



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO
MESTRADO ACADÊMICO EM SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO

DANILLO FERNANDES DO NASCIMENTO

SISTEMA DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ÓPTICA LORAWAN

SOBRAL

2024

DANILLO FERNANDES DO NASCIMENTO

SISTEMA DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ÓPTICA LORAWAN

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Sistemas de Comunicação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação do Centro de Engenharia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica e de Computação. Área de Concentração: Sistemas de Informação.

Orientador: Prof. Dr. José Cláudio do Nascimento.

SOBRAL

2024

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)

N194s Nascimento, Danilo Fernandes do.
SISTEMA DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ÓPTICA LORAWAN / Danilo Fernandes do Nascimento. –
2024.
82 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e de Computação, Sobral, 2024.
Orientação: Prof. Dr. José Cláudio do Nascimento.

1. Medidor de potência óptica. 2. Internet das Coisas. 3. Fibra Óptica. 4. Optical Power Meter. 5. Lora. I.
Título.

CDD 621.3

DANILLO FERNANDES DO NASCIMENTO

SISTEMA DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ÓPTICA LORAWAN

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Sistemas de Comunicação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação do Centro de Engenharia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica e de Computação. Área de Concentração: Sistemas de Informação.

Aprovada em: 26/01/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Cláudio do Nascimento (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Edilson Mineiro Sá Júnior
(Membro interno - PPGEEC)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Francisco Leonardo Bezerra Martins
(Membro externo - Pós-doc CAPES)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

À Deus, por sempre estar ouvindo minhas orações.

Aos meus pais, por serem uma fonte de inspiração.

A minha esposa Ana Eliselma Furtado Silva, que sempre ajudou nos momentos mais difíceis de minha vida.

Ao Prof. Dr. José Cláudio do Nascimento pela excelente orientação.

Aos professores do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação (PPGEEC) da Universidade Federal do Ceará, pela contribuição em minha formação profissional.

Aos professores participantes da banca examinadora Edilson Mineiro Sá Júnior e Francisco Leonardo Bezerra Martins pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos servidores da Universidade Federal do Ceará, pelo excelente trabalho desenvolvido.

A todos os amigos e colegas de curso, que contribuíram no meu crescimento pessoal e profissional.

Aos colegas da turma de mestrado Acélio Luna, Lucivando Ribeiro, Rhuan Nunes, Ítalo Rossi pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Sobral, por conceder o Laboratório de eletrônica e sistemas embarcados para a confecção das placas de circuito impresso.

Ao engenheiro e mestre Alan Araújo, agradeço por todo o investimento e tempo. Foi graças à sua ideia inicial que consegui dar os primeiros passos na elaboração de meu dispositivo.

Ao Instituto Cearense de Tecnologia, Empreendedorismo e Liderança (ICETEL) por disponibilizar os equipamentos necessários para a realização dos experimentos.

RESUMO

Segundo a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), em relatório divulgado em 2022, detalha que cerca de 63% das conexões de banda larga fixa utilizavam redes de fibra óptica para conexão. Esse relatório, demonstra a constante expansão das redes de fibra ópticas no Brasil. A alta demanda por redes ópticas, fazem com que as empresas provedoras de internet enfrentem desafios para entregar um serviço de qualidade e que promova uma experiência positiva aos clientes. Diante disso, as empresas do ramo vêm buscando soluções com a finalidade de solucionar problemas na conexão das redes ópticas. Existem técnicas e ferramentas que possibilitam aos provedores acompanhar a conexão da rede, realizar testes de velocidade, promover atendimento ao cliente e realizar manutenções preventivas. Uma dessas ferramentas é o Optical Power Meter (OPM - Medidor de Potência Óptica), dispositivo capaz de realizar medições ópticas em redes de fibra ópticas. Este trabalho desenvolve um sistema de medição de potência óptica para redes passivas de fibra óptica. Ele é composto por um dispositivo responsável por medir a potência da fibra óptica, e um gateway que envia os dados de potências para um servidor. Através de testes em laboratório, o sistema mostrou ser capaz de medir uma faixa de potência de -42,87 dBm e 5,42 dBm. A comunicação entre dispositivo e gateway é feita utilizando o protocolo de comunicação LoRaWAN, fazendo o sistema se integrar a Internet of Things (IoT - Internet das Coisas).

Palavras-chave: Fibra Óptica; Optical Power Meter; Medidor de potência óptica; Internet das coisas; LoRaWAN.

ABSTRACT

According to the National Telecommunications Agency (ANATEL), in a report released in 2022, it detailed that around 63% of fixed broadband connections used fiber optic networks for connection. This report demonstrates the constant expansion of fiber optic networks in Brazil. The high demand for optical networks means that internet providers face challenges in delivering a quality service that promotes a positive customer experience. As a result, companies in the sector have been looking for solutions to solve problems in connecting optical networks. There are techniques and tools that enable providers to monitor the network connection, carry out speed tests, promote customer service and carry out preventive maintenance. One of these tools is the Optical Power Meter (OPM), a device capable of measuring optics in fiber optic networks. This work develops an optical power measurement system for passive fiber optic networks. It consists of a device responsible for measuring the power of the optical fiber, and a gateway that sends the power data to a server. Through laboratory tests, the system proved capable of measuring a power range of -42.87 dBm and 5.42 dBm. Communication between the device and the gateway is carried out using the LoRaWAN communication protocol, making the system integrated with the Internet of Things (IoT).

Keywords: Fiber Optics; Optical Power Meter; Internet of Things; LoRaWAN.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Topologia Arquitetura PON.	20
Figura 2 – Splitter Balanceado 1:2.	21
Figura 3 – Splitter Desbalanceado 1:2.	21
Figura 4 – Cascadeamento de splitters de Nível 2.	22
Figura 5 – Fotodiodo p-i-n: Vista em corte transversal(a); vista superior (b) e símbolo do circuito (c).	23
Figura 6 – Circuito amplificador de transimpedância.	24
Figura 7 – Visão geral do Sistema de Medição Óptico.	27
Figura 8 – Topologia Adotada.	27
Figura 9 – Utilizando o splitter 1/99 desbalanceado para captar 1% do sinal da fibra.	28
Figura 10 – Valores de potências da <i>OLT</i> e splitter considerados na simulação.	29
Figura 11 – Atenuação do sinal com cascadeamento de splitters.	29
Figura 12 – Amplificador de transimpedância.	30
Figura 13 – Equação da resistência de feedback 1.	33
Figura 14 – Equação da resistência de feedback 2.	34
Figura 15 – Equação da resistência de feedback 3.	35
Figura 16 – Fluxograma: Lógica da programação utilizada no dispositivo de medição.	37
Figura 17 – Circuito eletrônico do fotodiodo com interferências parasitas.	38
Figura 18 – Corrente <i>i</i> PD1 fotogerada em simulação.	39
Figura 19 – Circuito eletrônico do amplificador de transimpedância no modo detector fotovoltaico (a) e o utilizado na patente do <i>OPM</i> (b).	40
Figura 20 – Amplificador de transimpedância simulado no software PSIM.	40
Figura 21 – Valores de tensão obtidos com uma resistência de 275 k Ω	41
Figura 22 – Fotodiodo p-i-n InGaAs com adaptador para conector óptico SC.	43
Figura 23 – MCP601 fixado na placa de cobre: Frente (a) e verso (b).	43
Figura 24 – Testes de bancada.	44
Figura 25 – Reguladores de tensão: 5 volts e 3,3 volts.	45
Figura 26 – Circuito eletrônico Arduíno Nano, conversor bidirecional e módulo LoRa RF1276.	46
Figura 27 – Circuito eletrônico do amplificador de transimpedância com o CI 4066.	47
Figura 28 – Placa do protótipo final.	47

Figura 29 – Circuito eletrônico do ESP LoRa, Arduino, conversor bidirecional e módulo LoRa.	48
Figura 30 – Hardware do gateway.	49
Figura 31 – Exemplo de verificação de potência utilizando o gateway.	49
Figura 32 – Adaptação de um splitter 1/99.	52
Figura 33 – Atenuação do sinal utilizando cascadeamento de splitters.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes utilizados	26
Tabela 2 – Softwares utilizados	27
Tabela 3 – Valores obtidos na simulação.	32
Tabela 4 – Especificações do amp-op MCP601	41
Tabela 5 – Valores de tensão simulados a partir das resistências de feedback.	42
Tabela 6 – Valores de Potência e Tensão do protótipo 1	44
Tabela 7 – Valores obtidos com o dispositivo final e o OPM	53
Tabela 8 – Potência enviada pelo protótipo final ao gateway.	55
Tabela 9 – Comparação das medições do dispositivo e do OPM.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>EPON</i>	<i>Ethernet Passive Optical Network</i>
<i>GPON</i>	<i>Gigabyte Passive Optical Network</i>
<i>IoT</i>	<i>Internet Of Things/ Internet das Coisas</i>
<i>LPWAN</i>	<i>Low-Power Wide-Area Network/Rede de Longo Alcance e Baixa Potência</i>
<i>NIR</i>	<i>Near Infrared/Infravermelho Próximo</i>
<i>OLT</i>	<i>Optical Line Terminal/ Terminal de Linha Óptica</i>
<i>ONU</i>	<i>Optical Network Unit/Unidade de Rede Óptica</i>
<i>OPM</i>	<i>Optical Power Meter/ Medidor de Potência Óptica</i>
<i>OTDR</i>	<i>Optical Time Domain Reflectometer/ Reflectômetro Óptico no Domínio do Tempo</i>
<i>PON</i>	<i>Passive Optical Network/Redes Ópticas Passivas</i>
<i>PWM</i>	Pulse Width Modulation
<i>RF</i>	Resistências de Feedback
<i>SMD</i>	<i>Surface Mounted Device / Componente Montado em Superfície</i>
<i>Vout</i>	Tensão de saída
amp-op	Amplificador Operacional
CEO	Caixa de Emenda Óptica
CTO	Caixa de Terminação Óptica
dB	decibéis
dBm	decibéis-miliwatts
DIO	Distribuidor Interno Óptico
TICs	Tecnologias da Informação e Comunicação

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>a</i>	Constante
<i>As</i>	Arsênio
<i>b</i>	Constante
<i>C</i>	Capacitância
<i>dB</i>	Decibéis
<i>dBm</i>	Decibéis-miliwatts
<i>e</i>	Número de Euler
<i>Ga</i>	Gálio
<i>G</i>	Giga
<i>iPD</i>	Corrente gerada no fotodiodo
<i>In</i>	Índio
<i>ip</i>	Corrente fotogerada
<i>k</i>	Kilo
<i>kΩ</i>	Kilo-Ohm
<i>M</i>	Mega
<i>MΩ</i>	Mega-Ohm
<i>mm</i>	Milimetro
<i>nF</i>	Nano Faraday
<i>nH</i>	Nano-Henry
<i>nm</i>	Nanometro
Ω	Ohm
<i>P</i>	Potência óptica (W)
<i>Pdbm</i>	Potência da fibra óptica em decibéis-miliwatts
<i>pF</i>	Pico Faraday
<i>Res</i>	Responsividade do fotodetector (A/W)
<i>RF</i>	Resistência de feedback

S	Chave
μF	Micro Faraday
V	Tensão
V_{out}	Tensão de saída
y	Tensão de saída
x	Potência da fibra óptica recebida pelo fotodiodo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos Geral e Específicos	16
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>16</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>16</i>
1.2	Contribuição científica	17
1.3	Estrutura da Dissertação	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Fibra Óptica	18
<i>2.1.1</i>	<i>Topologia da Arquitetura PON</i>	<i>19</i>
2.2	Splitter	20
<i>2.2.1</i>	<i>Splitters Balanceados e Desbalanceados</i>	<i>20</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Cascadeamento de Splitters</i>	<i>22</i>
<i>2.2.2.1</i>	<i>Perdas de Potência</i>	<i>22</i>
2.3	Fotodiodo	23
2.4	Amplificador de transimpedância	24
2.5	Internet of Things e protocolo LoRaWAN	25
3	SISTEMA DE MEDIÇÃO ÓPTICO	26
3.1	Materiais e Softwares	26
3.2	Configurações da Topologia	27
3.3	Fotodiodo p-i-n InGaAs e circuito amplificador	30
<i>3.3.1</i>	<i>Resistências de feedback</i>	<i>31</i>
<i>3.3.1.1</i>	<i>Métodos Matemáticos</i>	<i>32</i>
<i>3.3.1.2</i>	<i>Resistência de Feedback 1</i>	<i>33</i>
<i>3.3.1.3</i>	<i>Resistência de Feedback 2</i>	<i>34</i>
<i>3.3.1.4</i>	<i>Resistência de Feedback 3</i>	<i>35</i>
3.4	Microcontrolador	36
3.5	Montagem do Protótipo	38
<i>3.5.1</i>	<i>Simulação</i>	<i>38</i>
<i>3.5.2</i>	<i>Testes em laboratório</i>	<i>42</i>
<i>3.5.3</i>	<i>Circuito eletrônico e métodos de construção</i>	<i>45</i>

3.5.4	<i>Gateway</i>	48
4	RESULTADOS	51
4.1	Montagem da Bancada para Testes	51
4.2	Configurações no Protótipo Final	52
4.3	Validação do dispositivo	54
5	CONCLUSÕES	57
5.1	Trabalhos Futuros	58
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICES	62
	APÊNDICE A – Circuito Eletrônico do Dispositivo	62
	APÊNDICE B – Circuito Eletrônico do Gateway	63
	APÊNDICE C – Algoritmos utilizados no projeto	64

1 INTRODUÇÃO

Em meio à era das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs), onde os sistemas de comunicação tornaram-se cada vez mais cruciais para a sociedade, a busca por sistemas eficientes e sustentáveis tem sido tema de inúmeras pesquisas, visando aprimorar essa ferramenta. Isso ocorre devido à crescente demanda do mercado de redes ópticas por sistemas com alta velocidade na conectividade e baixas taxas de falhas. Diante desse contexto, uma importante ferramenta para os sistemas de comunicação são as redes ópticas, as quais utilizam sinais de luz para a transmissão de informações por meio de sinais.

Segundo Keiser (2003) os primeiros sinais ópticos são datados do início da década de 1960, com a invenção do *laser*. A partir de experimentos utilizando o *laser* foi possível verificar a sua capacidade em transmitir sinais e informações a partir de feixes de luz. No entanto, ainda em meio aos experimentos, foi possível verificar que existiam desvantagens em utilizá-lo. Isso se deve ao fato que na época as fibras revestidas a vidro tinham uma atenuação de 1 decibéis (dB)/m, onde por exemplo, apenas 1% da potência ótica inserida saíria da extremidade de uma fibra de vinte metros de comprimento. Antes disso, em 1930, o médico Heinrich Lamm fez testes e experimentos a fim de realizar a transmissão de imagens a partir de feixes luminosos conduzidos por fibras ópticas, os testes não avançaram em decorrência das tecnologias existentes da época não possibilitarem a transmissão (Keiser, 2003).

