIDAÇÃO DOS TESTES DE PRECISÃO (B).....	45

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1</b> -TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE OS MEDIDORES DE ENERGIA.,.	26
<b>TABELA 2</b> - TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE OS MICROCONTROLADORES. ,,, .....	27
<b>TABELA 3</b> - TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE OS ALIMENTADORES DE HARDWARE DE 3,3V.,.....	28
<b>TABELA 4</b> - TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE OS ALIMENTADORES DE HARDWARE DE 5V.,.....	28

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA .....	13
1.2 JUSTIFICATIVA .....	14
1.3 OBJETIVOS .....	14
1.3.1 OBJETIVO GERAL .....	14
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
2.1 TECNOLOGIA LORA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS .....	15
2.2 SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE ENERGIA SEM FIO .....	16
2.3 IOT INDUSTRIAL E GERENCIAMENTO INTELIGENTE DE ENERGIA .....	17
2.4 DESAFIO E SOLUÇÕES .....	17
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>19</b>
3.1 PROPOSTA DE TRABALHO .....	19
3.2 MÉTODOS EMPREGADOS .....	20
3.3 HARDWARE E SOFTWARE .....	21
3.3.1 HARDWARE.....	21
3.3.2 SOFTWARE .....	24
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>25</b>
4.1 LEVANTAMENTO DAS TECNOLOGIAS APLICÁVEIS AO <i>ENDPOINT</i> .....	25
4.2 DESENVOLVIMENTO DO ESQUEMÁTICO E LAYOUT DO <i>HARDWARE</i> DO <i>ENDPOINT</i> .....	29
4.3 DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE EMBARCADO NO <i>HARDWARE</i> DO <i>ENDPOINT</i> .....	31
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>47</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em um contexto global cada vez mais atento às questões ambientais, a indústria se depara com o desafio urgente de reduzir sua pegada de carbono. Uma das estratégias mais promissoras para atingir esse objetivo é a implantação de práticas sustentáveis, com um foco particular na melhoria da eficiência energética. Esta abordagem não só diminui o consumo de energia elétrica, considerando o papel significativo da indústria como grande consumidora de energia (HAXHIBEQIRI et al., 2018), mas também traz benefícios adicionais como a mitigação das mudanças climáticas, através da redução nas emissões de gases de efeito estufa, e o aumento da competitividade empresarial, por meio da redução de custos operacionais e aumento da produtividade (PEDÓ, 2020).

A eficiência energética, portanto, é uma solução abrangente que atende a necessidades ambientais e econômicas. Neste contexto, as tecnologias emergentes desempenham um papel vital, e entre elas destaca-se a tecnologia de comunicação *LoRa* (*Long Range*). Esta tecnologia, aplicada no Gerenciamento de Consumo de Energia Elétrica baseado em Internet das Coisas (do inglês, *Internet of Things* ou *IoT*), oferece um meio eficiente para monitorar e controlar o consumo de energia em larga escala, mesmo em ambientes industriais complexos (LENTZ et al., 2018). A *LoRa* se sobressai por sua capacidade de transmitir dados a longas distâncias com baixo consumo de energia, o que é crucial em ambientes industriais extensos onde a eficiência na transmissão de dados é tão importante quanto a própria eficiência energética (HAXHIBEQIRI et al., 2018).

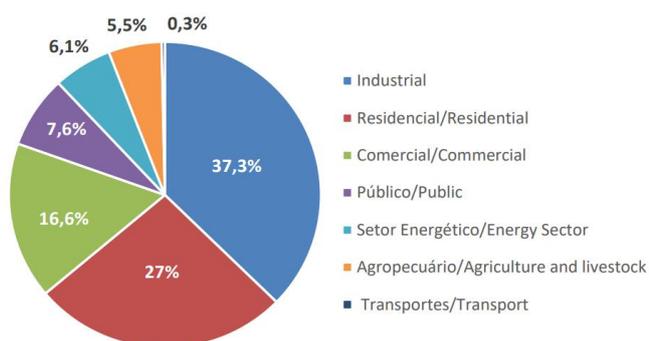
No entanto, a implantação dessa tecnologia enfrenta desafios específicos, como a necessidade de integrar sistemas legados, garantir a segurança dos dados transmitidos e otimizar a rede para o máximo desempenho com o mínimo de consumo energético (PEDÓ, 2020). Além disso, a adoção de *LoRa* em ambientes industriais requer uma análise detalhada das condições operacionais para assegurar que a tecnologia seja utilizada de forma mais eficaz, maximizando os benefícios e minimizando potenciais pontos de falha.

Portanto, o uso de Gerenciadores de Consumo de Energia Elétrica baseado em *IoT* podem proporcionar uma gestão energética mais eficiente em ambientes industriais, permitindo que a empresa tome medidas corretivas para reduzir o consumo e otimizar o uso da energia elétrica. Entretanto, para o desenvolvimento total se faz necessário ampla equipe multidisciplinar e fases de desenvolvimento diversificada, deste de planejamento de gestão até

validação da solução proposta. Assim, este trabalho tem como objetivo apenas parte deste projeto global. Este trabalho para conclusão de curso tem como foco o desenvolvimento do *hardware* e *firmware* do *endpoint* aplicados neste projeto global de gerenciamento para redução do gasto de energia elétrica em empresa do polo industrial de Manaus. Buscando identificar as melhores práticas para sua implantação e analisando os desafios a serem superados para sua otimização e auxiliando na promoção de práticas sustentáveis.

## 1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2023 (EPE; MME, 2023), parcela significativa da energia elétrica gerada no Brasil é utilizada pelo setor industrial. Como resultado da modernização contínua e do progresso tecnológico, tem-se verificado um aumento gradual do consumo de energia elétrica. O setor industrial necessitar de meios e planos para otimizar este consumo e garantir operações que sejam eficientes, seguras e econômicas (SAMPAIO, 2020).



**Figura 1** - Consumo de energia elétrica por setor (em %).

Fonte: Empresa de pesquisas energéticas, 2023

Entretanto, para esta otimização o consumo energético é necessário sanar problemas presentes no processo, como estes:

- Alcançar um método de custo abaixo referente ao mercado. Isso é fundamental para aumentar a competitividade da solução no mercado internacional e atrair uma maior taxa de adesão;
- Obter a instalação rápida e simples, sem a necessidade de desligar ou interromper as máquinas de produção por longos períodos. Isso se torna fundamental para evitar atrasos na produção e garantir a continuidade das operações na fábrica.

Os problemas citados podem se respondidos satisfatoriamente através deste estudo proposto. Salientando que este responderá em parte o desenvolvimento de projeto macro envolvendo empresa do polo industrial de Manaus.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Para corresponde como parte da solução para o gerenciamento de consumo de energia elétrica visar-se a otimização do projeto de *hardware* para reduzir os custos de produção. Isso pode incluir a seleção de componentes de baixo custo, a adoção de tecnologias de fabricação eficientes, como técnicas de montagem em massa, e a busca por parcerias estratégicas para obter preços mais competitivos de fornecedores de componentes. Somar-se uma solução "plug and play" que implica na criação de um dispositivo que possa ser facilmente conectado e integrado ao sistema já existente, sem demandar alterações na infraestrutura, como uma tomada intermediária posicionada entre a máquina e a tomada da rede elétrica. Isso significa que a implementação não requer procedimentos como corte de fios na rede elétrica, modificações nas caixas de disjuntores ou qualquer tipo de alteração elétrica nas máquinas.

Assim, este estudo corresponderá em parte no desenvolvimento de projeto de gerenciamento de consumo de energia elétrica e possibilitará o desenvolvimento de protótipo para utilização fabril no polo de Manaus.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GERAL**

Desenvolver e produzir *hardware* e seu firmware para aplicação de gerenciamento de energia elétrica em indústria do polo industrial de Manaus.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para atingir o objetivo geral do trabalho, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Levantamento das Tecnologias Aplicáveis ao Endpoint;
- Desenvolvimento do esquemático e layout do *hardware* do Endpoint;
- Montagem e teste do *hardware* do Endpoint;
- Desenvolvimento do firmware embarcado no *hardware* do Endpoint;
- Validação e Testes finais.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 TECNOLOGIA LORA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

*LoRa* é uma tecnologia desenvolvida recentemente e vem ganhando destaque no mercado atual, tem capacidade de transmitir dados por longas distâncias graças ao amplo esquema de modulação de espalhamento espectral (MURDYANTORO et al., 2019). Atuando em faixa de frequência abaixo de 1 GHz e utilizando a técnica de modulação de espectro espalhado chamado (CSS) (SINHA; WEI; HWANG, 2017), que sacrifica a taxa de dados em troca de maior sensibilidade dentro de uma largura de banda de canal fixa (HAXHIBEQIRI et al., 2018). Esta modulação foi desenvolvido na década de 1940, foi usado principalmente em aplicações militares devido à sua capacidade de alcançar longas distâncias de comunicação e resistir a interferências (SINHA; WEI; HWANG, 2017). *LoRa* é a primeira implementação acessível de CSS para fins comerciais.

Vários estudos recentes concentraram-se no exame das características do *LoRa* para aplicações industriais. Como o estudo (TESSARO et al., 2018a) que avaliou o desempenho e a resiliência ao ruído do *LoRa* em um contexto industrial específico e identificou a configuração ideal e a relação entre a taxa de dados e a perda de pacotes. Outro estudo (TESSARO et al., 2018b) desenvolveu um sistema preciso de sincronização de tempo para escalonamento para o Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (do inglês *Time Division Multiple Access* ou *TDMA*) usando *LoRa* e apresentou resultados experimentais. O principal conceito por trás desta pesquisa é utilizar a camada física *LoRa* sem a camada *LoRaWAN MAC (Medium Access Control)* para criar uma pilha de protocolos que maximize o desempenho do rádio e atenda a todos os requisitos da *IoT* industrial. Ao adotar esta abordagem, *LoRa* pode ser considerada uma tecnologia adequada para aplicações industriais de *IoT* de baixa largura de banda (HAXHIBEQIRI et al., 2017).

Além disso, a utilização dos dispositivos *LoRa* desempenhou papel importante em estudos de gestão de energia, redução de usos de recursos naturais, controle de poluição, eficiência de infraestrutura. Os casos de uso conhecidos visam especificamente cidades inteligentes, casas e edifícios inteligentes, agricultura, topografia e cadeia de abastecimento e logística (PEDÓ, 2020). Observa-se que *LoRa* um sistema aberto e limitado que opera no espectro isento de licença e oferece oportunidades incríveis para a criação de diferentes sistemas de conectividade inteligentes e assim tendo potencial para aplicações em diversas áreas, como na área de economia de energia elétrica.

## 2.2 SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE ENERGIA SEM FIO

A implantação de monitoramento de energia permite maior controle em tempo real do consumo elétrico, e assim, aumentando a eficiência e a sustentabilidade (SANCHEZ-SUTIL, F.; CANO-ORTEGA, A.2023). Envolvendo para isso a tecnologia *Wireless-Fidelity (Wi-Fi)* temos diversos estudos disponíveis ambientes. Como um medidor trifásico econômico, adequado para fins residenciais e de pequenas empresas conectados à Internet (MEDEIROS et al., 2016). O projeto de um plugue inteligente (*Smart Plug*) que foi integrado a redes Wi-Fi e tinha a capacidade de medir o uso de energia elétrica e de ligar ou desligar dispositivos (THONGKHAO; PORA, 2016). Em outro estudo foi relatado o desenvolvimento de um medidor inteligente monofásico que foi conectado à Internet das Coisas (*IoT*) através de comunicação sem fio usando o protocolo *Wi-Fi*. Este medidor teve como objetivo reduzir erros humanos durante a operação e diminuir o consumo de energia (HLAING et al., 2017). Além disso, outra pesquisa desenvolveu um medidor inteligente econômico que foi conectado à *IoT* e utilizaram o medidor ADE7913 para medir diversas grandezas elétricas (ABATE et al., 2019). Este medidor foi conectado a um microcontrolador STM32F2.