Com os avanços tecnológicos e os altos investimentos em pesquisa, no ano de 1966, os físicos Charles K. Kao e George Hockham publicaram um artigo descrevendo a possibilidade de fibras ópticas transmitirem sinais de alta capacidade em sistemas de comunicação (Kao e Hockham, 1966). Já em meados da década 1970, com esforços de Kao e Hockham, foi fabricada a primeira fibra óptica. A partir desta descoberta surgiram inúmeras tecnologias relacionadas às fibras ópticas. Após a sua fabricação, o foco das pesquisas concentraram-se em melhorias na performance e desempenho das redes ópticas (Agrell *et al.*, 2016). Foi possível, então, constatar a elevada capacidade dessas redes na transmissão de sinais, bem como a melhoria na qualidade do sinal. Para efeitos comparativos, na década de 1990, as redes ópticas transmitiam sinais na faixa de Gigabytes por segundo, atualmente já operam na faixa de Terabytes por segundo (Agrell *et al.*, 2016). Essa evolução propiciou o desenvolvimento de diversas tecnologias para os sistemas de comunicação.

A preferência por sistemas de redes ópticas pode ser atribuída às suas condições e configurações, uma vez que são redes imunes a interferências eletromagnéticas, o que assegura

uma transmissão de sinal confiável e estável. Isso é importante em ambientes industriais ou urbanos, onde a interferência eletromagnética pode ser um problema significativo. Além disso, as redes ópticas transportam um grande volume de dados por longas distâncias e podem acomodar um grande número de usuários simultaneamente sem comprometer o desempenho (Agrell *et al.*, 2016). Arevalo e Sierra (2015) destacam que com o aumento exponencial da demanda por sistemas de banda larga, as redes ópticas tornaram-se cada vez mais essenciais para suprir às necessidades crescentes de conectividade da sociedade. Em suma, as redes ópticas desempenham um papel fundamental no avanço tecnológico e na promoção da comunicação eficiente, segura e de alta velocidade, contribuindo para o desenvolvimento econômico e social. Ou seja, a busca por sinais e sistemas que não possuam falhas vem se tornando prioritário para os usuários e empresas.

As empresas do ramo óptico e de sistemas de comunicação vem investindo em pesquisas a fim de produzir sistemas mais eficazes que reduzam falhas na comunicação, haja vista que a entrega de uma conexão de qualidade é um dos principais requisitos para a contratação de provedores de internet por parte dos usuários (Fontes, 2019). Com a expansão das redes de fibra óptica, a qualidade na conexão à internet teve uma melhora significativa. Por outro lado, isso acarretou alguns desafios para os provedores de internet, como dificuldades em realizar o monitoramento efetivo da qualidade do sinal, assim como nas perdas de conexões dos clientes. Embora existam diversas tecnologias para supervisão, atendimento ao cliente e manutenção preventiva (CONEC, 2023), por se tratarem de redes ópticas, existem limitações que podem dificultar a identificação de falhas relacionadas à qualidade e entrega do sinal.

Atualmente, existem equipamentos comerciais que realizam o monitoramento da conexão de redes ópticas, esses equipamentos são capazes de obter informações a partir dos feixes luminosos dos sistemas ópticos. Um deles é o *Optical Power Meter/ Medidor de Potência Óptica (OPM)*. O princípio de funcionamento do *OPM* é baseado na conversão de sinais ópticos em tensão, onde há uma proporção entre corrente elétrica e a potência óptica detectada (Skaljo *et al.*, 2011). Além disso, esses equipamentos são capazes de fornecer leituras precisas da potência em diferentes comprimentos de onda, sendo uma ferramenta valiosa para auxiliar na instalação e manutenção de infraestruturas ópticas. Os optical power meters podem ser utilizados seja internamente em Caixa de Terminação Óptica (CTO) ou ainda de modo manual por meio de técnicos. No entanto, o optical power meter consegue apenas verificar o nível da potência do sinal da fibra, não sendo capaz de identificar o local onde se teve perda de conexão ou onde a conexão

está lenta. Outro equipamento utilizado é o *Optical Time Domain Reflectometer/ Reflectômetro Óptico no Domínio do Tempo (OTDR)*, onde uma de suas funcionalidades consiste em realizar medidas para verificar a perda de potência da fibra, indicando a distância onde ocorreu tal perda (Júnior, 2021). Contudo, a identificação do ponto exato onde a conexão foi perdida pode ser comprometida quando o OTDR tenta medir um sinal que é dividido por meio do cascadeamento de splitters. Diante ao exposto, empresas e usuários têm buscado soluções e tecnologias a fim de solucionar esses problemas relacionados a conexões em redes ópticas.

Portanto, este trabalho visa detalhar a criação de um sistema de medição de potência óptica com protocolo LoRaWAN. O sistema proposto tem como finalidade analisar a qualidade do sinal das redes ópticas fornecidas aos usuários, utilizando o protocolo de comunicação LoRaWAN. Para isso, o sistema será constituído por um hardware capaz de realizar a medição da potência das redes ópticas, e transmitir esses dados via protocolo LoRaWAN. Dessa forma, o sistema possibilitará aos provedores de internet realizar manutenções de maneira ágil, com o objetivo de restabelecer o sinal e promover uma experiência positiva aos clientes.

1.1 Objetivos Geral e Específicos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de medição de potência óptica para redes passivas de fibra óptica, com a finalidade de analisar a qualidade do sinal fornecido aos usuários, utilizando o protocolo de comunicação LoRaWAN.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um dispositivo responsável pela medição de potência óptica;
- Elaborar um algoritmo para o dispositivo;
- Construir um gateway capaz de se comunicar com o dispositivo utilizando o protocolo LoRaWAN;
- Realizar testes para verificar a qualidade do sinal.

1.2 Contribuição científica

A contribuição significativa descrita nesta dissertação concentrou-se no desenvolvimento de um dispositivo inovador dedicado à medição da potência da fibra óptica em resposta a solicitações específicas. Este dispositivo foi construído para capturar uma ampla faixa de potência, abrangendo desde -42,87 dBm até 5,42 dBm. Os resultados apresentados aqui foram submetidos para publicação na revista *Journal of Communication and Information Systems*, classificada como A4 no sistema Qualis 2017-2020.

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho divide-se da seguinte maneira: no primeiro capítulo é apresentada introdução, contendo uma breve contextualização do problema investigado. Neste capítulo são apresentados ainda os objetivos da pesquisa e a estruturação da dissertação.

O capítulo dois apresenta a fundamentação teórica, contendo informações que oferecem conceitos e contexto para compreensão do problema. Nesse contexto, foi realizada uma revisão na literatura, explorando teorias existentes e consultando evidências empíricas sobre os métodos e componentes utilizados para o desenvolvimento do sistema de medição que o trabalho propõe.

O terceiro capítulo apresenta o Sistema de Medição Óptico. Onde são descritos os materiais e os métodos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. Este capítulo foi dividido em tópicos a fim de destrinchar cada etapa do desenvolvimento do sistema. Onde serão detalhados por exemplo: os equacionamentos, os softwares e materiais utilizados, as simulações, a confecção do protótipo e os testes.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos em meio aos testes e aplicação final do protótipo. E o quinto capítulo apresenta a conclusão desta dissertação. Nela serão detalhadas comparações dos resultados, as limitações da pesquisa e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados conceitos e autores que dão sustentação para o desenvolvimento desta pesquisa. O capítulo tem início com a contextualização histórica e funcional das redes de fibra óptica. Na sequência são descritos conceitos e aplicações dos divisores ópticos (splitters). Após essa etapa são detalhados o fotodiodo, o amplificador de transimpedância e por fim, a definição de internet das coisas.

2.1 Fibra Óptica

A expansão dos sistemas de comunicação na atualidade, vêm tornando as redes de fibra óptica uma ferramenta de destaque no cenário tecnológico, uma vez que viabilizam a transmissão de dados em alta velocidade.

Como destacado na introdução, Charles K. Kao e George Hockham realizaram e publicaram estudos que mais tarde possibilitaram a criação das redes de fibra óptica (Kao e Hockham, 1966). Isso ocorreu porque, durante os estudos no início da década de 1970, os autores constataram, nos testes realizados, que as perdas nas fibras ópticas eram inferiores a 20 dBm. Confirmando, assim, a viabilidade das redes ópticas transmitirem sinais, originando à comunicação por meio de fibras ópticas. Com os avanços tecnológicos, as perdas das fibras ópticas tiveram uma redução considerável, propiciando a adesão de mais sistemas, com larguras de banda maiores (Keiser, 2003).

Após as conclusões de Kao, houveram diversos avanços utilizando as redes ópticas como protagonistas. Suas aplicações encontravam-se principalmente direcionadas ao setor de telefonia, onde em 1973, por exemplo, foi criada a primeira rede telefônica operando por meio da tecnologia de fibra óptica. Com a concepção do protocolo Ethernet ¹, as redes ópticas foram empregadas, também, para aplicações em redes de banda larga fixa. A demanda por redes ópticas teve um aumento considerável nos últimos anos. Segundo relatório divulgado em 2022 pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), cerca de 63% das conexões de banda larga fixa operam por meio de conexões de fibra óptica (ANATEL, 2022).

Esse aumento significativo em sistemas operando por meio de redes ópticas acaba gerando inúmeras demandas para as empresas provedoras de internet ou que trabalham utilizando

¹ A Ethernet é o tipo mais comum de LAN cabeada encontrada (LAVIERI *et al.*,). Ela define as especificações para cabeamento e protocolos de comunicação para a transmissão de dados entre dispositivos conectados em uma rede.

sistemas ópticos. Entre essas demandas, surge a procura por conexões de internet com alta velocidade e baixas taxas de falhas, resultando em investimentos por parte dos provedores de internet em sistemas e infraestruturas aptas a entregar uma transmissão de qualidade aos clientes.

Dentre as infraestruturas e sistemas que podem ser utilizados, encontram-se as *Passive Optical Network/Redes Ópticas Passivas (PON)*, uma arquitetura de fibra óptica que possibilita a distribuição de sinais ópticos para serviços de banda larga, como telefonia, televisão e internet (Paiva, 2012). Este sistema destaca-se por não necessitar de uma fonte de alimentação para a transmissão, caracterizando-se, portanto, como passivo. Conforme descrito pela *PON*, ela possui aptidão para distribuir sinais ópticos a serviços de banda larga. Ocorrendo por meio da aplicação de divisores ópticos, que realizam a divisão de sinais ópticos transmitidos a partir de uma *Optical Line Terminal/Terminal de Linha Óptica (OLT)*.

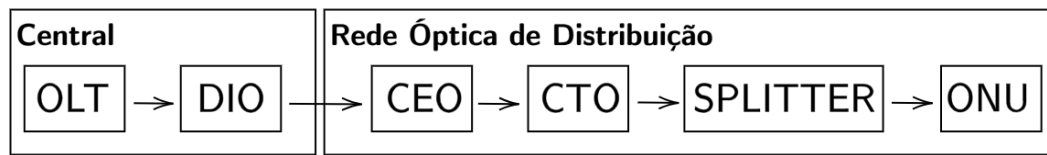
Alguns provedores de internet já utilizam arquiteturas baseadas na *PON*, onde se diferem quanto a performance e desempenho. Dentre elas, destacam-se a *Ethernet Passive Optical Network (EPON)* e a *Gigabyte Passive Optical Network (GPON)*. A *EPON* possui configurações semelhantes à *PON*, diferenciando-se principalmente por sua aplicação, que utiliza o protocolo Ethernet. Já a *GPON* destaca-se, principalmente, por oferecer maior largura de banda, que permite transmissões com altas taxas de dados, alcançando gigabytes por segundo (Pereira, 2013). Cabe destacar, também, que em conjunto com as *PONs*, há a presença dos *OLTs*, que desempenham um papel importante no processo de transmissão de dados, possibilitando a comunicação entre provedores de internet e usuários/clientes.

2.1.1 Topologia da Arquitetura PON

Conforme mencionado, a arquitetura *PON* é amplamente empregada em redes ópticas, vale destacar que a mesma foi desenvolvida com a finalidade de oferecer acesso ponto a multiponto, entre usuários e as redes de telecomunicações por meio da comunicação por fibra óptica (Pinheiro, 2017). A topologia tem como característica a presença de componentes ópticos passivos. A Figura 1 detalha a topologia da arquitetura *PON*.

A topologia tem início com a *OLT*, que é responsável por fornecer a interface da *PON*. Na sequência a fibra é direcionada ao Distribuidor Interno Óptico (DIO), que é responsável pelo gerenciamento dos cabos ópticos. A fibra ao passar pelo DIO, é direcionada para a Caixa de Emenda Óptica (CEO), que trata-se de um dispositivo com a função de selar o ponto de emenda, impedindo a entrada de água ou outras perturbações. Após a CEO, a fibra segue para a CTO,

Figura 1 – Topologia Arquitetura PON.



Fonte: elaborado pelo autor.

que tem a função de proteger as emendas ópticas entre o cabo de entrada e os cabos de saída. Por fim, vem a *Optical Network Unit/Unidade de Rede Óptica (ONU)* que é onde a fibra óptica chega ao usuário final (Pinheiro, 2017).

2.2 Splitter

Para que os sistemas ópticos operem e transmitam sinais de modo eficaz, se faz necessário utilizar alguns dispositivos a fim de interligar os sistemas e amplificar a transmissão. Um destes dispositivos é os *splitters* ou divisores óptico, dispositivo responsável por realizar a divisão e distribuição do sinal óptico de uma rede de fibra óptica para outras (Villalba, 2009). O splitter opera para que a *OLT* atenda à várias *ONU*, como um distribuidor de sinais, garantindo que todos os dispositivos conectados recebam parte do sinal. Os splitters são comumente utilizados por provedores de internet, devido suas configurações e características que promovem uma maior capilaridade nas redes *PON* (Silva, 2018).

Os splitters são divididos em dois tipos principais, sendo eles: splitters de divisão de potência (*Optical Power Splitter*) e splitters de divisão de comprimento de onda (*Optical Wavelength Splitter*). O *optical power splitter* realiza a divisão do sinal de entrada e distribui a potência para todas as saídas. Já o *optical wavelength splitter*, realiza a divisão do sinal com base no comprimento de onda e, posteriormente, encaminha diferentes comprimentos de onda para diferentes portas de saída (Dutton, 1998).

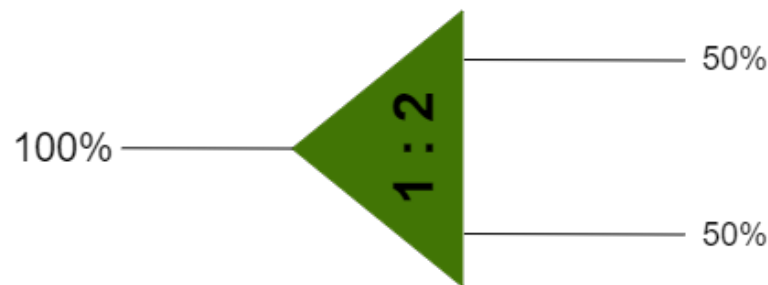
2.2.1 Splitters Balanceados e Desbalanceados

Existe, ainda, uma subdivisão entre os splitters, que derivam dos *optical power splitter*, e são denominados como splitters balanceados e splitters desbalanceados (Pinheiro, 2017).