Outrossim, implantaram um medidor de energia inteligente para promover o uso eficiente da energia elétrica, com foco específico no monitoramento e controle do consumo de energia em redes inteligentes (BARMAN et al., 2018). Seu sistema de comunicação utilizava uma rede Wi-Fi baseada na tecnologia ESP8266. Da mesma forma, projetaram um sistema de monitoramento de energia *IoT*, utilizando um medidor *PZEM-004t* e um mini microcontrolador *Wemosd1* com protocolo *Wi-Fi ESP8266* (CHOURUANG; MEEKUL, 2019). Ademais, desenvolveram um sistema de monitoramento de energia de baixo custo, empregando comunicação *Wi-Fi* por meio de um *nodeMCU* com *chip ESP8266* e relógio em tempo real (BARUAH; BORAH; CHATTERJEE, 2019). A medição de potência foi realizada através da leitura de pulsos emitidos por medidores eletrônicos.

É amplamente reconhecido que diversas tecnologias sem fio consomem uma quantidade significativa de energia (SANCHEZ-SUTIL; CANO-ORTEGA, 2023). Em contraste, as tecnologias LPWAN (*Low-power Wide-area Network*) oferecem equipamentos mais eficientes e capacidades de maior alcance. Com base nisso, um estudo desenvolveu um sistema de monitoramento inteligente para redes mesh que utiliza LPWANs de baixo consumo para monitorar a qualidade da energia (HOGLUND et al., 2012). Da mesma forma, em outro estudo um sistema de monitorização inteligente para avaliar a eficiência energética dos motores de

indução, empregando um sistema de comunicação *Long-Range Wide Area Network (LoRaWAN)* através do serviço *The Things Network*, que redireciona informações para o planilha Google (CANO-ORTEGA; SÁNCHEZ-SUTIL, 2019). Um sistema de monitorização e controlo para redes de iluminação pública foi desenvolvido utilizando um sistema de comunicações baseadas em redes *LoRa*. Em seu sistema, eles empregam um dispositivo *PZEM-004t* para medir parâmetros elétricos e um *dimmer RobotDyn* para regular o fluxo (SÁNCHEZ SUTIL; CANO-ORTEGA, 2020). Com base na literatura observa-se uma vasta possibilidade de monitoramento de energia otimizado, em especial, utilizando o sistema *LoRa*.

### **2.3 IOT INDUSTRIAL E GERENCIAMENTO INTELIGENTE DE ENERGIA**

Para fazer face ao elevado consumo de eletricidade em ambientes industriais, é crucial estabelecer um sistema de gestão de energia especificamente adaptado às necessidades da indústria e garantir a sua implementação eficaz (WEI; HONG; ALAM, 2016). Nos últimos anos, tanto a academia como a indústria têm feito esforços para melhorar a eficiência energética nos processos de produção (SAMPAIO, 2020). Por exemplo, o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de fluxo de energia usando Ethernet e controle de supervisão e aquisição de dados (SCADA) para uma aplicação farmacêutica (LAMPRET et al., 2007). Da mesma forma, projetaram um protótipo de sistema de informação energética empresarial que apoia a gestão estratégica de energia, fornecendo monitoramento energético abrangente e integração com software de modelagem energética e bancos de dados empresariais (SWORDS; COYLE; NORTON, 2008). Em outro estudo foi realizado uma análise sobre o potencial dos consumidores industriais para aumentarem a sua utilização de eletricidade gerada pelo vento através de uma resposta à procura (DR) baseada no preço (FINN; FITZPATRICK, 2014). Também foi proposto uma abordagem de gestão de energia para aplicações de produção industrial, concentrando-se em métodos e indicadores de desempenho adequados (MAY et al., 2015). Um aspecto importante para alcançar a interoperabilidade entre redes e instalações inteligentes é a utilização de um modelo de informação comum.

### **2.4 DESAFIO E SOLUÇÕES**

Com a crescente preocupação ambiental, as indústrias apresentam um crescente comprometimento com a redução das suas pegadas de carbono através da adoção de práticas sustentáveis e da redução do consumo de energia elétrica. A indústria consome uma quantidade significativa de energia elétrica, o que resulta em altos custos operacionais e impactos negativos

no meio ambiente. Entre os benefícios do aumento da eficiência energética nos processos industriais podemos citar: a redução do consumo de energia elétrica, a mitigação das mudanças climáticas e o aumento da produtividade e da competitividade das empresas. Primeiramente, ao reduzir o consumo de energia temos, por consequência, uma menor demanda por combustíveis fósseis e outros recursos energéticos. Isso contribui para a segurança energética, uma vez que menos energia precisa ser produzida. Em adição, a eficiência energética desempenha um papel importante na mitigação das mudanças climáticas, uma vez que a redução do consumo de energia resulta em menos emissões de gases de efeito estufa. Um outro benefício da eficiência energética, é a economia de custos com energia elétrica, o que pode resultar em economias significativas ao longo do tempo, que serão convertidas em aumento da produtividade e da competitividade das empresas, devido aos custos de produção reduzidos. Dentro desse contexto, um Gerenciador de Consumo de Energia Elétrica pode ajudar a identificar áreas de desperdício e ineficiência energética em processos industriais, permitindo que a empresa tome medidas corretivas para reduzir o consumo e otimizar o uso da energia.

Um gerenciador de consumo de energia elétrica, baseado em *IoT* pode ajudar a monitorar e controlar o uso de energia, identificando áreas de melhoria e possibilitando a adoção de medidas que promovam a sustentabilidade e consumo eficiente de energia elétrica. O gerenciamento de energia apresenta desafios pois, muitos dos equipamentos não podem ser desligados e os ambientes produtivos devem ter suas temperaturas controladas. Para evitar o aumento significativo dos custos de produção, podemos focar nas seguintes soluções: substituir as máquinas antigas, que com o passar do tempo sofrem desgaste e consomem mais energia elétrica, por equipamentos mais novos e eficientes; e evitar realizar manutenções corretivas que ocorrem por desatenção ou por falta de manutenções planejadas. Um sistema de monitoramento de energia utilizando *IoT* na indústria pode detectar quando deve ser feita a manutenção preventiva e quando o consumo de energia elétrica atinge níveis aceitáveis. Diante dos gastos significativos de energia, com impactos econômicos e ambientais, no contexto de mudanças climáticas e crise energética em que vivemos, a oferta de sistemas mais eficientes é a melhor alternativa para reduzir esses impactos e, ao mesmo tempo, possibilitar que as indústrias reduzam seu custo de produção e consequentemente tenham maior lucro.

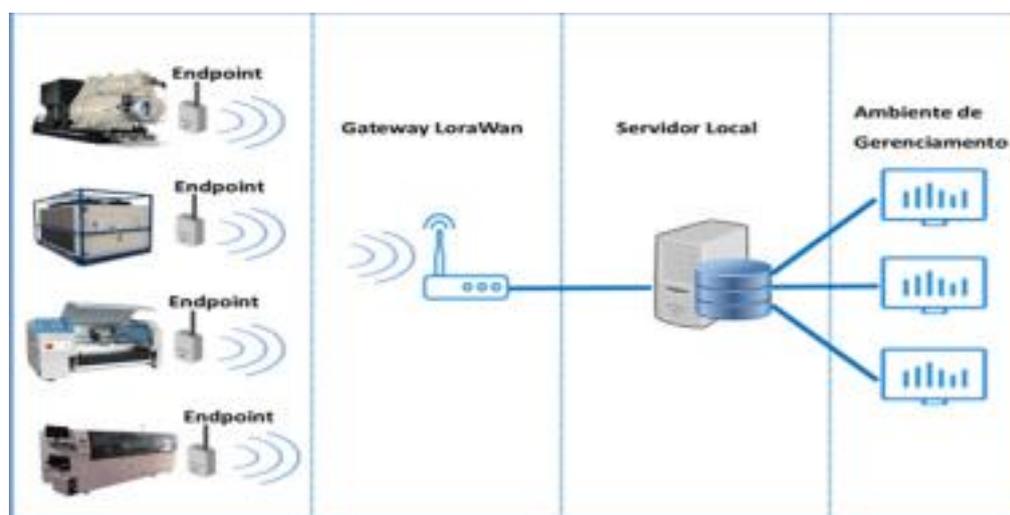
### 3. MATERIAS E MÉTODOS

Esta sessão abrange a apresentação dos materiais e métodos utilizados na execução do trabalho realizado, que é delineado em três fases distintas: a proposta de trabalho, os métodos empregados e o *hardware* e o *software* empregados.

#### 3.1 PROPOSTA DE TRABALHO

Nesse projeto será utilizada uma arquitetura de *IoT* constituída por: *Endpoints*, *gateway LoRaWAN*, servidor e ambiente de gerenciamento e monitoramento como ilustrado na **Figura 2**. No dispositivo denominado *Endpoint*, os parâmetros de energia são coletados por um sensor, logo em seguida são processados dentro de um microcontrolador com baixa complexidade computacional, e esses dados processados são enviados via protocolo LoRaWAN para um *gateway*. Este é responsável por organizar o tráfego de informações, decodificando pacotes de dados e protegendo informações de ambos os lados entre os *Endpoints* e o servidor local.

No futuro, após os dados serem alocados no servidor local, devem ser processados e serão convertidos em métricas para serem exibidas em painéis visuais digitais permitindo a configuração de alarmes e a identificação de padrões que auxiliarão na tomada de decisões que possam reduzir o gasto de energia elétrica.



**Figura 2** - Modelo do Layout do projeto.

Fonte: autor

### 3.2 MÉTODOS EMPREGADOS

O método adotado é predominantemente experimental e aplicado com uma abordagem iterativa de desenvolvimento e teste. Inicialmente foi realizado a concepção e desenvolvimento do dispositivo de *hardware IoT*. Este dispositivo é projetado para coleta, processamento e envio de dados elétricos de máquinas industriais em ambiente fabril. As especificações do *hardware* são baseadas em requisitos, tais como: precisão na coleta de dados, eficiência energética e capacidade de comunicação sem fio, potencialmente utilizando a tecnologia *LoRa* para transmissão de dados.

Após o desenvolvimento do hardware, o próximo passo envolve sua integração em um ambiente industrial real. O dispositivo será implantado nas tomadas de algumas máquinas selecionadas na linha de produção. Essa fase inclui testes preliminares para verificar a compatibilidade do dispositivo com diferentes máquinas e para assegurar a coleta estável, segura e precisa de dados.

Paralelamente, um gateway será configurado para receber os dados transmitidos pelos dispositivos *IoT*. Este *gateway* atuará como um ponto central de coleta de dados, enviando-os posteriormente para análise e processamento. A seleção e configuração do *gateway* levarão em conta critérios como capacidade de processamento, confiabilidade e segurança na transmissão de dados.

O teste piloto da solução será realizado em um determinado período para avaliar a eficácia do sistema completo. Durante este teste, serão coletados dados sobre o consumo de energia das máquinas, que serão então utilizados para validar a precisão e a eficácia do dispositivo *IoT* e do *gateway*. Este teste também ajudará a identificar qualquer desafio operacional ou técnico que possa surgir em um ambiente industrial real.