Os splitters balanceados são utilizados quando se busca uma rede equilibrada. O sistema opera da seguinte maneira: ao receber um sinal na entrada, esse sinal é dividido

igualmente para todas as saídas (Tormann *et al.*, 2023). Esse tipo de splitter é utilizado geralmente em áreas com volume populacional grande, onde demandam que os serviços de redes ópticas sejam de qualidade. Uma desvantagem deste tipo de splitter é a limitação em relação às *OLTs*. Isso ocorre porque, ao implementar mais um divisor óptico, a potência irá diminuir, impactando no sinal recebido pelo cliente. A Figura 2 detalha um splitter balanceado, note que as saídas possuem valores iguais.

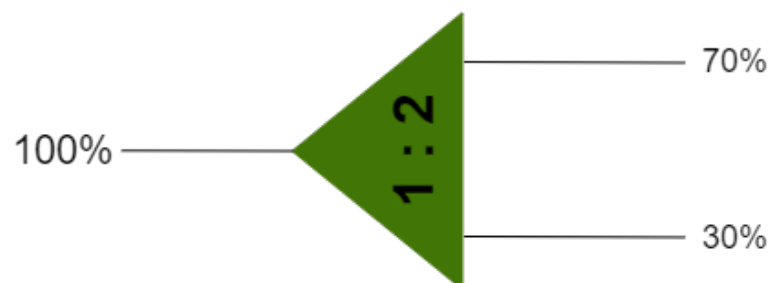
Figura 2 – Splitter Balanceado 1:2.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os splitters desbalanceados, como sugere o próprio nome, são desequilibrados, resultando em uma distribuição não uniforme do sinal de entrada e, como consequência, em uma rede desequilibrada (Tormann *et al.*, 2023). Sua aplicação é eficaz ao direcionar mais potência para uma região específica da rede, como em casos onde um ramo requer mais potência do que os outros. No entanto, o monitoramento e controle da potência pode ser dificultado em decorrência desse desbalanceamento. A Figura 3 ilustra o processo de divisão em um splitter desbalanceado. Note que as saídas do splitter possuem valores diferentes.

Figura 3 – Splitter Desbalanceado 1:2.



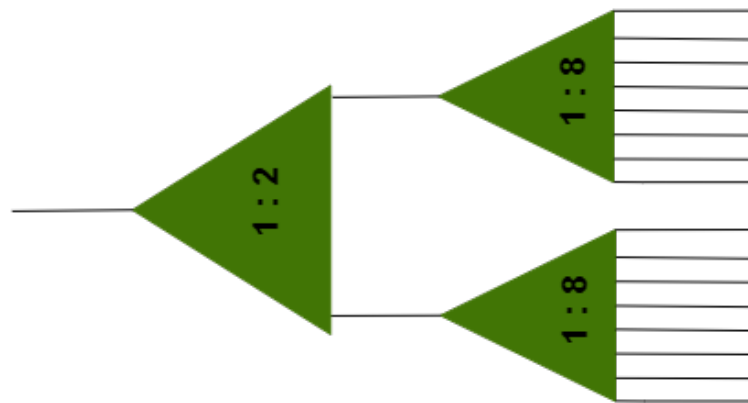
Fonte: elaborado pelo autor.

2.2.2 *Cascadeamento de Splitters*

Os splitters mencionados anteriormente podem ser conectados em cascata. O cascadeamento de splitters em redes de fibra óptica refere-se à prática de conectar vários splitters em série, onde é criada uma configuração em cascata. É utilizado em redes ópticas para distribuir sinais ópticos para várias saídas de modo eficiente.

As configurações em cascata têm a capacidade de expandir sistemas ópticos para atender a diversas demandas de conexão (Pinheiro, 2017). Entretanto, conforme detalhado anteriormente, dependendo da quantidade de divisores ópticos utilizados, podem ocorrer perdas de potência, impactando o sinal recebido pelos clientes. A Figura 4 exemplifica um tipo de cascadeamento, sendo ele o cascadeamento de 2 níveis com 16 portas.

Figura 4 – Cascadeamento de splitters de Nível 2.



Fonte: elaborado pelo autor.

2.2.2.1 *Perdas de Potência*

Embora a aplicação do cascadeamento de splitters em redes ópticas apresente vantagens, essa abordagem possui limitações que podem ocasionar problemas no sinal transmitido. Uma desvantagem está relacionada às perdas de potência durante o processo de cascadeamento (Keiser, 2003).

Pinheiro (2017) descreve outros tipos de perdas de potência que podem ocorrer em sistemas ópticos. Dentre elas, cabe destacar as seguintes: perdas por inserção, perdas por curvatura e perdas por divisões no splitter. As perdas por inserção são causadas pela inclusão de conectores no sistema. Já as perdas por curvaturas referem-se às curvaturas nas fibras ópticas, que interferem no fluxo da luz. As perdas por divisões no splitter são ocasionadas pela divisão

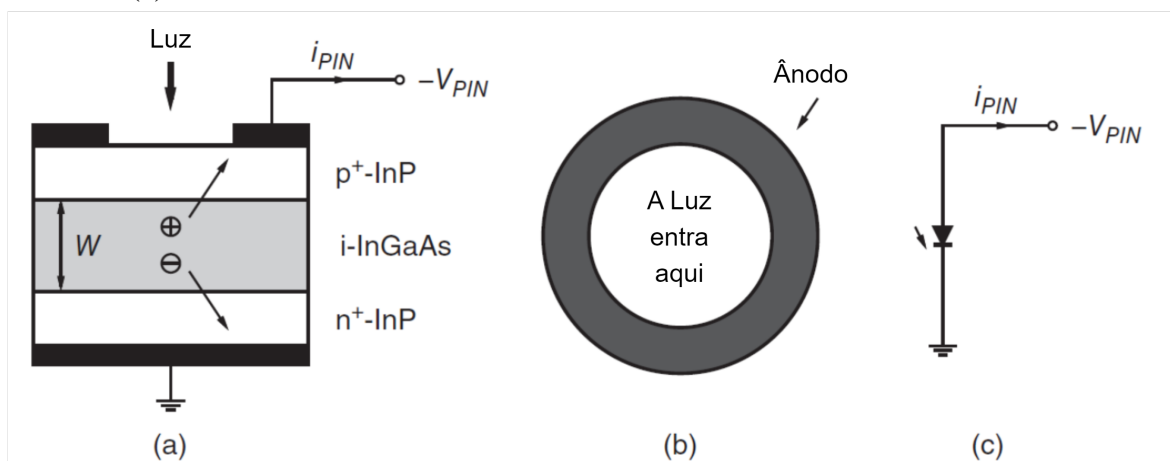
do sinal óptico entre as saídas do splitter. Essa perda é expressa em decibéis-miliwatts (dBm) e pode variar dependendo do tipo de splitter e da relação de divisão.

2.3 Fotodiodo

Fotodiodo (ou fotodetector) é um dispositivo semicondutor que permite a conversão de luz em corrente elétrica fotogerada. Suas características influenciam no desempenho do receptor. Portanto, para se obter uma boa sensibilidade do receptor, o fotodetector deve possuir uma largura de banda suficiente para o sinal de entrada, ter uma boa resposta ao sinal recebido e gerar o mínimo de ruído possível (Sackinger, 2018).

Entre os tipos mais comuns de fotodetectores, destaca-se o fotodiodo p-i-n. Ele é constituído por uma junção p-n com uma camada de material semicondutor intrínseco entre essa junção. A luz entra através do ânodo, atravessa o material dopado com "p", e atinge a camada "i", também conhecida como camada de absorção. Os fótons ao incidirem sobre a camada de absorção, fazem passar os elétrons da banda de valência para a banda de condução, gerando pares elétron-buraco, que ao serem submetidos ao campo elétrico de deriva, geram uma corrente elétrica fotogerada nos terminais do diodo (Sackinger, 2018). A Figura 5a apresenta a vista em corte transversal do fotodetector p-i-n, enquanto a Figura 5b e Figura 5c mostram a vista superior e o seu símbolo do circuito, respectivamente.

Figura 5 – Fotodiodo p-i-n: Vista em corte transversal(a); vista superior (b) e símbolo do circuito (c).



Fonte: Adaptado de Sackinger (2018).

Na família dos fotodiodos, destaca-se o fotodiodo InGaAs, um semicondutor composto pelos elementos Índio (In), Gálio (Ga) e Arsênio (As), formando o termo InGaAs (Rua,

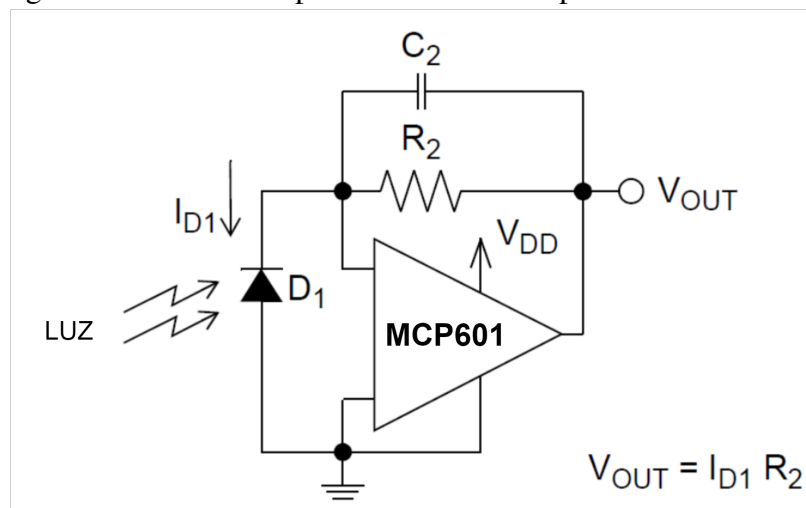
2019). A combinação destes elementos no semicondutor permite que o fotodiodo meça comprimentos de onda na região do *Near Infrared*/Infravermelho Próximo (*NIR*), contribuindo, dessa forma, para aplicações em redes ópticas que atuam nesse espectro (Dutton, 1998).

2.4 Amplificador de transimpedância

Amplificador de transimpedância é um dispositivo eletrônico aplicado a sistemas onde se deseja converter corrente de entrada em tensão de saída, geralmente empregado em sistemas ópticos para a conversão de sinais fotodetectados, um exemplo são nas comunicações por fibra óptica (Sackinger, 2018).

O circuito do amplificador é constituído por um Amplificador Operacional (amp-op), um resistor de feedback entre a saída e a entrada inversora, um capacitor conectado em paralelo com o resistor de feedback e um fotodiodo, conectado em paralelo com as entradas inversora e não-inversora como detalha a Figura 6. A entrada não inversora é conectada à fonte de corrente (fotodiodo) que precisa ser convertida em tensão. A corrente passa através do fotodetector e é convertida em tensão pela resistência de feedback do amplificador operacional.

Figura 6 – Circuito amplificador de transimpedância.



Fonte: datasheet do fabricante Microchip (2007).

Segundo datasheet do fabricante Microchip (2007), a Equação 2.1, estabelece como calcular o módulo da tensão de saída de um circuito com o amp-op MCP601.

$$V_{out} = R_2 \times I_{D1} \quad (2.1)$$

Onde:

V_{out} = Tensão de saída;

R_2 = Resistência de feedback;

I_{D1} = Corrente fotogerada.

Uma das vantagens de utilizar o amplificador de transimpedância é a sua alta sensibilidade às correntes. Que permite a amplificação de sinais fracos e possibilita a aplicação em detecções de baixos sinais (Sackinger, 2018). Porém, uma de suas limitações é a instabilidade causada por ruídos e interferências. Que podem ser ajustadas com a inclusão de componentes passivos, como capacitores e resistores de derivação ou por técnicas de filtragem de sinal. O capacitor C_2 utilizado no circuito da Figura 6 é responsável pela estabilidade no sinal de tensão de saída.

2.5 Internet of Things e protocolo LoRaWAN

Internet Of Things/ Internet das Coisas (IoT) é o termo utilizado para se referir a um sistema composto por diversos dispositivos, que podem coletar e trocar informações de modo "inteligentes". Esses dispositivos comunicam-se entre si e com sistemas centrais, tomando decisões automatizadas com base nos dados coletados (Weber e Weber, 2010).

De modo geral o *IoT*, tem o propósito de criar uma rede onde todos os objetos possam se conectar à internet e com isso coletar e compartilhar dados. As informações coletadas podem ser utilizadas e aplicadas para análise, automação e melhorar a eficiência em diversas áreas, como saúde, transporte, agricultura, manufatura, entre outras (Carrion e Quaresma, 2019).

Entre as tecnologias *IoT* que vêm se desenvolvendo ao longo do tempo, destaca-se a *Low-Power Wide-Area Network/Rede de Longo Alcance e Baixa Potência (LPWAN)*, responsável pela transmissão de dados a longas distâncias com baixo consumo de energia. O protocolo de comunicação LoRaWAN é uma das opções do LPWAN. Ele permite o usuário construir e parametrizar sua rede de forma independente ou utilizar um serviço de computação em nuvem, podendo ser público ou privado (Silva *et al.*, 2023).

3 SISTEMA DE MEDIÇÃO ÓPTICO

Neste capítulo são detalhados os materiais, softwares, métodos e processos adotados para o desenvolvimento do sistema de medição óptico.

3.1 Materiais e Softwares

A Tabela 1 apresenta uma lista com os componentes utilizados na construção do dispositivo de medição óptico.

Tabela 1 – Componentes utilizados

Componente	Quantidade
Amplificador Operacional - MCP601T-I/SN (SMD)	1
Arduino Nano V3	1
Barras de Pino Fêmea - 1x02	1
Barras de Pino Fêmea - 1x10	6
Capacitor Cerâmico - 10 pF	1
Capacitor Cerâmico - 100 nF	6
Capacitor Cerâmico - 330 nF	1
Capacitor Eletrolítico - 10 uF	2
Fotodiodo - MTPD1346D-100	1
Interruptor Bilateral Quádruplo - CD4066B	1
Splitter 1/8 desbalanceado	1
Splitter 1/16 desbalanceado	1
LED - Vermelho 5 mm	1
LoRa - SX1276	1
Mód. Conversor Bidirecional - TXS0108EPW	1
Placa de Fibra de Vidro - 10x15 cm	1
Regulador de Tensão - AMS1117CD (3.3 V)	1
Regulador de Tensão - LM7805	1
Resistor - 100 k	3
Resistor- 10 M	1
Resistor - 1 G	2
Resistor - 1 k	1
Resistor- 1 M	1
Resistor - 2.7 M	2
Resistor - 330	1
Resistor - 68 k	1
Sensor de Temperatura - LM35	1
Soquete - 14 Pinos	1
TOTAL	41

Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 2 apresenta os softwares utilizados para elaboração do sistema de medição óptico.