Finalmente, a análise dos dados coletados será realizada para avaliar o desempenho geral do sistema e sua capacidade de fornecer percepções sobre o consumo de energia. A metodologia adotada assegura uma abordagem sistemática para o desenvolvimento, implementação e avaliação da solução de gerenciamento de consumo de energia, visando alcançar um equilíbrio entre inovação tecnológica e aplicabilidade prática no contexto industrial.

### **3.3 HARDWARE E SOFTWARE**

#### **3.3.1 HARDWARE**

##### **3.3.1.1 MICROCONTROLADOR HTLRBL32L.**

O microcontrolador HTLRBL32L desempenha um papel central no projeto "*LoRa Electricity Manager*", atuando como o cérebro do dispositivo de gerenciamento de energia. Este microcontrolador é escolhido por sua capacidade de comunicação LoRaWAN, que permite a transmissão de dados de longo alcance e com baixo consumo de energia. A escolha deste microcontrolador é estratégica, visando a eficiência energética e a confiabilidade na transmissão de dados em ambientes industriais. Além de suas capacidades de comunicação, o HTLRBL32L é responsável por receber e processar informações do medidor de energia, tornando-o essencial para a medição precisa e em tempo real de parâmetros como corrente, tensão e potência. Sua integração com outros componentes do circuito, como o chip ADE7880, é facilitada através de interfaces de comunicação serial como SPI ou I2C, garantindo um fluxo de dados eficiente e contínuo dentro do sistema.

##### **3.3.1.2 MEDIDOR DE ENERGIA ADE7880.**

O medidor de energia ADE7880 é um componente chave na medição precisa de parâmetros elétricos como corrente, tensão, potência aparente, potência ativa e harmônicas de corrente. Este dispositivo é equipado com conversores analógico-digitais, permitindo medições trifásicas de tensão e corrente em um intervalo de -0.5V a +0.5V AC. Sua capacidade de captar harmônicas de corrente é particularmente útil na prevenção de falhas em equipamentos, fornecendo uma ferramenta valiosa para manutenção preditiva. A comunicação do ADE7880 com sistemas de microcontroladores é realizada por meio da interface SPI, o que garante a transferência de dados de alta fidelidade e em tempo real para análise e processamento. A escolha do ADE7880 para este sistema reflete um equilíbrio entre precisão de medição, confiabilidade e funcionalidade avançada, tornando-o um componente essencial para o monitoramento efetivo do consumo de energia em ambientes industriais.

### 3.3.1.3 TRANSFORMADOR DE CORRENTE.

O Transformador de Corrente é utilizado para adaptar as correntes elétricas de alta intensidade, comuns em equipamentos industriais, para níveis compatíveis com os sistemas de medição. Sua função é essencial para assegurar que a corrente elétrica possa ser medida com segurança e precisão pelo medidor de energia. Este componente permite a conversão de correntes elétricas de maiores intensidades para uma faixa mais baixa, evitando danos aos circuitos de medição devido a excesso de corrente. A adaptabilidade do transformador a diferentes faixas de corrente, como 20A, 40A ou 70A, destaca sua flexibilidade e importância para aplicações em diversas máquinas industriais. Além disso, a inclusão de um circuito de proteção contra sobrecorrente contribui significativamente para a segurança e confiabilidade do sistema de medição, mantendo a integridade e a precisão dos dados coletados sob várias condições operacionais.

### 3.3.1.4 CIRCUITO DE AQUISIÇÃO DE TENSÃO.

O Circuito de Aquisição de Tensão é essencial para reduzir os valores de tensão para níveis apropriados para o medidor de energia, garantindo medições precisas e seguras. Este circuito utiliza um divisor de tensão, composto por resistores precisos de  $1k\Omega$  e  $1M\Omega$ , para reduzir o nível de tensão em mil vezes. Tal redução é crucial para permitir a medição de tensões de até 500V, uma faixa comum em ambientes industriais. Além disso, o circuito é reforçado com dispositivos de proteção, incluindo termistores de coeficiente de temperatura positivo (PTCs) e dispositivos de proteção contra surtos (GDTs). Os PTCs funcionam como fusíveis térmicos, protegendo o circuito em casos de sobrecarga ou curto-circuito, enquanto os GDTs são usados para suprimir transientes de tensão e proteger contra picos de tensão. A incorporação desses elementos não apenas garante a precisão das medições, mas também a segurança e a durabilidade do sistema de medição de energia.

### 3.3.1.5 CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO (HLK-PM01AC/DC).

O Circuito de Alimentação do sistema de medição de energia desempenha um papel crítico na garantia de uma fonte de energia estável e segura para os componentes eletrônicos.

Este circuito é composto por uma fonte HLK-PM01AC/DC de 5V, que transforma a tensão da rede elétrica em uma tensão mais baixa e estável para o circuito. Este aspecto é particularmente importante, pois assegura que os componentes eletrônicos, incluindo o microcontrolador e o medidor de energia, recebam uma alimentação constante e segura, essencial para o funcionamento correto e preciso do sistema. Adicionalmente, um regulador de tensão AMS1117 é utilizado para ajustar a tensão de saída da fonte de alimentação para 3.3V, que é o nível de tensão necessário para a operação ideal do microcontrolador e de outros componentes do circuito. A integração desses componentes no Circuito de Alimentação assegura que todo o sistema de medição de energia funcione de forma eficiente e confiável, minimizando o risco de falhas devido a variações ou instabilidades na alimentação elétrica.

#### 3.3.1.6 ANTENA *LoRa*.

A Antena *LoRa* é integrada ao sistema de medição de energia para facilitar a comunicação sem fio de longo alcance, característica essencial da tecnologia *LoRaWAN*. A funcionalidade desta antena permite a transmissão eficiente de dados coletados pelo microcontrolador para uma plataforma de monitoramento remoto ou estação base. A eficácia da antena em ambientes industriais, onde desafios de conectividade são comuns, é um aspecto relevante para a implementação bem-sucedida do sistema. Além de sua capacidade de transmissão, a antena contribui para a eficiência energética geral do sistema, um fator importante no contexto de sustentabilidade e operações industriais. A seleção e a implementação da Antena *LoRa*, portanto, desempenham um papel importante na garantia de uma comunicação de dados confiável e na manutenção da flexibilidade operacional do sistema de medição de energia em diferentes ambientes industriais.

#### 3.3.1.7 CIRCUITO DE PROTEÇÃO.

O Circuito de Proteção no sistema de medição de energia é essencial para assegurar a integridade e segurança do dispositivo em condições de operação variáveis. Este circuito inclui dispositivos de proteção contra surtos, como GDTs (Dispositivos de Gás de Descarga) e PTCs (Termistores de Coeficiente de Temperatura Positivo). Os GDTs são utilizados para proteger o circuito contra picos de tensão indesejados, suprimindo transientes de tensão e minimizando o

risco de danos aos componentes eletrônicos. Os PTCs atuam como fusíveis térmicos, limitando a corrente em situações de sobrecarga ou curto-circuito, contribuindo assim para a segurança operacional do sistema. A inclusão desses elementos no Circuito de Proteção é uma medida preventiva crucial, pois garante a estabilidade e a durabilidade do sistema de medição de energia, particularmente em ambientes industriais onde as condições elétricas podem ser imprevisíveis e potencialmente perigosas. A implementação deste circuito de proteção é, portanto, um passo fundamental na concepção de um sistema de medição de energia confiável e seguro.

### 3.3.2 SOFTWARE

#### 3.3.2.1 KICAD.

É um software de design eletrônico de código aberto usado para desenvolver esquemas e projetos de placas de circuito impresso (PCBs). Ele oferece uma suíte completa de ferramentas para captura esquemática, layout de PCB, roteamento de trilhas, verificação de regras de projeto, geração de arquivos de fabricação e muito mais. Algumas das principais características e funcionalidades do *KiCad* incluem: Captura Esquemática, Layout de PCB, Bibliotecas de Componentes, Visualização 3D, Verificação de Regras de Projeto (DRC) e Geração de Arquivos de Fabricação.

#### 3.3.2.2 WISE STUDIO.

É um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) gratuito e de código aberto desenvolvido pela *STMicroelectronics* para o desenvolvimento de aplicativos para sua família *BlueNRG* de sistemas em chip (SoCs) *Bluetooth Low Energy (BLE)*. Ele é baseado no Eclipse IDE e inclui uma variedade de recursos para ajudar os desenvolvedores a começarem rapidamente.

#### 3.3.2.3 TERA TERM

É emulador de terminal de código aberto usado para se conectar a dispositivos remotos, como servidores, roteadores, switches e outros equipamentos de rede. Ele permite que você se conecte a esses dispositivos por meio de diferentes protocolos de comunicação, como *Telnet*, *SSH* e *serial*. Isso oferece flexibilidade ao se conectar a diferentes tipos de dispositivos remotos.

#### 3.3.2.4 MQTT (MESSAGE QUEUING TELEMETRY TRANSPORT)

É um protocolo de comunicação leve e de publicação/assinatura (publish/subscribe) projetado para troca de mensagens em redes de baixa largura de banda e com recursos limitados. Ele é frequentemente usado em aplicações *IoT* para enviar e receber dados entre dispositivos conectados.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta sessão abrange a apresentação dos estágios envolvidos no desenvolvimento do trabalho proposto e nos resultados primários alcançados. Esses estágios são categorizados em seis seções, quais são: levantamento das tecnologias aplicáveis ao *Endpoint*, desenvolvimento do esquemático e layout do hardware do *Endpoint*, montagem e teste do *hardware* do *Endpoint* e desenvolvimento do firmware embarcado no *hardware Endpoint*.

#### 4.1 LEVANTAMENTO DAS TECNOLOGIAS APLICÁVEIS AO *ENDPOINT*.

Nessa primeira etapa foi realizada uma pesquisa entre as principais tecnologias aplicadas ao hardware do *Endpoint* com bases em sites especializados da área. A definição da arquitetura de hardware de *IoT* foi considerada uma atividade macro e, como atividades micro, o levantamento das especificações elétricas, número de portas analógicas e digitais, tipos de comunicações disponíveis, sensores, circuito integrado de processamento e de transmissão sem fio.

Os principais componentes do hardware são:

- Tomada Trifásica: Para adquirir valores de tensão das máquinas monitoradas, alternando entre tomadas monofásicas e trifásicas.
- Medidor de Energia: Utilizar conversores analógicos/digitais para medições de -0.5V a 0.5V AC Trifásico, adquirindo valores de fator de potência, harmônicas de corrente e potências, transmitindo informações para o microcontrolador via comunicação SPI.
- Transformador de Corrente: Para reduzir a corrente medida a um nível adequado para o medidor de energia, com transformadores de correntes acoplados nos cabos de alimentação da máquina.
- Circuito de Aquisição de Tensão: Utiliza um circuito divisor de tensão com resistores precisos para medir tensões de até 500V, incluindo PTCs e GDTs para proteção contra picos de tensão e sobrecarga.

- Alimentação do Hardware: Composta por uma fonte HLK-PM01AC/DC de 5V e um regulador de tensão de 3.3V AMS1117.
- Microcontrolador: Controla a PCB e possui comunicação LoRaWAN, responsável por receber informações do medidor de energia e enviá-las para o gateway.
- IC (Medidor de Energia): Responsável pelo monitoramento de energia, oferecendo medições avançadas de corrente, tensão e potência, e se comunica com o microcontrolador via interfaces de comunicação serial.
- Antena LoRa: Para comunicação sem fio de longo alcance, enviando dados de consumo de energia coletados pelo microcontrolador para um sistema de monitoramento remoto.