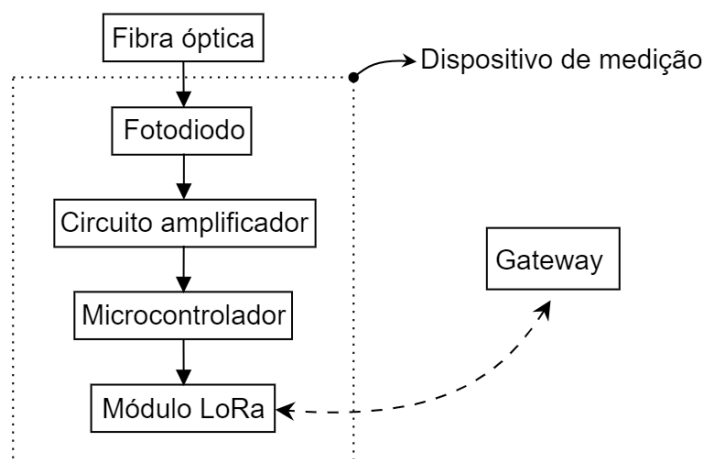
Tabela 2 – Softwares utilizados

Nome	Aplicação
PSIM	Análise e simulação de circuitos eletrônicos
KiCad	Elaboração de circuitos eletrônicos para confecção de placas
Microsoft Excel	Criação de banco de dados e geração de gráficos
Arduino IDE	Elaboração de algoritmo para implementação no microcontrolador

Fonte: elaborado pelo autor.

Utilizando os componentes e softwares destacados nas Tabelas 1 e 2, foi possível desenvolver o dispositivo proposto nesta dissertação. A Figura 7 destaca um diagrama de blocos com os principais componentes utilizados para a construção e funcionamento do dispositivo.

Figura 7 – Visão geral do Sistema de Medição Óptico.

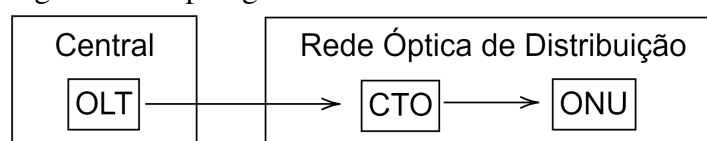


Fonte: elaborado pelo autor.

3.2 Configurações da Topologia

Para o desenvolvimento da pesquisa, a topologia da arquitetura *PON* foi readaptada, a Figura 8 detalha a topologia utilizada, na qual os componentes DIO, CEO e o splitter não foram utilizados. No entanto, a atenuação dos componentes foi mantida.

Figura 8 – Topologia Adotada.

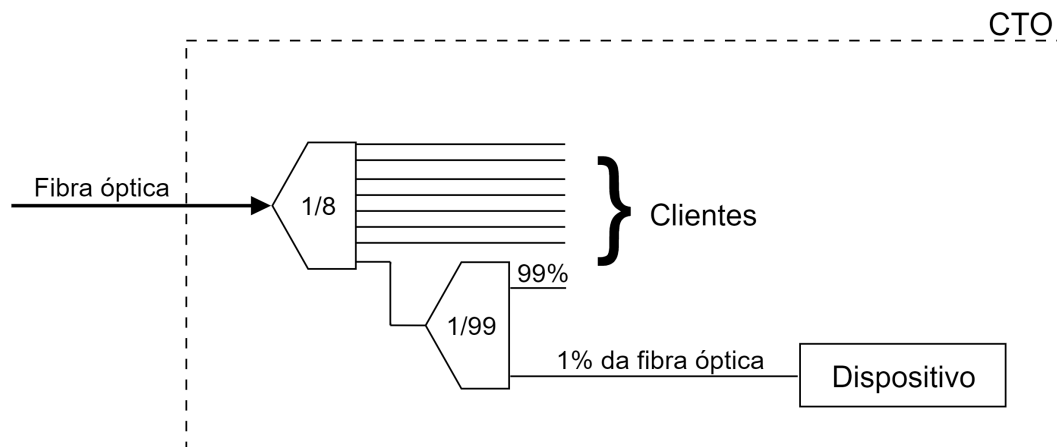


Fonte: elaborado pelo autor.

A *OLT* utilizada nesta pesquisa foi da fabricante EPON OLT, o modelo V-SOL V1600D16. A escolha do componente, foi devido a capacidade do mesmo emitir sinais ópticos com comprimento de onda na faixa de 1490 nm.

O sinal óptico proveniente da *OLT* é direcionado para a CTO e, em seguida, é distribuído através de um splitter de razão 1/99 desbalanceado. Essa divisão tem por finalidade evitar interferências na qualidade do sinal da fibra óptica dos clientes, permitindo que apenas 1% da potência do sinal seja encaminhado para o dispositivo de medição. A Figura 9 detalha um exemplo desse processo, no qual o sinal vindo da *OLT* entra na CTO, passa por um splitter 1/99 desbalanceado e, em uma das saídas deste splitter, o dispositivo de medição é conectado. Desta forma, apenas 1% do sinal proveniente dessa porta é direcionado ao dispositivo de medição, enquanto os outros 99% são alocados para o cliente.

Figura 9 – Utilizando o splitter 1/99 desbalanceado para captar 1% do sinal da fibra.

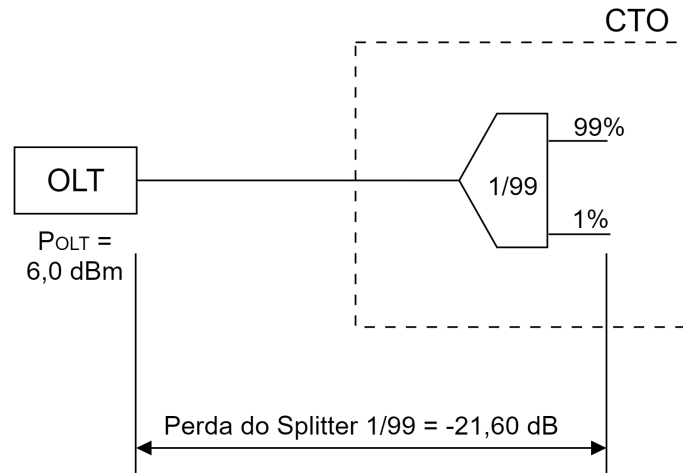


Fonte: elaborado pelo autor.

Durante a simulação, a potência de saída da *OLT* utilizada foi de 6 dBm e a perda considerada para simular a saída de 1% do splitter 1/99 desbalanceado foi de -21,6 dB, de acordo com o datasheet da fabricante Furukawa (2021). A Figura 10 apresenta o circuito adotado na simulação, mostrando os valores ideais das perdas para um splitter 1/99 desbalanceado, desconsiderando as perdas nas conexões entre o splitter e a *OLT*. É importante destacar que o cálculo da potência, expressa em dBm, após o sinal ser atenuado pelo splitter desbalanceado 1/99, é realizado de maneira direta, de acordo com a Equação 3.1:

$$6 \text{ dBm} - 21,6 \text{ dB} = -15,6 \text{ dBm} \quad (3.1)$$

Figura 10 – Valores de potências da *OLT* e splitter considerados na simulação.

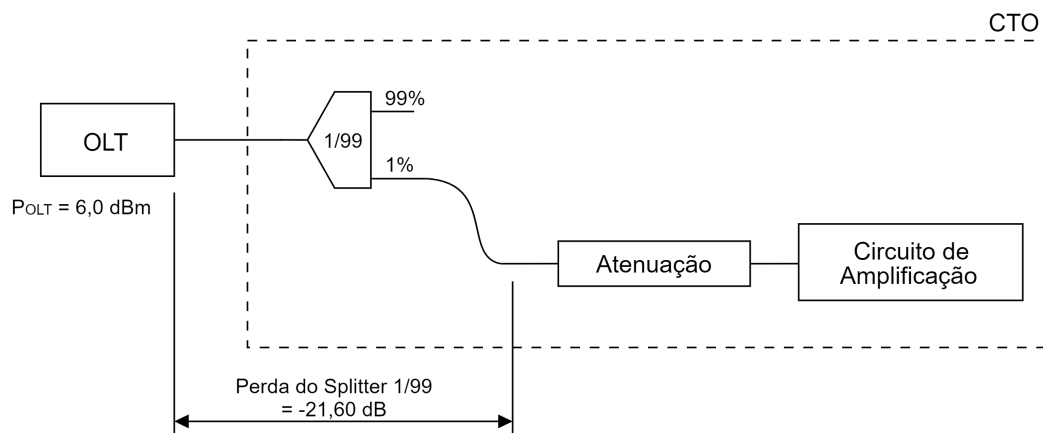


Fonte: elaborado pelo autor.

O passo seguinte foi a simulação das perdas que podem ocorrer durante a transmissão do sinal até o destino final da fibra óptica. Portanto, para a simulação dessas perdas, recorreu-se à técnica de cascadeamento de splitters, a qual possibilitou a atenuação gradual do sinal.

Conforme a Figura 11, o cascadeamento dos splitters empregados para a atenuação da potência do sinal originado na *OLT* será feito no bloco "Atenuação". Foram utilizadas combinações de splitters balanceados, com variação de 1/2 a 1/16, que de acordo com o datasheet da Electric (2021), possibilita uma atenuação aproximada de 3,4 dB para cada etapa de cascadeamento. Após a atenuação, o sinal é direcionado ao circuito de amplificação.

Figura 11 – Atenuação do sinal com cascadeamento de splitters.



Fonte: elaborado pelo autor.

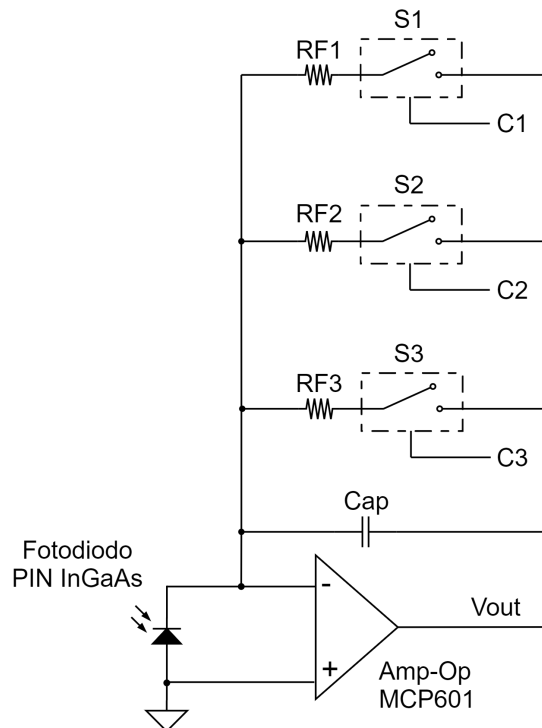
3.3 Fotodiodo p-i-n InGaAs e circuito amplificador

O sinal enviado pelo cascadeamento de splitters é atenuado e na sequência passa pelo circuito amplificador. O sinal atenuado é recebido pelo fotodiodo, que gera uma corrente elétrica proporcional à intensidade da luz incidente. O amplificador operacional converte a corrente do fotodiodo em uma tensão de saída proporcional (V_{out}). A relação entre a corrente gerada pelo fotodiodo e a tensão de saída (V_{out}) é determinada pelas Resistências de Feedback (RF) do amplificador ($RF1$, $RF2$ e $RF3$). Essa relação é determinada pela Equação 2.1.

A tensão gerada pelo fotodiodo será amplificada pelo amp-op, tornando o processo de medição mais suave. Cada resistência de feedback está conectada a uma chave ($S1$, $S2$ e $S3$), que é controlada por sinais ($C1$, $C2$ e $C3$) enviados pelo microcontrolador. Essas resistências são projetadas de modo a determinar a taxa de amplificação da tensão. Quanto maior a RF , maior será a amplificação.

A tensão de saída (V_{out}) do amp-op representa uma medida da intensidade da luz incidente no fotodiodo. Essa tensão de saída é lida e processada pelo microcontrolador. A Figura 12 detalha o circuito eletrônico do amplificador utilizado para essa etapa.

Figura 12 – Amplificador de transimpedância.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.3.1 Resistências de feedback

O amplificador foi alimentado com uma tensão de 5 V (volts). Assim, a tensão de saída (V_{out}), representada na Figura 12, pode variar de 0 V a 5 V de acordo com a potência em dBm da fibra óptica que incide no fotodiodo. Quando ocorre saturação no amp-op, a resistência de feedback é acionada.

Cada uma das resistências de feedback possui uma equação que relaciona as variáveis de tensão e potência em dBm. A Equação 3.2, encontrada empiricamente pelo autor, apresenta essa relação entre tensão e potência (em dBm).

$$V_{OUT} = a \cdot e^{b \cdot (P_{dbm})} \quad (3.2)$$

Onde:

V_{OUT} = Tensão de saída do amplificador;

a e b = Constantes;

e = Número de Euler;

P_{dBm} = Potência da fibra óptica em decibéis-miliwatts (dBm).

Os valores das resistências de feedback foram encontrados por meio do método de tentativa e erro, onde a potência da fibra óptica era lida e em seguida o valor de tensão na saída do amp-op era verificado.

Para a primeira aferição, o valor da resistência foi ajustado até obter uma tensão próxima à saturação, ou seja, próxima de 5 V. Posteriormente, utilizando a atenuação referente ao cascadeamento de splitters, o sinal óptico foi atenuado até que a tensão de saída do amplificador operacional se aproximasse de 0 V. Quando a tensão de saída do amp-op atingia um valor próximo a 0 V, a potência da fibra era mantida e ajustava-se novamente o valor da resistência até que se aproximasse de 5 V. Ao atingir os 5 V, o processo era repetido, ou seja, o sinal era novamente atenuado até que a tensão de saída do amp-op se aproximasse de 0 V.

Após as simulações, foram determinados três valores de resistências de feedback: RF1, RF2 e RF3, cujos valores correspondem a 275 k Ω , 13,8 M Ω e 690 M Ω , respectivamente. A Tabela 3 apresenta os valores de tensão e potência para cada uma das resistências de feedback.

Tabela 3 – Valores obtidos na simulação.

Resistência de feedback (Ω)	Atenuação do Splitter 1/99 (dB)	Cascadeamento dos splitters				Potência simulada (dBm)	Tensão (V)
275 k Ω	-21,6	Sem				-15,6	4,85
		1/2				-19	2,22
		1/4				-22,4	1,01
		1/8				-25,8	0,463
		1/16				-29,2	0,212
		1/16 1/2				-32,6	0,0968
13,8 M Ω		1/16 1/2				-32,6	4,85
		1/16 1/4				-36	2,22
		1/16 1/8				-39,4	1,01
		1/16 1/16				-42,8	0,463
		1/16 1/16 1/2				-46,2	0,212
		1/16 1/16 1/4				-49,6	0,0968
690 M Ω	1/16 1/16 1/4				-49,6	4,84	
	1/16 1/16 1/8				-53	2,21	
	1/16 1/16 1/8 1/2				-56,4	1,01	
	1/16 1/16 1/8 1/4				-59,8	0,462	
	1/16 1/16 1/8 1/8				-63,2	0,211	

Fonte: elaborado pelo autor.

Cada resistência de feedback é associada a uma faixa de tensão e de potência. Quando a tensão de saída atinge um valor muito baixo (0,0968 V), ocorre a troca para uma resistência de feedback maior. Essa mudança leva a um aumento no valor da tensão de saída.