Além disso, o esquema inclui elementos adicionais como capacitores de desacoplamento, resistores de pull-up/pull-down e circuitos de filtragem para garantir um funcionamento confiável, minimizando ruídos e estabilizando a tensão e a corrente.

Para o levantamento em base de dados foram considerados para pesquisas os seguintes itens: medidor de energia, microcontrolador e os alimentadores de hardware de 3,3 e 5 V.

Referente ao medidor de energia se optou pelo ADE7880 qual indicava os parâmetros pertinentes para o desenvolvimento da pesquisa, os outros medidores apresentaram informações genéricas ou faltar de informações, como indicar a **Tabela 1**.

**Tabela 1** -Tabela de comparação entre os medidores de energia.<sup>1,2,3</sup>

<b>Característica</b>	<b>ADE7880</b>	<b>ADE9000</b>	<b>ADE7878A</b>	<b>ADE9153A</b>
<b>Precisão de Medição de Energia</b>	> 0,2% (faixa dinâmica de 5000:1)	Alta precisão, detalhes não especificados	Alta precisão, detalhes não especificados	Alta precisão, suporta medidores Classe 1 e Classe 2
<b>Análise Harmônica</b>	Até a 63 <sup>a</sup> harmônica	Capacidade avançada, detalhes não especificados	Capacidade harmônica, detalhes não especificados	Não especificado
<b>Faixa de Medição Dinâmica</b>	2000:01:00	Detalhes não especificados	Detalhes não especificados	Detalhes não especificados

<sup>1</sup> Disponível em:< <https://ez.analog.com/energy-metering/f/q-a/534152/hoosing-between-ade9000-and-ade7878a>> Acessado 15 nov,2022.

<sup>2</sup> Disponível em:< <https://www.powersystemsdesign.com/articles/energy-metering-ic-provides-high-accuracy-harmonic-analysis-for-advanced-power-quality-monitoring/83/267>> Acessado 15 nov,2022.

<sup>3</sup> Disponível em:< <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ade9153a.pdf>> Acessado 15 nov,2022.

<b>Interface de Comunicação</b>	SPI, I2C	SPI, I2C	SPI, I2C	SPI, I2C
<b>Recursos Adicionais</b>	ARTM para análise harmônica	Monitoramento de qualidade de energia	Detalhes não especificados	mSure para auto calibração
<b>Suporte a Múltiplas Fases</b>	Sim	Sim	Sim	Detalhes não especificados

Fonte: autor

Para o microcontrolador, houve a comparação entre 5 modelos disponíveis no mercado e a opção escolhida foi o modelo HTLRBL32L devido a conectividade de dispositivo de *IoT*. Os modelos concorrentes indicaram alta aplicação em diversas áreas, mas para o projeto especificado o modelo escolhido indicar alta aplicabilidade e foi aplicado em nosso projeto. A **Tabela 2** mostrar o comparativo entre os microcontroladores.

**Tabela 2** - Tabela de comparação entre os microcontroladores. <sup>4,5,6,7,8</sup>

<b>Característica</b>	<b>HTLRBL32L</b>	<b>Raspberry Pi Pico</b>	<b>Arduino Nano</b>	<b>Teensy</b>	<b>nRF52840</b>
<b>Arquitetura do Processador</b>	ARM Cortex M0+ 32-bit	RP2040 (ARM Cortex-M0)	ATMega328P	ARM Cortex-M7	ARM Cortex-M4
<b>Memória RAM</b>	64 KB	264 KB	2 KB	Varia por modelo	Não especificado
<b>Memória Flash</b>	256 KB	2 MB	32 KB	Varia por modelo	Não especificado
<b>Interfaces de Comunicação</b>	I2C, SPI, USART, LPUART, Bluetooth, LoRa	I2C, SPI, UART	I2C, SPI, UART	I2C, SPI, UART, e mais	I2C, SPI, UART, BLE, Bluetooth 5, Thread, Zigbee, ANT
<b>Consumo de Energia</b>	2 uA (DeepSleep com RAM retida)	38 mA (normal), até 60 mA (WiFi ativado),	19-20 mA (normal)	100 mA (600 MHz operação)	1.5 uA (modo Low power sub-mode) até 16.4 mA (transmissão BLE em 1 Mbps a +8 dBm),

<sup>4</sup> Disponível em: < <https://github.com/htmicron/htlrb132l> > Acessado 30 dez,2022.

<sup>5</sup> Disponível em: < <https://www.raspberrypi.com/documentation/> > Acessado 30 dez,2022.

<sup>6</sup> Disponível em: < <https://docs.arduino.cc/hardware/nano/> > Acessado 30 dez,2022.

<sup>7</sup> Disponível em: < <https://circuitpython.org/board/teensy40/> > Acessado 30 dez,2022.

<sup>8</sup> Disponível em: < <https://devzone.nordicsemi.com/nordic/nordic-blog/b/blog/posts/optimizing-power-on-nrf52-designs> > Acessado 30 dez,2022.

<b>Faixa de Temperatura Operacional</b>	-20°C a +75°C	-20°C a 75°C	Não especificado	Não especificado	Não especificado
<b>Capacidades Sem Fio</b>	Bluetooth Low Energy 5.2, LoRa	Não integrado	Não integrado	Não integrado	BLE, Bluetooth 5
<b>Tamanho Físico</b>	13x13x1.08 mm	21x51 mm	18x45 mm	Varia por modelo	Varia por modelo

Fonte: autor

Os parâmetros para definição dos modelos de alimentadores de hardware de 3.3 (**Tabela 3**) e 5V (**Tabela 4**) foram idênticos ao utilizado para o medidor de energia, onde os modelos escolhidos foram o AMS1117-3.3 e HLK-PM01 que indicaram parâmetros compatíveis com o projeto e os modelos comprados indicaram faltar de informações pertinentes ou não se encaixam na necessidade proposta na pesquisa.

**Tabela 3** - Tabela de comparação entre os alimentadores de hardware de 3,3V.<sup>9,10</sup>

<b>Modelo</b>	<b>AMS1117-3.3</b>	<b>LM1117MPX-3.3/NOPB</b>
<b>Configuração de Saída</b>	Positiva	Positiva
<b>Tipo de Saída</b>	Fixa	Fixa
<b>Número de Reguladores</b>	1	1
<b>Tensão de Entrada Máxima</b>	15V	15V
<b>Tensão de Saída (Min/Fixa)</b>	3.3V	3.3V
<b>Tensão de Queda Máxima</b>	1.3V	1.2V @ 800mA
<b>Corrente de Saída</b>	1000mA	800mA

Fonte: autor

**Tabela 4** - Tabela de comparação entre os alimentadores de hardware de 5V.<sup>11,12,13</sup>

<b>Modelo</b>	<b>HLK-PM01</b>	<b>HLK-5M05</b>	<b>MeanWell IRM-05-5</b>
<b>Tensão de Entrada</b>	100-240V AC	90-245V AC	85-264V AC
<b>Frequência de Entrada</b>	50-60Hz	Não especificado	47-440Hz
<b>Tensão de Saída</b>	5V	5V	5V
<b>Corrente de Saída</b>	600mA	1A	1A

<sup>9</sup> Disponível em: < <https://forum.digikey.com/t/cross-reference-for-ams1117-3-3/4397> > Acessado 30 dez,2022.

<sup>10</sup> Disponível em: < <https://www.watelectronics.com/ams1117-ldo-regulator/>>. Acessado 30 dez,2022.

<sup>11</sup> Disponível em: < <https://components101.com/regulators/hlk-pm01-ac-dc-5v-power-module>> Acessado 30 dez,2022.

<sup>12</sup> Disponível em: < <https://www.electroniccomp.com/hlk-5m05-hi-link-5v-5w-ac-dc-power-supply-module>> Acessado 30 dez,2022.

<sup>13</sup> Disponível em: < <https://www.meanwell.com/Upload/PDF/IRM-05/IRM-05-SPEC.PDF>> Acessado 30 dez,2022.

Potência	3W	5W	5W
Corrente de Pico de Saída	1000mA	$\geq 1200\text{mA}$	1000mA
Corrente Máxima de Entrada	0.2A	$< 0.2\text{A}$	0.12A/115VAC   0.08A/230VAC
Eficiência	70%	$\geq 69\%$	71%
Proteções	Curto-circuito e sobrecorrente	Curto-circuito e sobrecorrente	Curto-circuito e sobrecorrente

Fonte: autor

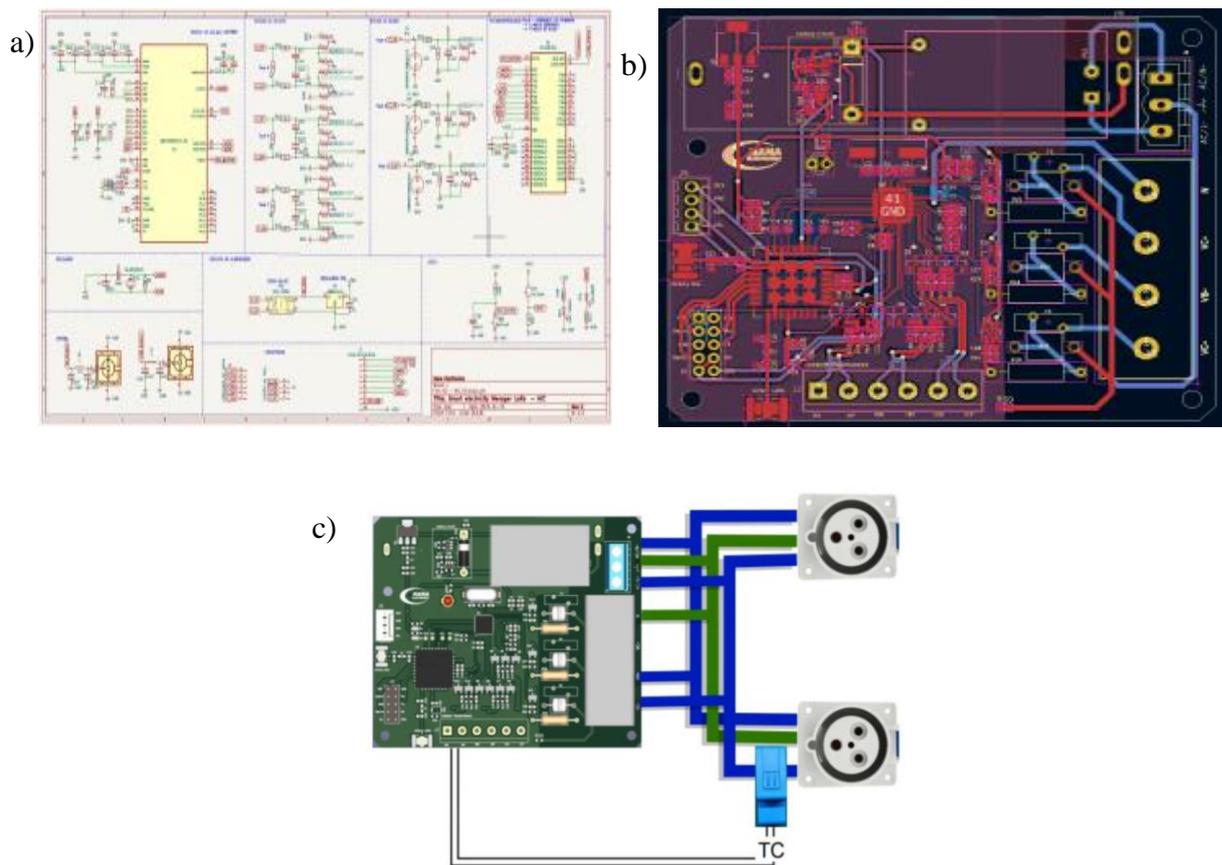
## 4.2 DESENVOLVIMENTO DO ESQUEMÁTICO E LAYOUT DO *HARDWARE* DO *ENDPOINT*.

O esquema elétrico é projetado em torno do microcontrolador HTLRBL32L e do chip ADE7880, com o objetivo de fornecer funcionalidades avançadas de monitoramento de energia e comunicação sem fio. O esquema incorpora medidas de proteção e estabilidade elétrica para garantir um desempenho confiável e seguro. O esquema elétrico está representado na **Figura 3a**.

A entrada de tensão é protegida por dispositivos de proteção contra surtos (GDTs) e termistores de coeficiente de temperatura positivo (PTCs). Os GDTs são usados para suprimir transientes de tensão e proteger o circuito contra picos indesejados de tensão. Os PTCs funcionam como fusíveis térmicos que ajudam a limitar a corrente em caso de sobrecarga ou curto-circuito.

O chip ADE7880 é responsável pelo monitoramento de energia e possui recursos avançados de medição como medição de corrente, tensão e potência. Ele se comunica com o microcontrolador HTLRBL32L por meio de interfaces de comunicação serial, como SPI ou I2C, para fornecer dados precisos e em tempo real sobre o consumo de energia. Layout da placa impressa está representada na **Figura 3b**.

A fonte de alimentação é fornecida por uma fonte HLK-PM01AC/DC, que converte a tensão da rede elétrica em uma tensão segura e estável para o circuito. Um regulador de tensão AMS1117 é utilizado para ajustar e fornecer a tensão de alimentação adequada ao microcontrolador e aos outros componentes do circuito, garantindo uma operação estável e segura.



**Figura 3** - Imagens do Esquema de ligação elétrica (a), Layout (b) e Esquema elétrico (c) da Placa de Circuito Impresso.

Fonte: autor

Para realizar a medição de corrente, o dispositivo é equipado com um transformador de corrente. Esse transformador permite que a corrente elétrica seja reduzida a um valor adequado para ser lido pelos circuitos de medição do dispositivo. Assim, ele é capaz de fornecer uma leitura precisa da corrente elétrica consumida tanto pela rede quanto pela máquina conectada. O esquema elétrico da placa de circuito impresso está representado na **Figura 3c**.

Quanto à medição de tensão, o dispositivo aproveita a mesma tensão que é conectada à máquina. Isso significa que a tensão medida pelo dispositivo é a mesma que está sendo fornecida para a operação da máquina. Essa abordagem garante uma medição direta e precisa da tensão elétrica envolvida no processo, sem a necessidade de qualquer transformação adicional.

Além das funcionalidades de medição, o dispositivo medidor de energia também pode fornecer informações adicionais, como potência ativa, potência reativa, fator de potência e energia total consumida. Essas informações são exibidas em um visor integrado ou podem ser

acessadas por meio de interfaces de comunicação, como portas USB ou conexões de rede, para facilitar o monitoramento e registro dos dados.

#### **4.3 DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE EMBARCADO NO *HARDWARE* DO *ENDPOINT*.**

Inicialmente, foi verificada a base de softwares e equipamentos a serem utilizados, realizando teste no software e suas bibliotecas. Com isso, foi selecionado o *software IDE Wise Studio* como ambiente de desenvolvimento de firmware para o *SiP HTLRBL32*, utilizando linguagem C. Se realizou a tentativa de utilização do *gateway WISE-3610*, porém foram constatei problemas de configuração e pouca documentação disponível. Após contato com o fabricante, foram destacadas algumas limitações de banda. Sendo assim, foi feita a aquisição do *gateway Dragino (Figura 4)* pois possui as funcionalidades necessárias.

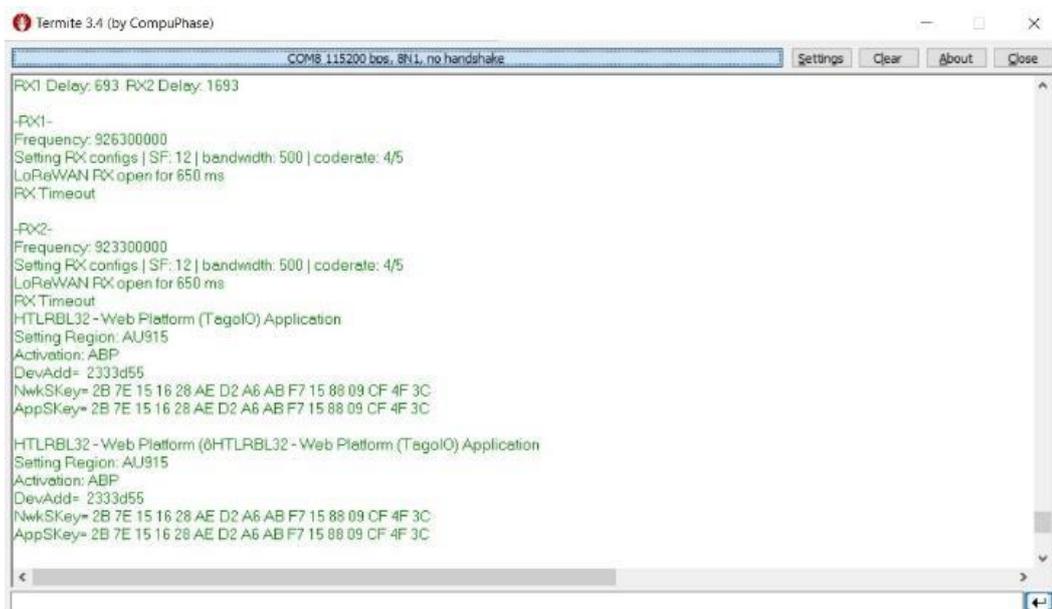


**Figura 4** - Gateway Dragino.

Fonte: autor

A fim de validar o correto funcionamento do *SiP HTLRBL32*, bem como, a correta configuração e comunicação *LoRaWAN* foi inicialmente utilizado um firmware básico de testes de *uplinks* configurado para comunicar com a rede pública *ProIoT (Figura 5)* onde podemos verificar os dados enviados pelo *SiP* chegando na plataforma (mostrado na **Figura 6**), enquanto também monitoramos mensagens de log na sua própria porta serial utilizando o *software Termite*, como mostrado na **Figura 7**.





**Figura 7** - Porta serial vista pelo Tera Term.

Fonte: autor

Com a comunicação validada, iniciou-se os esforços para o estabelecimento de uma rede *LoRaWAN* privada. O *gateway Dragino* possui vasta documentação com a qual foi possível fazer a configuração para o plano de frequência de AU915, que varia no espectro de 915MHz até 928MHz (SAMPAIO, 2020) e para nosso país está disponível de 902 a 907,5 MHz, 915 a 927,75 MHz e 927,75 a 928 MHz para vários serviços de telecomunicações segundo a resolução nº. 697 emitida em agosto de 2018 pela Anatel (OLIVEIRA; CONCEIÇÃO; NETO, 2018), a **Figura 8** mostra a configuração de frequência da sub-banda. Em seguida, foi utilizado o *firmware* básico de testes no *SiP* para enviar uplinks *LoRaWAN*, como mostrar a **Figura 9**, para obtenção das primeiras comunicações *LoRaWAN* em rede privada visualizando o tráfego de informações no próprio *gateway*, como indicar a **Figura 10**.

**LoRa Configuration**

Debug Level:

**Radio Settings**

Keep Alive Period (sec):

Frequency Plan:

Frequency Sub Band:

**Static GPS coordinates ?**

Enable Static GPS:

Latitude:

Longitude:

Altitude (m):

Current Mode: **LoRaWAN Semtec**

**Figura 8** - Configuração de frequência de sub-banda.

Fonte: autor

**LoRaWAN Configuration**

**General Settings**

Email:

Gateway EUI:

**Primary LoRaWAN Server**

Service Provider:

Server Address:

Uplink Port:

Downlink Port:

**Primary Packet Filter**

Fport Filter ?

DevAddr Filter ?

**Secondary LoRaWAN Server**

Service Provider:

**Secondary Packet Filter**

Fport Filter ?

DevAddr Filter ?

Current Mode: **LoRaWAN Semtech UDP**

**Figura 9** - Configurações Gateway.

Fonte: autor

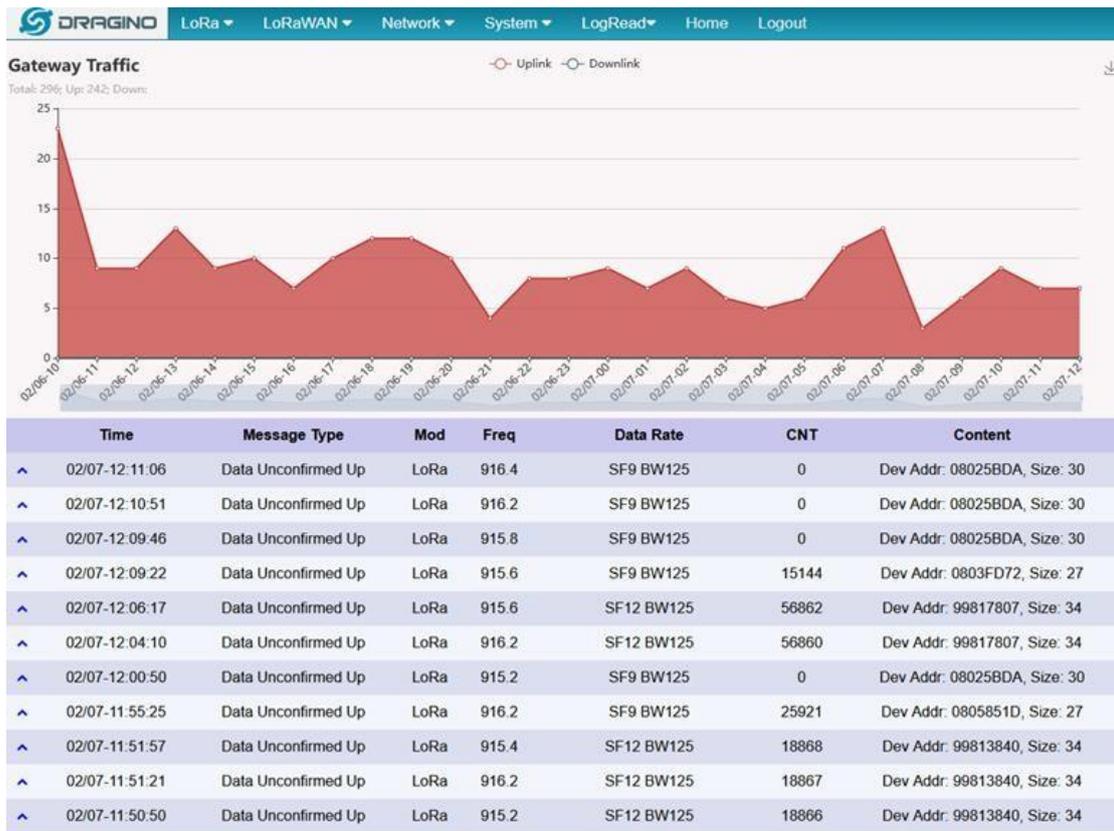


Figura 10 - Uplinks realizados.

Fonte: autor

Como base no resultado satisfatório do teste inicial realizado no *gateway*, se resolveu iniciar o desenvolvimento do *firmware* do projeto propriamente dito. Para tal, o *software Chirpstack*, ferramenta que fornece interface de usuário para gerenciar *gateways* e dispositivos (SANCHEZ-SUTIL; CANO-ORTEGA, 2023), foi utilizado como *local network server*. Como mostrar a **Figura 11**, e possível verificar que podemos ver os dados enviados pelo dispositivo e devidamente descryptografados pela stack *LoRaWAN*.