3.3.1.1 Métodos Matemáticos

Após obter os valores de tensão e potência, foi possível gerar gráficos de dispersão para cada resistência de feedback. Utilizando métodos matemáticos com auxílio do software Excel. Desta forma, foi possível encontrar a equação da linha de tendência das resistências, com emprego de técnicas matemáticas as quais serão detalhadas a seguir.

Foi adotada nesta etapa a técnica de gráficos de dispersão, desenvolvida pelo estatístico Francis Galton (Sousa, 2019). Esta técnica consiste em uma representação visual da distribuição conjunta de duas variáveis. No qual em um eixo, temos uma variável, e no outro eixo, temos a segunda variável. Cada ponto no gráfico representa uma observação ou um par de valores para essas variáveis.

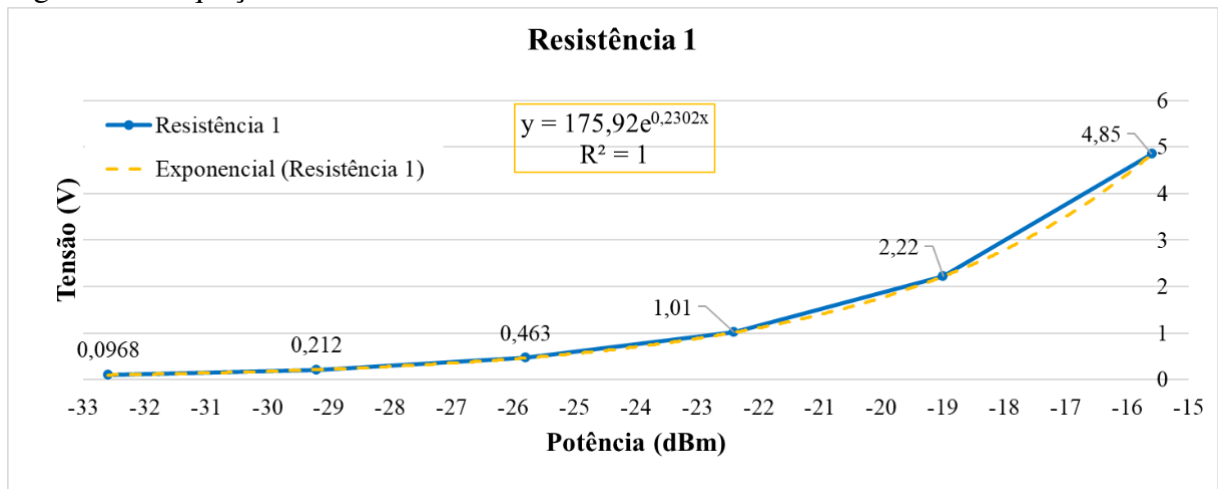
Em conjunto aos gráficos de dispersão, foi aplicado ainda o Método dos Mínimos Quadrados. Uma técnica matemática utilizada para obter o melhor ajuste linear para um conjunto

de dados. Esse método é frequentemente aplicado em análise de regressão, onde deseja-se encontrar a equação de uma linha (ou curva) que minimiza a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores preditos pela linha de ajuste (Helene, 2013). Foi empregado o coeficiente de determinação, representado por R^2 (R-ao quadrado), como uma medida estatística para avaliar a qualidade do ajuste de uma regressão linear (Pala, 2019). Este valor varia de 0 a 1, indicando a proporção da variabilidade na variável dependente que pode ser explicada pelos termos do modelo de regressão. Quanto mais próximo de 1, maior é a proximidade da equação da linha de tendência com os dados observados, evidenciando um ajuste mais preciso. Como os dados são retirados da simulação, o coeficiente de determinação para as três resistências tem o valor de 1.

3.3.1.2 Resistência de Feedback 1

Para a resistência de feedback 1, foi adotado um valor de 275 k Ω . A Figura 13 apresenta o gráfico de dispersão e a equação correspondente à resistência de feedback 1.

Figura 13 – Equação da resistência de feedback 1.



Fonte: elaborado pelo autor.

De acordo com a Figura 13, a equação para a resistência de feedback 1 é:

$$y = 175,92 \cdot e^{0,2302 \cdot (x)} \quad (3.3)$$

Onde:

y = Tensão de saída (V_{out});

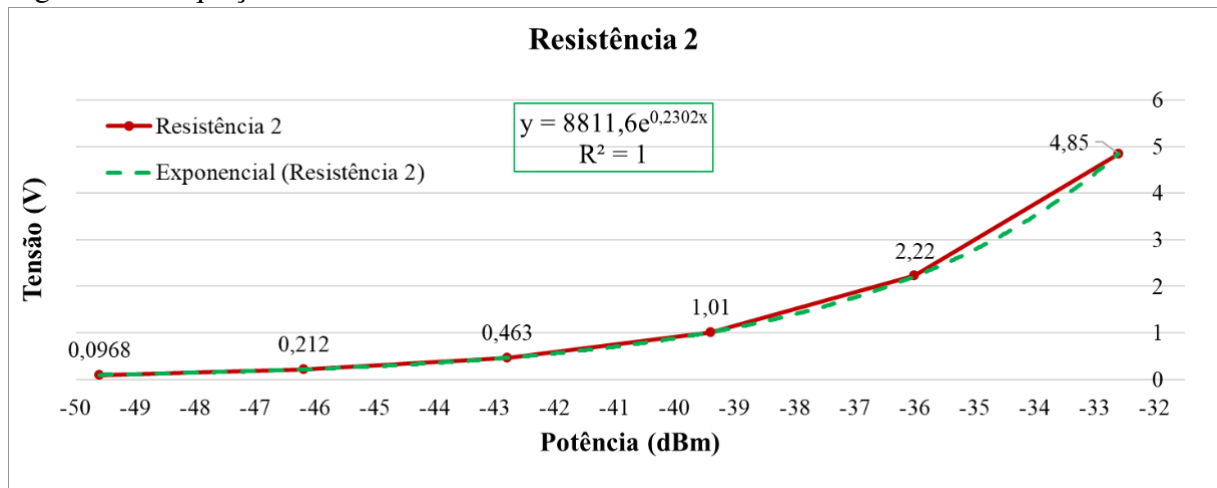
x = Potência da fibra óptica recebida pelo fotodiodo.

Conforme evidenciado na Figura 13, o amp-op é capaz de detectar uma variação de potência entre -32,6 dBm e -15,6 dBm, quando empregada a resistência de feedback 1. Valores de potência que estejam fora dessa faixa podem resultar em saturação do amp-op. Para aquisição de uma faixa de potência menor, é necessário efetuar a substituição para a resistência de feedback 2.

3.3.1.3 Resistência de Feedback 2

Para a resistência de feedback 2, foi adotado um valor de 13,8M Ω . A Figura 14 apresenta o gráfico de dispersão e a equação correspondente à resistência de feedback 2.

Figura 14 – Equação da resistência de feedback 2.



Fonte: elaborado pelo autor.

A equação para a resistência de feedback 2 é:

$$y = 8811,6 \cdot e^{0,2302 \cdot (x)} \quad (3.4)$$

Onde:

y = Tensão de saída (V_{out});

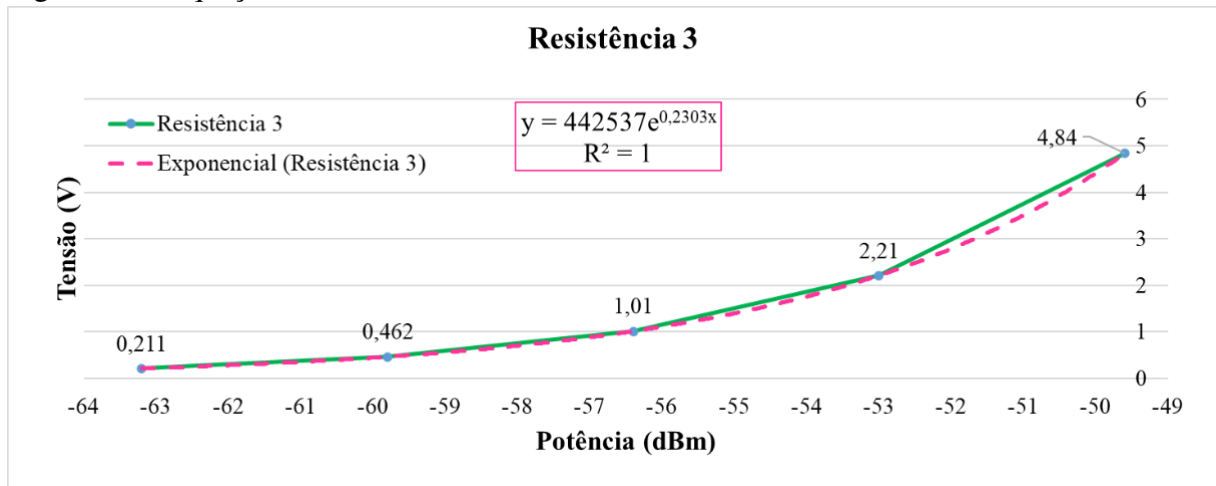
x = Potência da fibra óptica recebida pelo fotodiodo.

No caso da resistência de feedback em questão, o amp-op é capaz de detectar uma variação de potência entre -49,6 dBm e -32,6 dBm. Para aquisição de uma faixa de potência inferior a -49,6 dBm, faz-se necessário utilizar a resistência de feedback 3.

3.3.1.4 Resistência de Feedback 3

Para a resistência de feedback 3, foi adotado um valor de 690 MΩ. A Figura 15 exibe o gráfico de dispersão e a equação de tendência relacionados à resistência de feedback 3.

Figura 15 – Equação da resistência de feedback 3.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Equação 3.5 é referente à resistência de feedback 3.

$$y = 442537 \cdot e^{0,2303 \cdot (x)} \quad (3.5)$$

Onde:

y = Tensão de saída (V_{out});

x = Potência da fibra óptica recebida pelo fotodiodo.

Ao empregar a resistência de feedback 3, o amp-op é capaz de detectar uma variação de potência compreendida aproximadamente entre -63,2 dBm e -49,6 dBm.

Ao utilizar as três resistências de feedback, é possível abranger uma faixa de potência entre -63,2 dBm e -15,6 dBm. Porém, para simular a potência óptica que chega no cliente, é necessário acrescentar a potência de 21,6 dB no código de cada equação. Isso é importante pois a qualidade do sinal deve ser medida desconsiderando as perdas associadas ao cascadeamento utilizado para atenuar 1% do sinal.

De acordo com o datasheet da OLT da fabricante VSOL (2023), a faixa de potência que a porta PON consegue medir é de -32 dBm à -8 dBm. Assim, ao utilizar as três resistências de feedback e acrescentar os 21,6 dB em cada equação, é possível abranger uma faixa de potência

entre -41,6 dBm e 6,00 dBm. Essa faixa de potência é suficiente para a avaliação da qualidade da fibra óptica.

3.4 Microcontrolador

O microcontrolador é o responsável por realizar o chaveamento das resistências de feedback. Neste contexto, foi empregado o microcontrolador ATmega328, embarcado no Arduino Nano V3. A programação do microcontrolador foi realizada por meio da IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado) associada ao Arduino Nano V3.

Na configuração inicial, o programa define variáveis responsáveis pelos pinos de controle, leitura de tensão e sinalização. Também realiza a comunicação serial e a inicialização do módulo LoRa, utilizado para receber e enviar informações ao gateway. Na sequência, o programa entra em um loop onde executa algumas ações.

O programa verifica a validade de um comando ao recebê-lo do *gateway*¹. Caso o comando não seja válido, o dispositivo retorna e aguarda um novo comando válido. Quando um comando válido é recebido, o dispositivo sinaliza com um LED, indicando a recepção bem-sucedida e a validade do comando.

Após a sinalização visual, o dispositivo realiza a medição da tensão de entrada no pino analógico e compara se a tensão medida está dentro da faixa estabelecida. Se a tensão estiver fora da faixa, ocorre o chaveamento para uma nova resistência de feedback. A alteração da resistência de feedback resulta em uma mudança na tensão da entrada analógica. Quando a tensão da entrada analógica está dentro da faixa aceitável, é realizado o cálculo da potência.

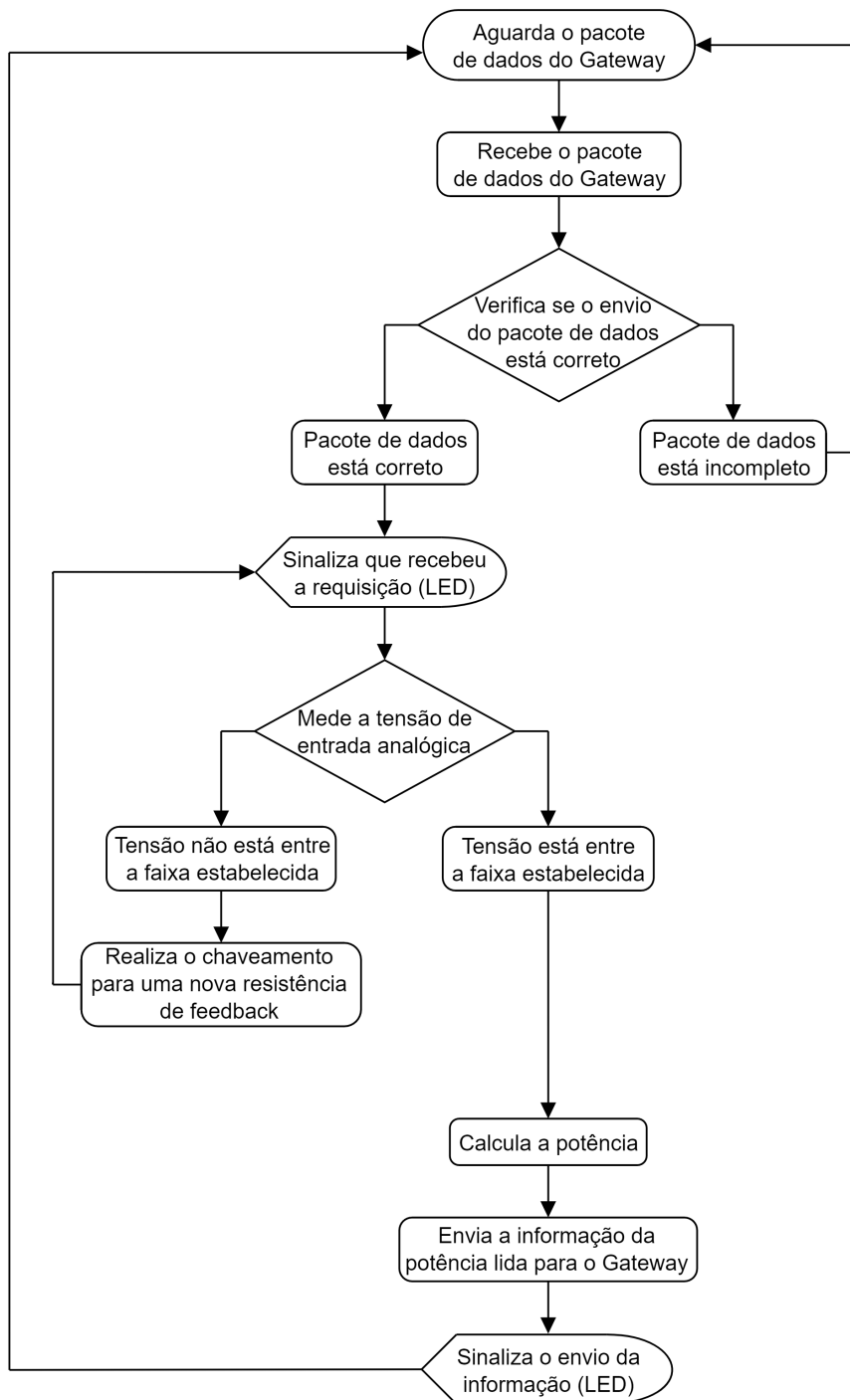
No cálculo da potência, o microcontrolador utiliza as equações de acordo com a resistência de feedback selecionada, e soma às perdas referentes ao cascadeamento responsável por enviar 1% do sinal para o circuito de amplificação. O valor da tensão analógica lida é substituída na equação para determinar a potência.