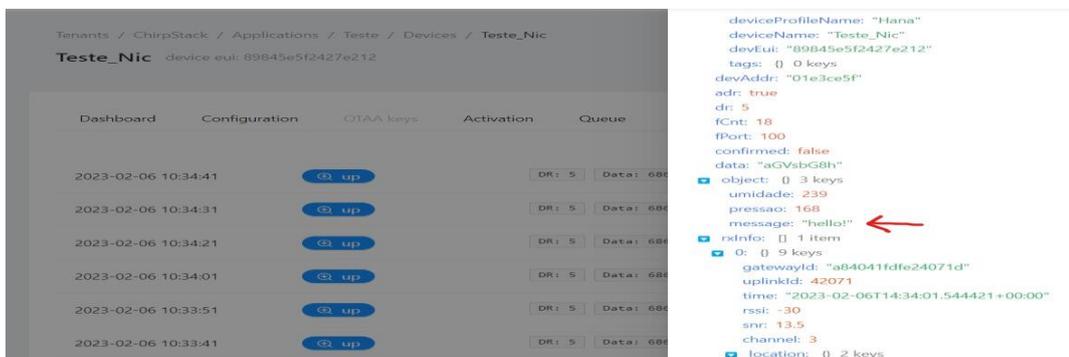


Figura 11 - Uplinks no Chirpstack.

Fonte: autor

Após validar a comunicação *LoRaWAN* e as funcionalidades do ADE, estruturou-se um payload (dados) categorizado em: elétricos, harmônicas de tensão e harmônicas de corrente (as **Figuras 12 e 13** indicam a estrutura dos *uplinks* e seu código de estrutura, respetivamente). Essa abordagem visa otimizar uplinks, reduzindo o tamanho do payload para melhorar a eficiência da comunicação, resultando em menor tempo de transmissão e menor taxa de falhas, os dados a serem transmitidos estão na **Figura 15**.

O passo subsequente consistiu na execução de estruturas, definições e funções no firmware, tudo fundamentado na estrutura previamente mencionada.

Grandezas Elétricas Principais		Hamônicas de Tensão		Harmônicas de Corrente	
Nome	Tamanho (bytes)	Nome	Tamanho (bytes)	Nome	Tamanho (bytes)
Header	3	Header	3	Header	3
Vrms	3	Vhf	3	lhf	3
Irms	3	Vh1	3	lh1	3
PF	2	Vh2	3	lh2	3
Energia	4	Vh3	3	lh3	3
		Vh4	3	lh4	3
		Vh5	3	lh5	3
		Vh6	3	lh6	3

**Figura 12** - Tabela com as estruturas de cada tipo de uplinks.

Fonte: autor

```

8  #ifndef INC_PAYLOADDATA_H_
9  #define INC_PAYLOADDATA_H_
10
11 #include "stdint.h"
12
13 #define SIZE_PAYLOAD_ELETRIC 16
14 #define SIZE_PAYLOAD_HARMONIC 25
15
16 #define TYPE_ELECTRIC 0
17 #define TYPE_HARMONIC 1
18
19 typedef struct payload_header
20 {
21     uint8_t phase_type_id;
22     uint8_t actvatedPhase_alarms;
23     uint8_t period[2];
24 }payloadHeader_t;
25
26 typedef struct headerData{
27     uint8_t phase;
28     uint8_t type;
29     uint8_t id;
30     uint8_t activatedPhase;
31     uint8_t alarms;
32     uint16_t period;
33 }headerData_t;
34
35 typedef union {
36     uint8_t vet[SIZE_PAYLOAD_ELETRIC];
37     struct
38     {
39         payloadHeader_t header;
40         uint8_t power_factor[2];
41         uint8_t vrms[3];
42         uint8_t irms[3];
43         uint8_t energy[4];
44     }data;
45 }payloadEletric_t;
46
47 #endif
48

```

**Figura 13** - Código da estrutura do payload de dados.

Fonte: autor

Grandeza	Descrição	Tamanho (bytes)
Vrms (V)	Valor de tensão RMS da fase	3
Irms (A)	Valor de corrente RMS da fase	3
PF	Fator de potência da fase	2
Energia	Consumo de energia desde o último envio até o atual	4
Vhf (V)	Valor de tensão RMS da harmônica fundamental da fase	3
Vh1 - Vh6 (V)	Valor de tensão RMS das 6 primeiras harmônicas	18
Ihf (A)	Valor de corrente RMS da harmônica fundamental da fase	3
Ih1 - Ih6 (A)	Valor de corrente RMS das 6 primeiras harmônicas	18

**Figura 14** - Tabelas com os dados a serem transmitidos por uplinks LoRaWAN.

Fonte: autor

Para validação do funcionamento do ADE, foi criado um código de depuração para o sensor ADE7880 (**Figura 15**), com a capacidade de verificá-lo através do monitor serial, sem a necessidade de comunicação *LoRaWAN* (**Figura 16**). Para a realização dessa atividade, criou-se uma variável de pré-compilação que, ao ser declarada, libera uma parte do código para que imprima os valores de tensão, corrente, fator de potência, energia e harmônicas (**Figura 17**).

```
*typedef enum
{
    ADE_OK      = 0x00,
    ADE_FAIL   = 0x01,
    ADE_BUSY   = 0x02,
    ADE_TIMEOUT = 0x03
}ade_err_t;

*typedef enum{
    phase_A = 0,
    phase_B,
    phase_C
}phase_t;

*typedef enum{
    Irms = 0,
    Vrms =1,
}rms_t;

ade_err_t ADE_SpiEnable(SPI_HandleTypeDef *hspi, GPIO_TypeDef* csGpioPort, uint16_t csGpioPin);
ade_err_t ADE_Init();
ade_err_t ADE_SPIchecksum();
ade_err_t ADE_readBuffer(uint8_t *buffer, uint16_t code, size_t size);
ade_err_t ADE_writeRegister(uint16_t reg, uint32_t data, uint8_t size);
ade_err_t ADE_getRMS(uint8_t *buffer, phase_t phase, rms_t rms);
ade_err_t ADE_selectHarmonicToRegister(uint8_t hx, uint8_t hy, uint8_t hz);
ade_err_t ADE_getHarmonics(uint8_t **list_values_buf, rms_t rms);
ade_err_t ADE_getHarmonicFundamental(uint8_t *value, rms_t rms);
ade_err_t ADE_getAccumulatedEnergy(uint8_t *buffer, phase_t phase);
```

**Figura 15** - Biblioteca ADE7880.

Fonte: autor

```

#if ADE_TEST_MODE > 0
case STATE_ADE_TEST:
    printf("\n\n");
    printf("-----phase %c ID=%d-----\n\n", (char)('A' + phase),
        list_pElectric[phase].header.phase_type_id & 0x0F);

    V = (float)ADE_CALIB_VRMS*HELPER_concatBytesToInt(list_pElectric[phase].vrms, 3);
    I = (float)ADE_CALIB_IRMS*HELPER_concatBytesToInt(list_pElectric[phase].irms, 3);
    pf = (float)ADE_CALIB_FF*HELPER_concatBytesToInt(list_pElectric[phase].power_factor, 2);
    E = (float)ADE_CALIB_ENERGY*HELPER_concatBytesToInt(list_pElectric[phase].energy, 4);

    HELPER_floatToString(V, str_buf);
    printf("Vrms = %s V\n", str_buf);

    HELPER_floatToString(I, str_buf);
    printf("Irms = %s A\n", str_buf);

    HELPER_floatToString(pf, str_buf);
    printf("PF = %s\n", str_buf);

    HELPER_floatToString(E, str_buf);
    printf("Energy = %s mWh\n", str_buf);

    for(int i = 0; i < nHarmonic; i++)
    {
        V = (float)ADE_CALIB_VRMS*HELPER_concatBytesToInt(
            list_pHarmonic_V[phase].list_harmonics[i], 3);

        HELPER_floatToString(V, str_buf);
        printf("harmonic_V[%d] = %s V\n", i+1, str_buf);
    }

    printf("\n");

    for(int i = 0; i < nHarmonic; i++)
    {
        I = (float)ADE_CALIB_IRMS*HELPER_concatBytesToInt(
            list_pHarmonic_I[phase].list_harmonics[i], 3);
        HELPER_floatToString(I, str_buf);
        printf("harmonic_I[%d] = %s A\n", i+1, str_buf);
    }

    printf("\n");

    state = STATE_SELECT_PHASE;
    break;
#endif

```

**Figura 16 - Código para teste do ADE.**

Fonte: autor

```

-----phase A ID=1-----

Vrms = 123.044 V
Irms = 0.000 A
PF = 0.000
Energy = 0.000 mWh

harmonic_V[1] = 123.039 V
harmonic_V[2] = 0.001 V
harmonic_V[3] = 1.003 V
harmonic_V[4] = 0.002 V
harmonic_V[5] = 0.087 V
harmonic_V[6] = 0.001 V
harmonic_V[7] = 0.088 V

harmonic_I[1] = 0.000 A
harmonic_I[2] = 0.000 A
harmonic_I[3] = 0.000 A
harmonic_I[4] = 0.000 A
harmonic_I[5] = 0.000 A
harmonic_I[6] = 0.000 A
harmonic_I[7] = 0.000 A

```

**Figura 17 - Saída do monitor serial durante o teste.**

Fonte: autor

Após a conclusão da validação do ADE, surgiu a necessidade de conceber uma abordagem configurativa para os parâmetros do Endpoint por meio da tecnologia *LoRaWAN*,

como mostrar a **Figura 18** e o desenvolvimento de um interpretador, que garantiria a conversão do *payload* (**Figura 19**). Este processo facultou a manipulação do período de transmissão de dados, a manipulação da quantidade de harmônicas e, notadamente, a definição do número de fases. Neste último aspecto, estabeleceu-se que o valor mínimo seria zero, enquanto o máximo seria fixado em três.

```

void downlinkApp(uint8_t *data, uint8_t size)
{
    log_i("downlink received\n");
    switch (data[0]) {
        case COMMAND_ACTIVATE_PHASE:
            activatedPhase[0] = !(data[1] & 0x01);
            activatedPhase[1] = !(data[1] & 0x02);
            activatedPhase[2] = !(data[1] & 0x04);

            log_d("phase_C: %d phase_B: %d phase_A: %d", activatedPhase[2], activatedPhase[1], activatedPhase[0] );
            break;
        case COMMAND_UPDATE_INTERVAL:
            if (data[2] < 1)
            {
                period = 1;
            }
            else
            {
                period = data[1];
            }

            TC_newTimer(TIMER_PERIOD, period*60000);

            break;
        case SET_TOTAL_HARMONIS:
            if (data[1] > 7)
            {
                nHarmonic = 7;
            }
            else
            {
                nHarmonic = data[1];
            }

            break;
        default:
            break;
    }

    state = STATE_SELECT_PHASE;
    nextStateSelectPhase = STATE_MEASURE_ELETRIC;
    subStateMeasureHarmonic = SUBSTATE_MEASURE_HARMONIC_INIT;
    subStateSendData = SUBSTATE_SEND_DATA_ELETRIC;
    nextStateTimer = 0;
    phase = phase_A;
    phase_count = phase_A;
    id = 0;
}

```

**Figura 18** - Configuração para os parâmetros de Endpoint via LoRaWAN.

Fonte: autor

```

static void LORA_RxData(loRa_AppData_t *AppData)
{
    switch (AppData->Port)
    {
        case 3:
            /*this port switches the class*/
            if (AppData->BuffSize == 1)
            {
                switch (AppData->Buff[0])
                {
                    case 0:
                    {
                        LORA_RequestClass(CLASS_A);
                        break;
                    }
                    case 1:
                    {
                        LORA_RequestClass(CLASS_B);
                        break;
                    }
                    case 2:
                    {
                        LORA_RequestClass(CLASS_C);
                        break;
                    }
                    default:
                        break;
                }
            }
            break;
        case LORAWAN_APP_PORT:
            downlinkInterpreter(AppData->Buff, AppData->BuffSize);
            break;
        case LPP_APP_PORT:
            log_d("LPP_PORT");
            break;
        default:
            break;
    }
}

```

**Figura 19** - Interpretador para conversão do payload.

Fonte: autor

Em sequência, o teste para validar a medição e aquisição de dados foi executado, o qual consistiu em ligar o *Endpoint* a uma tomada e realizar a leitura da tensão, enquanto a corrente seria testada posteriormente. Seguido por um teste da comunicação *LoRaWAN*, conectando o *Endpoint* ao *gateway* e confirmando que ambos estavam se comunicando corretamente. Por último, um teste para validar as funções criadas para a configuração do dispositivo foi realizado. Esse teste incluiu o envio de *downlinks* do *Chirpstack* e a recepção de *uplinks* do *Endpoint*. No entanto, surgiram dificuldades, e foi necessária a atualização do *SDK* (*Software Development Kit*, com tradução livre para kit de desenvolvimento de software) para que os *downlinks* funcionassem corretamente.

Com os testes de comunicação concluídos, era necessário realizar o teste de aquisição de corrente e calibrar o ADE com equipamentos apropriados. Utilizando a fonte de tensão e corrente PPS 400.3, foi possível analisar com precisão se os sensores estavam se comportando de maneira correta e precisa, permitindo que qualquer correção necessária fosse feita via *firmware*.

A **Figura 20** apresenta uma tabela de casos de teste foi criada para testar o endpoint do ponto de vista funcional. A partir de suas características, foram criados vários cenários para simular situações que podem se comuns em seu uso. Com base nos resultados obtidos dos casos de testes, algumas melhorias poderão ser acrescentadas ao do código fonte do *Endpoint*.

Teste - LoRa	Steps	Cenário	Resultados	Comportamento
Problemas encontrados (antes dos testes)	Duplicação de pacotes, sem causa aparente, por enquanto.			
Verificação de Intervalo	1. Mudar tempo de intervalo 2. Checar no ChirpStack se o intervalo estabelecido está sendo respeitado	Intervalo: 3 minuto Fases: A, B e C Harmônicas: 7	PASS	1min30s de envio e 1min30s para o próximo recebimento.
Verificação de Intervalo	1. Setar o tempo acima do máximo para 255 min 2. Observar comportamento	Intervalo: 3 minuto Fases: A e C; Harmônicas: 3		
Verificação de Intervalo	1. Setar o tempo abaixo do mínimo (1 min) 2. Observar comportamento	Intervalo: -1 Fases: A, B e C Harmônicas: 7	PASS	Valores abaixo de 1 são enviados como 1. Floats são enviados como inteiros.
Verificação das harmônicas	1. Mudar o número de harmônicas para um numero no intervalo de 1 a 7 2. Observar comportamento	Intervalo: 1 minuto Fases: A, B e C Harmônicas: 3	PASS	
Verificação das harmônicas	1. Setar o número de harmônicas para 0 2. Observar comportamento	Intervalo: 1 minuto Fases: A, B e C Harmônicas: 0	PASS	São enviados apenas os pacotes de medidas de energia (tensão, corrente, fator de potência).
Verificação das harmônicas	1. Setar o número de harmônicas para maior que 7 2. Observar comportamento	Intervalo: 1 minuto Fases: A, B e C Harmônicas: 10	PASS	Valores acima de 7 são enviados como 7.
Verificação das harmônicas	1. Setar o número de harmônicas para menor que 0 2. Observar comportamento	Intervalo: 1 minuto Fases: A, B e C Harmônicas: -10; -3; -200;	PASS	Valores abaixo de 0 são enviados como 0.
Verificação de fases	1. Setar fase A pra true e o resto pra false 2. Observar comportamento	Intervalo: 3 minutos Fases: A Harmônicas: 2	PASS	Apenas os dados da fase A são enviados.
Verificação de fases	1. Setar fase B pra true e o resto pra false 2. Observar comportamento	Intervalo: 3 minutos Fases: B Harmônicas: 2	PASS	Apenas os dados da fase B são enviados.
Verificação de fases	1. Setar fase C pra true e o resto pra false 2. Observar comportamento	Intervalo: 3 minutos Fases: C Harmônicas: 2	PASS	Apenas os dados da fase C são enviados.
Verificação de	1. Setar todas as fases pra true	Intervalo: 3 minutos Fases: A, B e C	PASS	

**Figura 20** - Tabela de casos de teste.

Fonte: autor

No decorrer do desenvolvimento de funcionalidades para o *Endpoint*, foi adicionada uma tela LCD ao *hardware* final (**Figura 21**). Foi necessário criar uma biblioteca para permitir a comunicação do *firmware* com a tela de LCD (**Figura 22**). Nesta tela são exibidas as informações coletadas pelos sensores, incluindo tensão, corrente e fator de potência para as fases A, B e C.



**Figura 21** - Tela de LCD do *Endpoint*.

Fonte: autor

```
1 #include "main.h"
2
3 #define LCD_SETGRAMADDR 0x40
4
5 void lcd_init (I2C_HandleTypeDef * i2c, uint16_t address, uint8_t rows, uint8_t cols);
6
7 void lcd_send_cmd (char cmd); // send command to the lcd
8
9 void lcd_send_data (char data); // send data to the lcd
10
11 void lcd_send_string (char *str); // send string to the lcd
12
13 void lcd_put_cur(int row, int col); // put cursor at the entered position row (0 or 1), col (0-15);
14
15 void lcd_clear (void);
16
17 void lcd_create_char(uint8_t id, uint8_t charMap[8]);
18
```

**Figura 22** - Biblioteca para utilização da tela LCD.

Fonte: autor

```

a)
pf = (double)(pfi)*ADE_CALIB_FF;

signal = -1;
if(pf <= 0)
{
    signal = 1;
    pf = -pf;
}

angle = signal*acos(pf) + 0.08726646;

signal = 1;

if(angle > 0)
{
    signal = -1;
}

pfc = signal*cos(angle);

pfc = HELPER_round(pfc*100);
pfc = pfc/100;
HELPER_doubleToString(pfc, str_pf);

b)
function ElectricCase() {
    var pfsignal = -1;
    var angle = 0;
    if (hexArray.length != 15) {
        payloadData = {
            error: "unidentified payload"
        }
    }
    else {
        Vrms = ((hexArray[3] << 16) + (hexArray[4] << 8) + hexArray[5]) * Vmax / Vref;
        Irms = ((hexArray[6] << 16) + (hexArray[7] << 8) + hexArray[8]) * Imax / Iref;
        PF = (((hexArray[9] & 0x7F) << 8) + hexArray[10]) / FPref;
        energy = ((hexArray[11] << 24) + (hexArray[12] << 16) + (hexArray[13] << 8) + hexArray[14]) * EnergyRef;

        if ((hexArray[9] & 0x80) != 0) {
            pfsignal = 1;
        }

        angle = signal * Math.acos(PF) + 0.08726646;
        signal = 1;

        if (angle > 0) {
            signal = -1;
        }

        PF = signal * console.log(angle);

        payloadData = {
            header: header,
            Vrms: Vrms.toFixed(2),
            Irms: Irms.toFixed(2),
            PF: PF.toFixed(2),
            energy: energy.toFixed(2)
        }
    }
}

```

**Figura 23** - Telas de ajustes para fator de potência (a) e adição dos codec no Chirpstack (b).

Fonte: autor

Posteriormente, foi necessário ajustar o fator de potência via **firmware**. Para isso, foi criado um código para realizar essa correção (**Figura 23a**). Essa correção também foi adicionada ao codec utilizado no *Chirpstack* (**Figura 23b**).

```

err_configs_t NIC_CONFIGS_read(NIC_config_t *configs)
{
    uint32_t address = FLASH_USER_START_ADDR;
    FLASH_PageProtectionTypeDef pageProtectionStruct = {0};
    uint32_t seq0_offset = ((uint32_t)FLASH_USER_START_ADDR << 0x5) & 0xFF00;
    uint32_t seq0_size = (uint32_t)NIC_NUMBER_OF_PAGES & 0x00FF;

    pageProtectionStruct.pageProt_0 = seq0_offset | seq0_size;
    pageProtectionStruct.state = DISABLE;

    uint32_t data32 = (*(__IO uint32_t *)address);

    configs->haveSavedConfigs = (data32 >> 24)&0xFF;
    configs->interval = (data32 >> 16)&0xFF;
    configs->numberOfHarmonics = (data32 >> 8)&0xFF;
    configs->activatedPhase = data32&0xFF;

    pageProtectionStruct.pageProt_0 = seq0_offset | seq0_size;
    pageProtectionStruct.state = ENABLE;

    return NIC_CONFIGS_OK;
}

```

**Figura 24** - Código para gravação de dados na memória flash do Endpoint.

Fonte: autor

Com a correção finalizada e aplicada, prossegue-se com o desenvolvimento da funcionalidade de gravação de dados na memória flash do endpoint. A biblioteca criada para isso se chama *NIC\_configs* (**Figura 24**) e os dados são as configurações do dispositivo a serem enviadas via downlink (**Figura 25**).

```

#ifndef INC_NIC_CONFIGS_H
#define INC_NIC_CONFIGS_H

#include "stdint.h"

#define NIC_CONFIGS_OK 0
#define NIC_CONFIGS_ERROR 1

#define FLASH_USER_START_ADDR (FLASH_END_ADDR - FLASH_PAGE_SIZE + 1)
#define FLASH_USER_END_ADDR (FLASH_END_ADDR + 1)

#define NIC_FLASH_PAGE 127
#define NIC_NUMBER_OF_PAGES 1

#define NIC_HAVE_SAVED_CONFIGS 0xA2

typedef uint32_t err_configs_t;

typedef union {
    uint8_t vet[3];
    struct{
        uint8_t haveSavedConfigs;
        uint8_t interval;
        uint8_t actvatedPhase;
        uint8_t numberOfHarmonics;
    };
}NIC_config_t;

err_configs_t NIC_CONFIGS_save(NIC_config_t *configs);
err_configs_t NIC_CONFIGS_read(NIC_config_t *configs);

#endif /* INC_NIC_CONFIGS_H */

```

**Figura 25** - Biblioteca para gravação de dados na memória flash do Endpoint.

Fonte: autor

Prosseguindo com o fluxo de desenvolvimento, foi necessária uma refatoração adicional no codec, para que ele possa tratar energia negativa, ajustes foram feitos via *firmware* (**Figura 26**). Com todas as funcionalidades desenvolvidas e testadas, concluímos o ciclo de desenvolvimento o *firmware*.

```

//no load config
if((status = ADE_writeRegister(APNOLOAD, 0xCFC0,2)) != ADE_OK)
{
    log_e("error, write register");
    return status;
}
HAL_Delay(5);

//phase A correction
if((status = ADE_writeRegister(APHCAL, 0x00ED,2)) != ADE_OK)
{
    log_e("error, write register");
    return status;
}
HAL_Delay(5);

//phase B correction
if((status = ADE_writeRegister(BPHCAL, 0x00ED,2)) != ADE_OK)
{
    log_e("error, write register");
    return status;
}
HAL_Delay(5);

//phase C correction
if((status = ADE_writeRegister(CPHCAL, 0x00ED,2)) != ADE_OK)
{
    log_e("error, write register");
    return status;
}
HAL_Delay(5);
return ADE_OK;

```

**Figura 26** - Refatoração adicional no codec.

Fonte: autor

Após o processo de desenvolvimento, para melhor compreensão da máquina de estado implementada no *firmware*. Temos como principais estados o SELECT\_PHASE, o SEND\_DATA\_SUBMACHINE e o MEASURE\_HARMONIC\_SUBMACHINE (Figura 27).