Após o cálculo da potência, o dispositivo envia para o gateway o valor de potência lido na fibra óptica. Durante o envio da informação, há uma sinalização visual com um LED. Após a conclusão do envio da informação, o dispositivo de medição permanece em espera por um novo comando do gateway.

¹ Um gateway é um equipamento que promove o encaminhamento de pacotes de dados entre dispositivos finais e um servidor (Silva *et al.*, 2023).

Conforme a Figura 16, podemos observar o processo descrito anteriormente utilizando o microcontrolador. O algoritmo contendo a programação está nos Apêndice C desta dissertação.

Figura 16 – Fluxograma: Lógica da programação utilizada no dispositivo de medição.



Fonte: elaborado pelo autor.

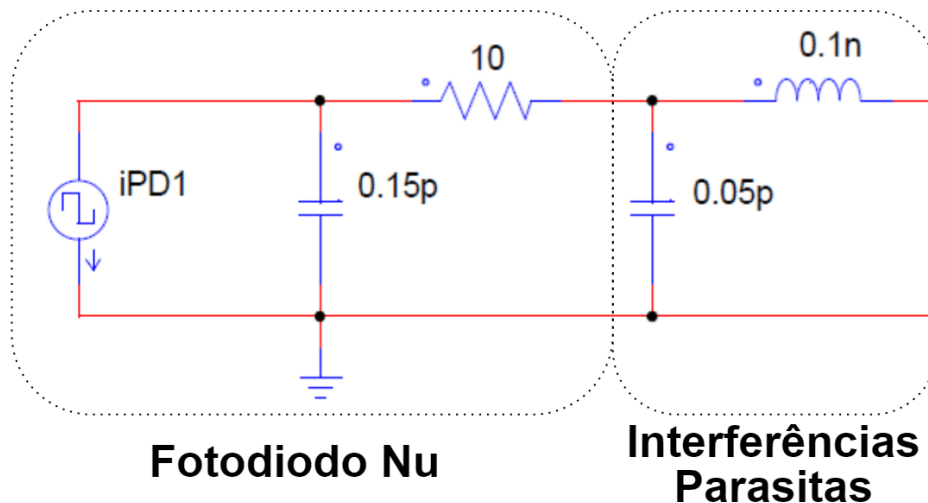
3.5 Montagem do Protótipo

Com a definição da *OLT*, dos splitters e dos circuitos e técnicas adotadas para adequação do fotodiodo e do amplificador de transimpedância, foi então iniciada a montagem do protótipo. Onde ocorreram as seguintes etapas: Simulação; Testes em laboratório; Desenvolvimento do circuito eletrônico e montagem do protótipo; e o Gateway.

3.5.1 Simulação

A simulação foi desenvolvida com base nas características de um fotodiodo *p-i-n* convencional, com o objetivo de realizar uma verificação preliminar dos possíveis valores de resistência a serem utilizados na construção do protótipo final. A Figura 17 ilustra a análise da corrente fotogerada pelo fotodiodo ao receber o sinal de luz da *OLT*, onde foi utilizada uma fonte de corrente e um circuito eletrônico do fotodiodo com interferências parasitas. Essas interferências, de acordo com Sackinger (2018, p. 48), resultam de fatores como ligações de fios e estruturas de condutores, que em fotodetectores de alta velocidade impactam significativamente a largura de banda do circuito.

Figura 17 – Circuito eletrônico do fotodiodo com interferências parasitas.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os valores de resistência, indutância e capacitância na Figura 17 foram extraídos de Sackinger (2018, p. 47-48), sendo 10Ω a resistência de contato, $0,15 \text{ pF}$ a capacitância de junção do fotodiodo, e $0,05 \text{ pF}$ e $0,1 \text{ nH}$ os valores para a capacitância parasita e indutância parasita, respectivamente.

A variável *iPD1* representa a corrente gerada no fotodiodo. Para simular a taxa de

transferência de dados enviada pela *OLT* (1,25 Gigabits por segundo conforme seu datasheet), foi utilizada uma fonte de corrente com um sinal *PWM* de 50% de razão cíclica (Duty Cycle) e um período de 0,8 nanossegundos. De acordo com Sackinger (2018, p. 51), o valor médio da corrente fotogerada é encontrado através da Equação 3.6.

$$I_{Pd} = R_{es} \cdot P \quad (3.6)$$

Onde P é definido por:

$$P = 10^{(P_{dBm} - 30)/10} \quad (3.7)$$

Onde:

I_{Pd} = Corrente do fotodetector p-i-n (A);

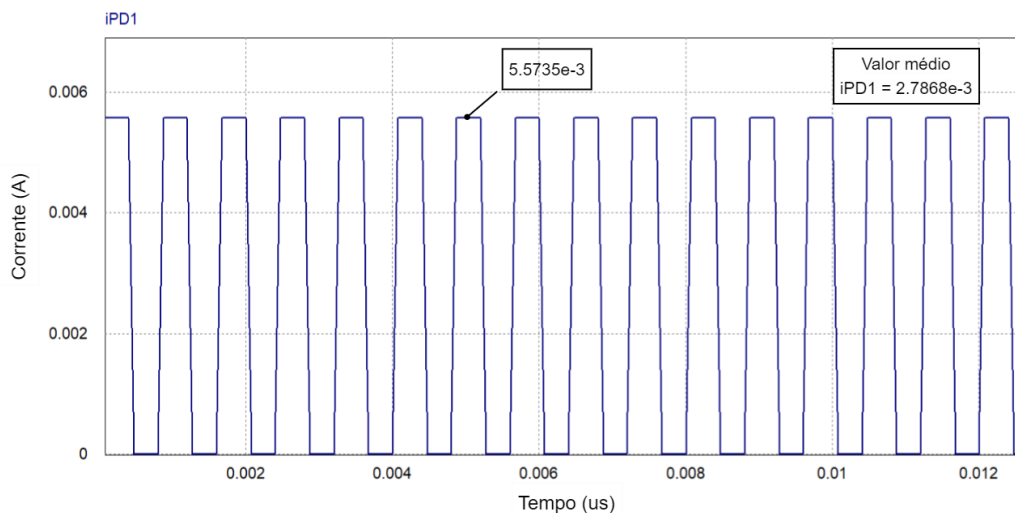
R_{es} = Responsividade do fotodetector (A/W);

P = Potência óptica (W);

P_{dBm} = Potência da fibra óptica em dBm.

Considerando uma responsividade de 0,70 e uma potência de 6 dBm, é possível calcular a corrente média fotogerada. Nesse caso, a corrente média é calculada utilizando as Equações 3.7 e 3.6 respectivamente. A Figura 18 representa o sinal *iPD1* obtido da fonte de corrente com uma taxa de transmissão de 1,25 Gigabits por segundo e uma corrente média de 2,7868 mA.

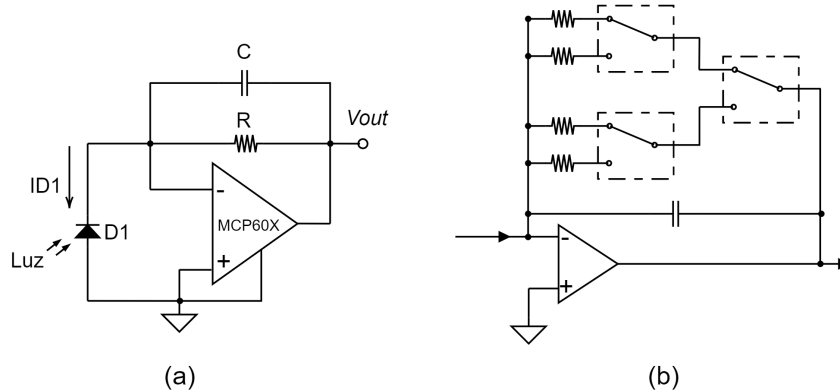
Figura 18 – Corrente *iPD1* fotogerada em simulação.



Fonte: elaborado pelo autor.

No desenvolvimento do circuito eletrônico do amplificador de transimpedância, foram consultados os circuitos disponíveis no datasheet do MCP601 (Microchip, 2007, p. 15) e na patente de Pie-Yau (2005). Esses circuitos eletrônicos são representados na Figura 19.

Figura 19 – Circuito eletrônico do amplificador de transimpedância no modo detector fotovoltaico (a) e o utilizado na patente do *OPM* (b).

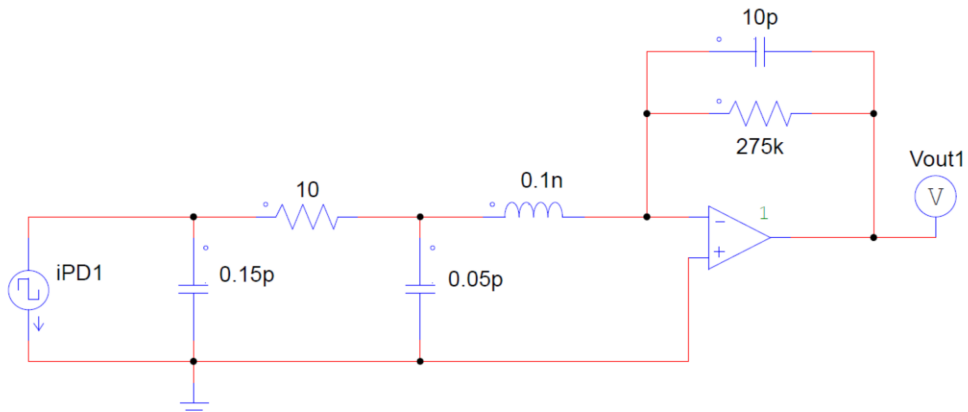


Fonte: Adaptado de Microchip (2007) (a) e Pie-Yau (2005) (b).

Na Figura 19 (a) o amplificador de transimpedância está configurado no modo detector fotovoltaico, e sua tensão de saída é determinada pela Equação 2.1 (Microchip, 2007). Já a capacitância de feedback (C) tem a função de melhorar o tempo de resposta, reduzir o pico de tensão (overshoot) e eliminar a oscilação (Cretu *et al.*, 2021). Na Figura 19 (b) é feito um chaveamento de resistências em paralelo com o intuito de modificar a tensão de saída do amplificador.

Os circuitos da Figura 19 foram utilizados como base para simular o circuito representado na Figura 20. O circuito realiza a identificação das resistências de feedback necessárias para a leitura da tensão de saída, levando em consideração a corrente média de entrada.

Figura 20 – Amplificador de transimpedância simulado no software PSIM.



Fonte: elaborado pelo autor.

O amplificador operacional foi configurado conforme as características do MCP601 (Microchip, 2007), cujas principais especificações estão detalhadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações do amp-op MCP601

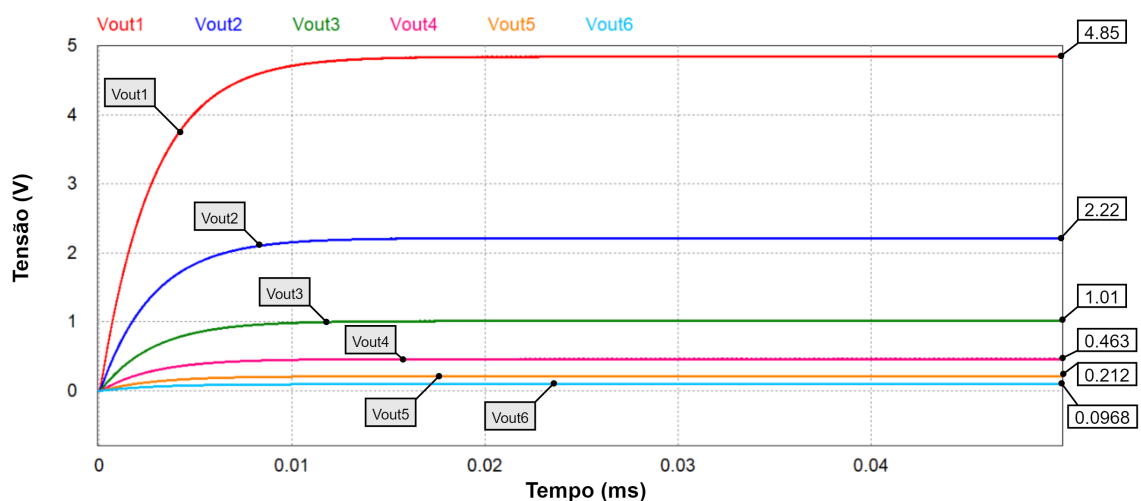
Parâmetros	Valor
Resistência de entrada	$10^{12} \Omega$
Ganho DC A0	5,623 k
Frequência de ganho unitário	2,8 MHz
Resistência de saída	80Ω
Corrente máxima de saída	30 mA
Tensão VCC	5 V
Tensão VEE	0 V

Fonte: elaborado pelo autor.

Para simular a corrente média gerada pelo fotodiodo, foi utilizado uma responsividade de aproximadamente $0,64 \text{ A/W}$, de acordo com o gráfico no datasheet da Optoelectronics (2017, p. 3).

A potência óptica (em dBm) que chega no circuito simulado foi determinada com base na Figura 10. Os valores da tensão de saída do amplificador operacional utilizando uma resistência de feedback de $275 \text{ k}\Omega$ são apresentados no gráfico da Figura 21. Para $V_{\text{out}1}$, foi empregado um valor de $-15,6 \text{ dBm}$, para $V_{\text{out}2}$ foi de -19 dBm e, posteriormente, o sinal foi atenuado gradualmente em $3,4 \text{ dBm}$, alcançando $V_{\text{out}6}$ com um valor de potência de $-32,6 \text{ dBm}$.

Figura 21 – Valores de tensão obtidos com uma resistência de $275 \text{ k}\Omega$.



Fonte: elaborado pelo autor.

Após a tensão $V_{\text{out}6}$ atingir um valor baixo (nesse caso $0,0968 \text{ V}$), uma nova resistência é selecionada para ajustar a tensão de saída próxima de 5 V . As resistências de feedback

utilizadas para os diferentes valores de potência são apresentadas na Tabela 5, onde variável "IPIN média" representa a corrente média simulada do fotodiodo.

Tabela 5 – Valores de tensão simulados a partir das resistências de feedback.

Resistência de feedback (Ω)	Potência (dBm)	Potência (W)	IPIN média (A)	Tensão (V)
275 k	-15,6	27,5423 μ	17,6271 μ	4,85
	-19	12,5893 μ	8,05712 μ	2,22
	-22,4	5,7544 μ	3,68282 μ	1,01
	-25,8	2,63027 μ	1,68337 μ	0,463
	-29,2	1,20226 μ	769,449 n	0,212
	-32,6	549,541 n	351,706 n	0,0968
13,8 M	-32,6	549,541 n	351,706 n	4,85
	-36	251,189 n	160,761 n	2,22
	-39,4	114,815 n	73,4818 n	1,01
	-42,8	52,4807 n	33,5877 n	0,463
	-46,2	23,9883 n	15,3525 n	0,212
	-49,6	10,9648 n	7,01746 n	0,0968
690 M	-49,6	10,9648 n	7,01746 n	4,84
	-53	5,01187 n	3,2076 n	2,21
	-56,4	2,29087 n	1,46616 n	1,01
	-59,8	1,04713 n	670,162 p	0,462
	-63,2	478,63 p	306,323 p	0,211

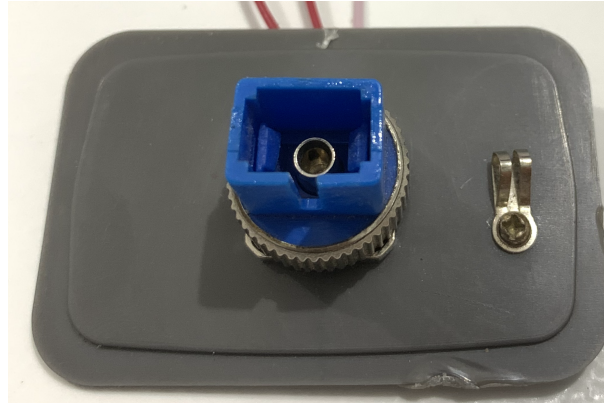
Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme exposto anteriormente, a simulação mostrou-se satisfatória, permitindo a determinação dos valores das resistências de feedback necessárias para realizar as leituras de potências que variam de -15,6 dBm a -63,2 dBm. Utilizando esses valores de resistência como referência, foi possível construir o dispositivo na protoboard.

3.5.2 Testes em laboratório

Após a simulação do circuito, foram realizados os testes em laboratório. Para os primeiros testes, foram utilizados o amplificador operacional MCP601, um capacitor de 10 pF, as resistências de feedback e o fotodiodo p-i-n InGaAs modelo MTPD1346D-100 da fabricante Optoelectronics (2017). Este fotodiodo está com um adaptador para conector óptico SC, representado na Figura 22. Como o amplificador operacional era do tipo *Surface Mounted Device / Componente Montado em Superfície (SMD)*, foi confeccionado um circuito em uma placa de cobre para facilitar as medições.

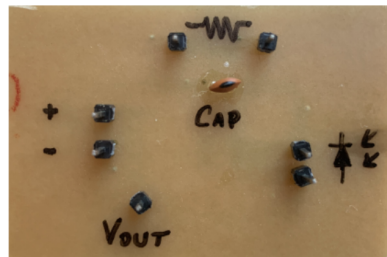
Figura 22 – Fotodiodo p-i-n InGaAs com adaptador para conector óptico SC.



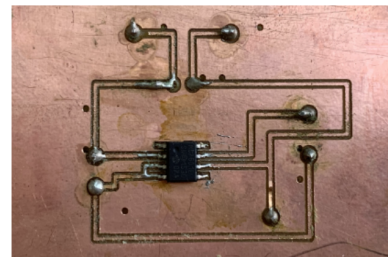
Fonte: elaborado pelo autor.

Para a placa de cobre, o amplificador operacional MCP601, o capacitor de 10 pF e pinos que auxiliam na construção do circuito foram inseridos. A Figura 23 (a) apresenta a frente da placa, enquanto a Figura 23 (b) mostra seu verso.

Figura 23 – MCP601 fixado na placa de cobre: Frente (a) e verso (b).



(a)



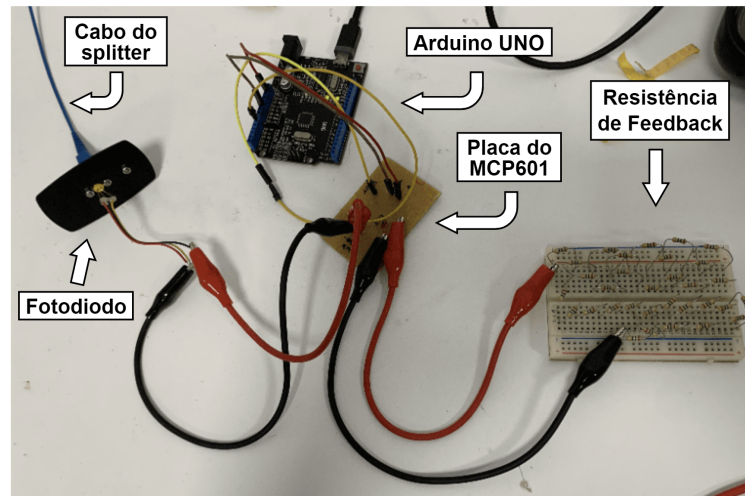
(b)

Fonte: elaborado pelo autor.

Após o desenvolvimento da placa do amplificador operacional, foram conduzidos os testes com a OLT e o cascadeamento dos splitters. As resistências de feedback eram trocadas manualmente, e para a leitura da tensão, utilizou-se a entrada analógica do Arduino UNO. É apresentado um teste como a placa do amplificador operacional na Figura 24. É importante destacar que, para o primeiro protótipo, as medições de tensão foram realizadas sem a presença de capacitores de desacoplamento no circuito, o que pode impactar o valor da tensão de saída

Inicialmente, o valor de potência foi medido por meio de um *optical power meter* comercial que mede uma faixa de -70 dBm a 10 dBm, e em seguida, o valor de tensão foi registrado pelo Arduino UNO.

Figura 24 – Testes de bancada.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para simular o splitter 1/99, onde 1% da potência é direcionada para o circuito, foi utilizado o cascadeamento de dois splitters com razões de 1/16 e 1/8. A potência medida que chega no circuito foi de -16,79 dBm. A partir desse valor de potência, foram feitos os cascadeamentos para atenuação do sinal. Os dados de potência medidos pelo *OPM* e tensão medidos pelo Arduino UNO são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de Potência e Tensão do protótipo 1

Resistência de feedback	Atenuação antes do cascadeamento (dB)	Cascadeamento dos Splitters	Potência medida pelo OPM (dBm)	Tensão medida pelo Arduino UNO (V)
368 k Ω		Sem	-16,79	4,87
		1/2	-20,04	2,3
		1/4	-23,67	0,99
		1/8	-26,71	0,48
		1/16	-30,4	0,2
		1/16 1/2	-33,4	0,1
16,4 M Ω	-22,68	1/16 1/2	-33,4	4,87
		1/16 1/4	-37,58	1,85
		1/16 1/8	-41,03	0,85
		1/16 1/16	-43,62	0,44
		1/16 1/16 1/2	-46,76	0,21
		1/16 1/16 1/4	-50,04	0,09
320 M Ω		1/16 1/16 1/4	-50,04	2,73
		1/16 1/16 1/8	-52,49	1,6
		1/16 1/16 1/8 1/2	-56,22	0,63
		1/16 1/16 1/8 1/4	-59,18	0,3

Fonte: elaborado pelo autor.

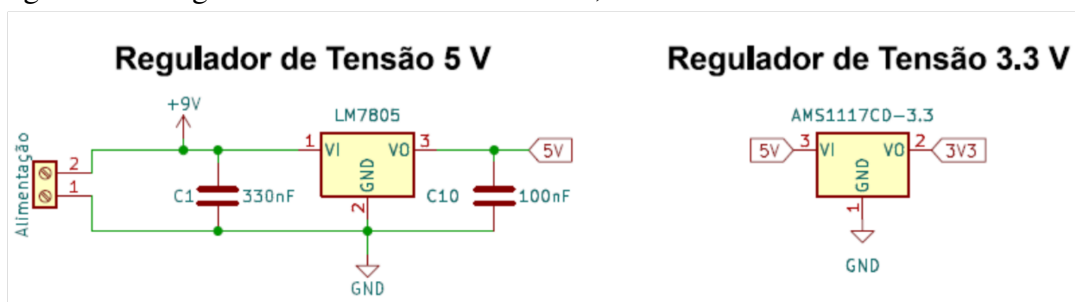
As resistências de feedback utilizadas no experimento, são diferentes das resistências utilizadas na simulação. Essa diferença ocorreu principalmente devido à potência recebida pelo fotodiodo ser inferior, além das interferências nas conexões entre os componentes. Na simulação, a potência era de -15,6 dBm, enquanto no experimento foi de -16,79 dBm. Portanto, foi necessário aumentar as resistências de feedback para obter um valor de tensão de saída maior, próximo de 5 V.

3.5.3 Circuito eletrônico e métodos de construção

Após os testes para determinar as resistências de feedback utilizando a placa do MCP601, foi desenvolvida a placa do protótipo final. Nessa placa, foi adicionado o CD4066B, responsável pelo chaveamento das resistências, e um módulo LoRa NiceRF 1276, responsável pela comunicação com o gateway. O circuito eletrônico da placa do protótipo final está disponível no Apêndice A, o circuito foi elaborado no software de prototipagem KiCad.

Inicialmente, o circuito é alimentado por uma bateria de 9 V. Essa tensão é regulada para 5 V e 3,3 V, necessários para alimentar os circuitos da placa do protótipo final. Os reguladores de tensão utilizados são o LM7805 e o AMS1117 (3,3 V). De acordo com o datasheet do LM7805 (Company, 2018), é necessário utilizar dois capacitores de desacoplamento: um de 330 nF e outro de 100 nF. Os reguladores são apresentados na Figura 25. Essa etapa é importante para garantir o fornecimento estável de energia aos componentes do protótipo, assegurando um funcionamento confiável.

Figura 25 – Reguladores de tensão: 5 volts e 3,3 volts.

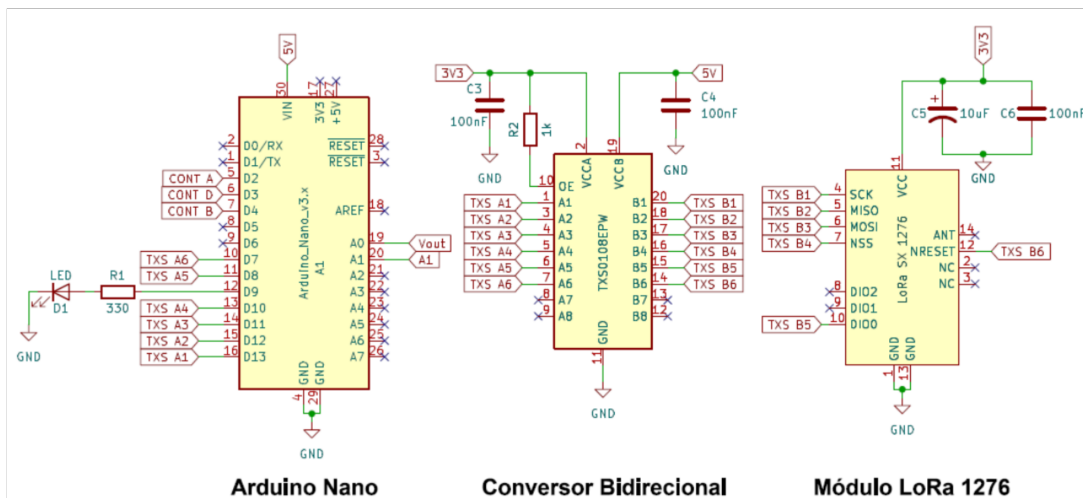


Fonte: elaborado pelo autor.

Para o protótipo final foi utilizado o Arduino Nano V3, que agora é responsável por controlar o chaveamento das resistências de feedback e gerenciar a comunicação por meio do módulo LoRa. O Arduino Nano V3 foi escolhido devido semelhanças com as do Arduino Uno e, principalmente, ao seu tamanho reduzido.

Para estabelecer a comunicação entre o Arduino Nano V3 e o módulo LoRa NiceRF 1276, foi necessário utilizar o conversor bidirecional (ou conversor de nível) TSX0108E. Essa escolha se deve ao fato de que o Arduino Nano V3 opera com transmissão e recepção de dados em 5 volts, enquanto o módulo LoRa 1276 utiliza 3,3 volts para enviar e receber informações. A comunicação direta entre eles, sem o uso do conversor bidirecional, pode resultar em danos às portas do módulo LoRa. O circuito eletrônico do Arduino, do conversor bidirecional e do módulo LoRa é apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Circuito eletrônico Arduino Nano, conversor bidirecional e módulo LoRa RF1276.

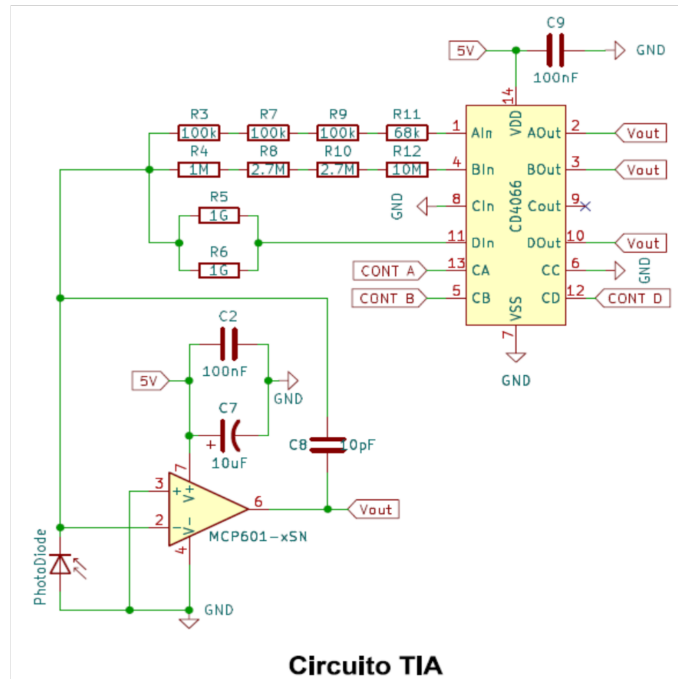


Fonte: elaborado pelo autor.

Vale destacar que, no protótipo final, foram empregados capacitores de desacoplamento com o objetivo de prevenir interferências (ruídos) que poderiam impactar no valor da tensão medida pelo Arduino Nano. Os capacitores empregados na alimentação do módulo LoRa e do conversor bidirecional estão em conformidade com as especificações fornecidas nos datasheets dos respectivos fabricantes G-NiceRF (2017) e Instruments (2023).