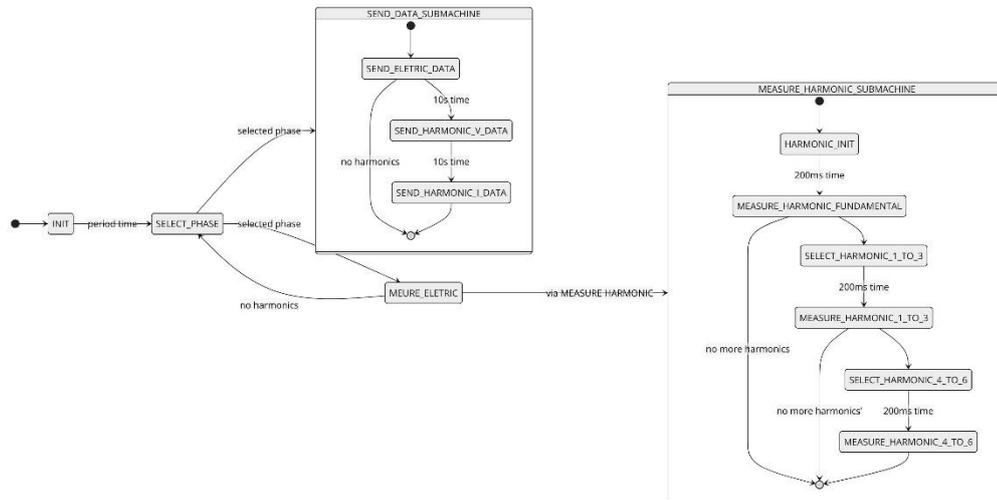
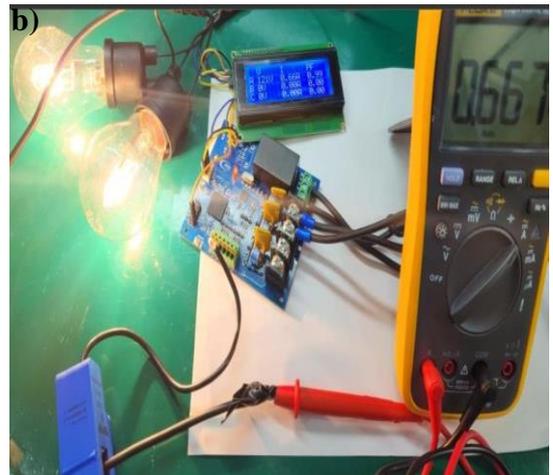
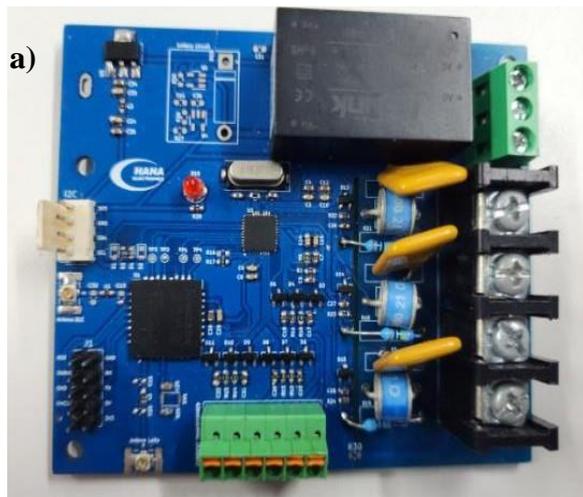


Figura 27 – Máquina de estado.

Fonte: autor

Por fim, foi realizado a montagem e os testes de bancadas na versão final do *hardware* do projeto (Figura 28 a). Os testes consistiram em verificar todas as funcionalidades da placa. Nas medições de tensão monofásica, aplicamos 121 VAC nas conexões, verificando que os valores no display coincidiam exatamente com os medidos pelo multímetro. Todas as entradas de fases foram testadas, confirmando a consistência do dispositivo. No teste de medição de corrente com duas lâmpadas em paralelo, tanto o equipamento em teste quanto o multímetro exibiram o mesmo valor de 0,66, validando a precisão da medição (como mostrar a Figura 28 b). O *display* foi essencial para validar os valores de corrente, tensão e fator de potência de cada fase. A bateria Li-ion 18650 3.7V suportou o circuito, mas a alimentação do display (funcionando em 5V) exigiu o conversor *STEP-UP MT3608* da alimentação da bateria. Uma solução seria optar por um display LCD de 3.3V para simplificar a integração. Os testes de conexão *LoRa* validaram o envio dos payloads, confirmando o funcionamento do circuito RF da placa.



**Figura 28** - Testes de bancada (a) e validação dos testes de precisão (b).

Fonte: autor

## 5 CONCLUSÃO

O hardware desenvolvido teve como foco a captura precisa dos valores energéticos de máquinas industriais, incluindo tensão de alimentação e consumo de corrente. Durante a pesquisa, foram cuidadosamente selecionados os principais componentes, considerando tanto o baixo consumo de energia quanto o baixo custo. Essas escolhas foram fundamentais, pois formam a base do sistema, e o desenvolvimento do hardware é construído em torno delas. As especificações do hardware incluíram capacidade de adquirir corrente, adaptar-se a diferentes máquinas, enviar informações por LoRaWAN e incorporar um circuito de proteção contra picos de energia. Com base nessas escolhas e pesquisas, os componentes principais foram escolhidos e um diagrama de blocos do circuito foi montado, estabelecendo uma sólida fundação para o desenvolvimento do hardware.

O teste de validação do software transcorreu de acordo com o planejado, validando a funcionalidade esperada do dispositivo. Dentre os principais marcos alcançados durante o desenvolvimento, destacam-se: Interpretador de Downlinks via LoRaWAN, que possibilitou um interpretador robusto para processar downlinks eficientemente; Teste de Comunicação LoRaWAN bem-sucedida, evidenciando a eficácia do dispositivo nesse contexto. O firmware foi ajustado para ser compatível com o codec, proporcionando tratamento adequado da energia negativa lida pelo ADE7880. Essas etapas cumulativas representam um progresso significativo no desenvolvimento do dispositivo, garantindo sua funcionalidade, precisão e adaptabilidade a futuras melhorias e atualizações

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABATE, F. et al. A low cost smart power meter for IoT. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 136, p. 59–66, 2019.

BARMAN, B. K. et al. Energy Utilization in Smart Grid. **2018 2nd International Conference on Power, Energy and Environment: Towards Smart Technology (ICEPE)**, p. 2–4, 2018.

BARUAH, A.; BORAH, P. R.; CHATTERJEE, DI. Low-Cost Power Monitoring System. **2019 2nd International Conference on Power Energy Environment and Intelligent Control, PEEIC 2019**, p. 318–321, 2019.

CANO-ORTEGA, A.; SÁNCHEZ-SUTIL, F. Monitoring of the efficiency and conditions of induction motor operations by smart meter prototype based on a LoRa wireless network. **Electronics (Switzerland)**, v. 8, n. 9, 2019.

CHOURUANG, K.; MEEKUL, K. Design of an IoT Energy Monitoring System. **International Conference on ICT and Knowledge Engineering**, v. 2018- November, p. 48–51, 2019.

EPE; MME. Balanço energético nacional 2023: Ano base 2022. p. 275, 2023.

FINN, P.; FITZPATRICK, C. Demand side management of industrial electricity consumption: Promoting the use of renewable energy through real-time pricing. **Applied Energy**, v. 113, n. 2014, p. 11–21, 2014.

HAXHIBEQIRI, J. et al. LoRa indoor coverage and performance in an industrial environment: Case study | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. 2017.

HAXHIBEQIRI, J. et al. A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application. **Sensors (Switzerland)**, v. 18, n. 11, 2018.

HLAING, W. et al. **Implementation of WiFi-based single phase smart meter for Internet of Things (IoT)**. 2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON). **Anais...IEEE**, mar. 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8075793/>>

HOGLUND, J. et al. Using a 6LoWPAN smart meter mesh network for event-driven monitoring of power quality. **2012 IEEE 3rd International Conference on Smart Grid Communications, SmartGridComm 2012**, p. 448–453, 2012.

LAMPRET, M. et al. Industrial energy-flow management. **Applied Energy**, v. 84, n. 7–8, p. 781–794, 2007.

LENTZ, J. et al. Industrial monitoring and troubleshooting based on lora communication technology. **Proceedings: IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, v. 1, p. 3852–3857, 2018.

MAY, G. et al. Energy management in production: A novel method to develop key performance indicators for improving energy efficiency. **Applied Energy**, v. 149, n. 2015, p. 46–61, 2015.

MEDEIROS, E. L. et al. A low cost power quality meter over the internet. **Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP**, v. 2016-December, p. 986–991, 2016.

MURDYANTORO, E. et al. A review of LoRa technology and its potential use for rural development in Indonesia. **AIP Conference Proceedings**, v. 2094, n. April, 2019.

OLIVEIRA, L. R. DE; CONCEIÇÃO, A. F. DA; NETO, L. P. S. Revisao sistemática da literatura sobre aplicações das tecnologias LoRa e LoRaWAN. **Anais Estendidos do VIII ...**, 2018.

PEDÓ, A. **Sistema de monitoramento Lora aplicado em um aviário do tipo Dark House**. [s.l.] Universidade do Vale do Taquari, 2020.

SAMPAIO, R. D. **SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA: METOLOGIA E DIMENSIONAMENTO PARA UMA PLANTA ELÉTRICA INDUSTRIA**. [s.l.] Universidade Federal do Amazonas, 2020.

SANCHEZ-SUTIL, F.; CANO-ORTEGA, A. Development and implementation of a PQ analyser to monitoring public lighting installations with a LoRa wireless system. **Internet of Things (Netherlands)**, v. 22, n. February, p. 100711, 2023.

SÁNCHEZ SUTIL, F.; CANO-ORTEGA, A. Smart public lighting control and measurement

system using lora network. **Electronics (Switzerland)**, v. 9, n. 1, 2020.

SINHA, R. S.; WEI, Y.; HWANG, S. H. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. **ICT Express**, v. 3, n. 1, p. 14–21, 2017.

SWORDS, B.; COYLE, E.; NORTON, B. An enterprise energy-information system. **Applied Energy**, v. 85, n. 1, p. 61–69, 2008.

TESSARO, L. et al. LoRa Performance in Short Range Industrial Applications. **SPEEDAM 2018 - Proceedings: International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion**, p. 1089–1094, 2018a.

TESSARO, L. et al. Lightweight Synchronization Algorithm with Self-Calibration for Industrial LORA Sensor Networks. **2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2018 - Proceedings**, p. 259–263, 2018b.

THONGKHAO, Y.; PORA, W. A low-cost Wi-Fi smart plug with on-off and Energy Metering functions. **2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2016**, 2016.

WEI, M.; HONG, S. H.; ALAM, M. An IoT-based energy-management platform for industrial facilities. **Applied Energy**, v. 164, p. 607–619, 2016.