O circuito eletrônico do amplificador de transimpedância com o circuito integrado de chaveamento CD4066B é exibido na Figura 27. O fotodiodo p-i-n InGaAs é o mesmo que foi utilizado nos testes do protótipo 1. As capacitâncias empregadas na alimentação do amplificador operacional MCP601 seguem as especificações do fabricante, conforme detalhado no datasheet (Microchip, 2007). Da mesma forma, a distância entre os capacitores e o pino de entrada da alimentação do amplificador operacional MCP601 está em conformidade com as orientações fornecidas pelo fabricante.

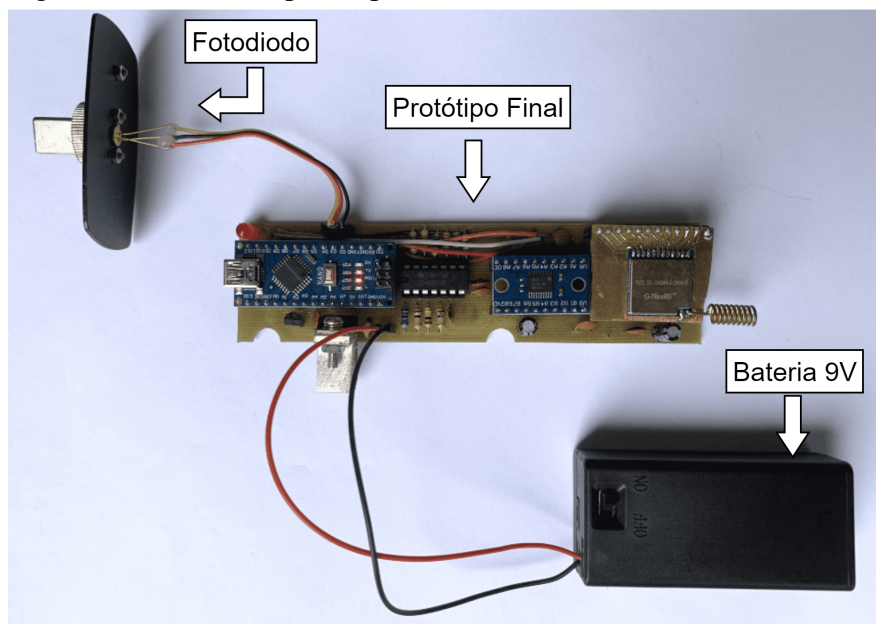
Figura 27 – Circuito eletrônico do amplificador de transimpedância com o CI 4066.



Fonte: elaborado pelo autor.

Após projetar o circuito do protótipo final no software de prototipagem KiCad, a placa do protótipo final foi confeccionada utilizando uma plotter da fabricante LPKF, modelo E33, e seus componentes foram soldados em laboratório. Com a construção física do protótipo foi possível a realização de testes em laboratório para a validação do circuito. A placa do dispositivo é disponibilizada na Figura 28.

Figura 28 – Placa do protótipo final.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.5.4 Gateway

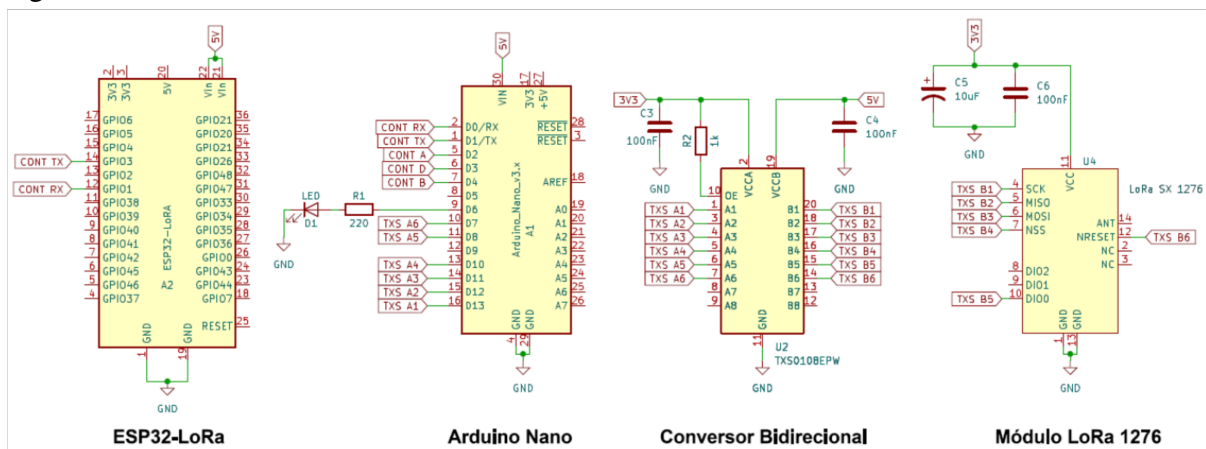
O gateway foi desenvolvido com a finalidade de ser instalado em uma central de fibra óptica. Onde sempre que o usuário solicita a potência óptica ao protótipo final, o sinal é recebido, a potência é medida e o valor medido é enviado de volta para o gateway. Devido à sua conexão ao WiFi local, é possível requisitar informações sobre a potência óptica do protótipo de outros locais, desde que haja acesso à internet.

Neste projeto, o gateway é composto por um Arduino Nano V3, um conversor bidirecional, um módulo LoRa NiceRF 1276 e um ESP LoRa do fabricante Automation (2020). O circuito eletrônico do gateway pode ser encontrado no Apêndice B.

Quanto à alimentação do circuito, esta é fornecida por uma bateria de 9 V. Essa tensão é regulada para obter 5 V e 3,3 V, sendo os reguladores de tensão e o circuito eletrônico de alimentação os mesmos utilizados no protótipo final, conforme apresentado na Figura 25.

A comunicação entre o Arduino, o conversor bidirecional e o módulo LoRa segue uma estrutura semelhante ao circuito eletrônico da Figura 26. A distinção ocorre devido à inclusão de uma comunicação serial entre o Arduino e o ESP LoRa. Dessa forma, o ESP LoRa solicita o envio ou recebimento de informações ao Arduino. O Arduino, por sua vez, realiza a transmissão e recepção de informações utilizando o módulo LoRa, que posteriormente, encaminha esses dados para o ESP LoRa por meio da comunicação serial. O circuito eletrônico do ESP LoRa, Arduino, conversor bidirecional e módulo LoRa é apresentado na Figura 29.

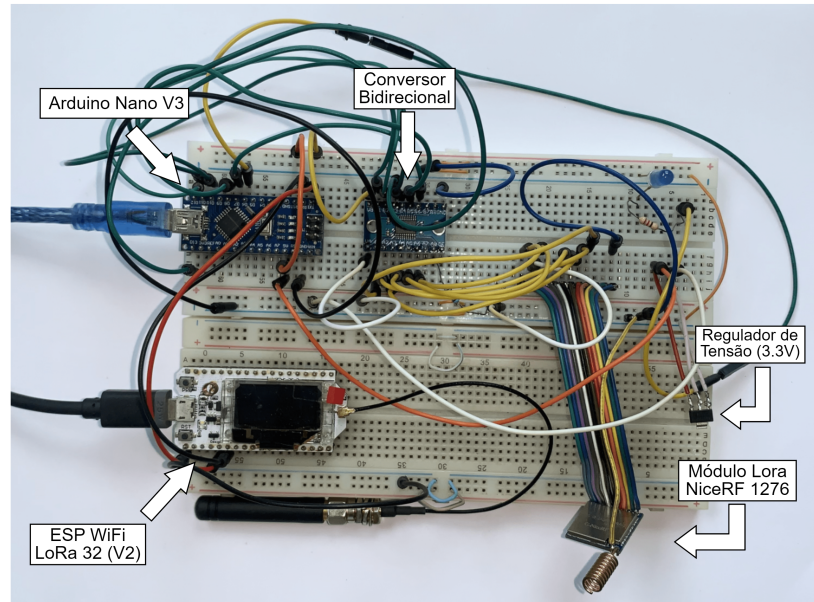
Figura 29 – Circuito eletrônico do ESP LoRa, Arduino, conversor bidirecional e módulo LoRa.



Fonte: elaborado pelo autor.

Após a elaboração do circuito eletrônico do gateway, o seu hardware foi construído. Dessa forma foi possível realizar os testes de comunicação entre o gateway e o dispositivo de medição. A construção do gateway pode ser observada na Figura 30.

Figura 30 – Hardware do gateway.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para realizar a simulação de solicitações de medição vindo da central, foi utilizado o servidor da Ubidots (2023). O código do gateway, através do ESP WiFi LoRa 32 (ESP 32), realiza a comunicação com o servidor através do protocolo MQTT. Ao clicar no botão, o servidor requisita para o ESP 32 enviar uma solicitação. Essa solicitação é enviada do ESP 32 para o Arduino Nano através da comunicação serial entre eles. A Figura 31 apresenta o servidor e dois monitores seriais da IDE do Arduino realizando uma verificação de potência do dispositivo.

Figura 31 – Exemplo de verificação de potência utilizando o gateway.

Conexão do ESP com a rede WiFi e MQTT

Botão de solicitação

Mensagem enviada pelo dispositivo

Fonte: elaborado pelo autor.

O monitor serial "COM3" que está conectado no ESP 32. Nele é possível verificar a conexão do ESP 32 com o WiFi do Local e com o servidor da Ubidots através do protocolo MQTT.

Já o segundo monitor serial "COM5" é referente ao Arduino Nano. Nele é possível observar dois valores de potência que ele recebeu do dispositivo medidor de potência. Esses valores de potência são enviados para o ESP 32 através da comunicação serial, e posteriormente enviados para o servidor da Ubidots.

4 RESULTADOS

Após a simulação, os testes em bancada, a projeção e montagem do protótipo final, o dispositivo foi submetido a testes em laboratório para validar suas funcionalidades. Foram combinados elementos atenuadores do sinal da fibra (splitters) para obter um faixa de sinal que simule o cenário em campo, onde existem perdas como por exemplo, as perdas por conexões, perdas por quilometragens de fibra e perdas na caixa CEO.

Devido a simulação do cenário em campo, o dispositivo passou por uma configuração nas resistências, onde os detalhes dessa adequação, bem como os resultados do estado final do protótipo serão mostrados a seguir.

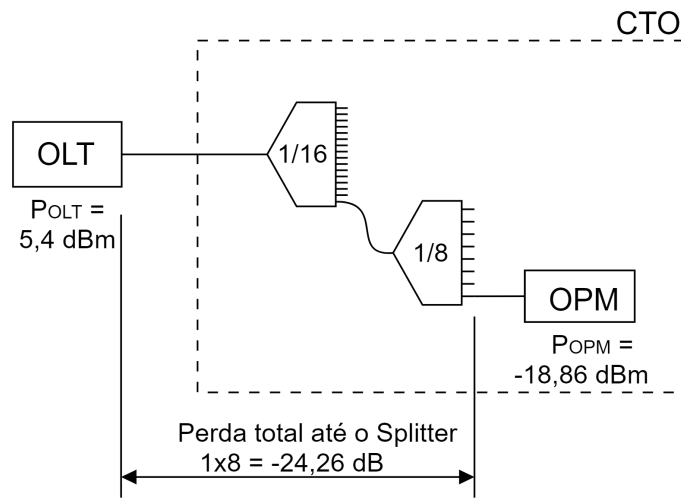
4.1 Montagem da Bancada para Testes

Os testes tiveram início com a montagem e configuração de um ambiente laboratorial propício para obtenção dos resultados finais, onde foram adotadas configurações semelhantes às apresentadas na simulação e nos testes em bancada.

Portanto, foi empregado um sistema de cascadeamento de splitter, a fim de simular a perda de 1% que ocorre em um splitter desbalanceado de 1/99, visto que o laboratório não dispunha de um splitter desta configuração. O sistema adotado foi o cascadeamento dos splitters balanceados de 1/16 e 1/8, que produziram uma atenuação de -24,26 dB.

Após essa configuração, foi realizada a mensuração da potência que a *OLT*, localizada no laboratório para testes, emite. Onde foi registrada uma potência de 5,4 dBm. Com processo de cascadeamento, o valor medido pelo *optical power meter* foi de -18,86 dBm, totalizando uma perda de -24,26 dB entre a *OLT* e o *optical power meter*. Essa diferença entre o valor teórico e o valor obtido no laboratório, podem ser ocasionados por diversos fatores, por exemplo, as perdas nas conexões entre a fibra e à *OLT* e aos próprios splitters. A Figura 32 apresenta o valor de potência medido pelo *OPM*, após a aplicação do cascadeamento de splitters.

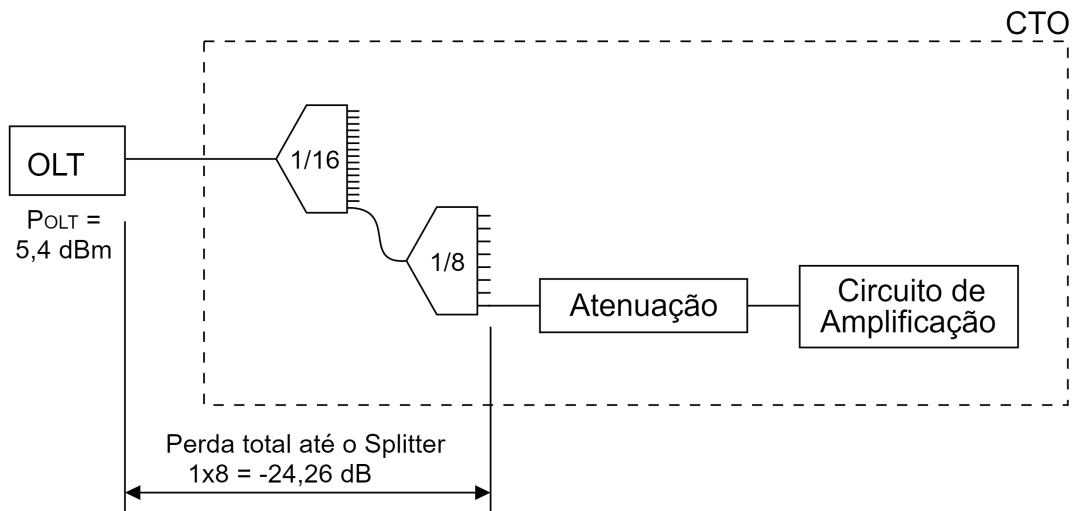
Figura 32 – Adaptação de um splitter 1/99.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 33 detalha o processo de cascadeamento de splitters utilizados para a atenuação da potência do sinal originado na *OLT*.

Figura 33 – Atenuação do sinal utilizando cascadeamento de splitters.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.2 Configurações no Protótipo Final

Com o ambiente de testes montado, partiu-se para as configurações no protótipo final. Como detalhado no Capítulo 03, o amplificador de transimpedância possui um conjunto de resistências, chamadas de resistências de feedback, essas resistências são responsáveis pela determinação da taxa de amplificação da tensão.

Desta forma, para o protótipo final foram definidas as três resistências de feedback utilizadas. A definição dessas resistências seguiu o mesmo método das resistências adotadas na

simulação e nos testes em protoboard. As resistências utilizadas na simulação e na protoboard, não foram utilizadas no protótipo final, pois ao serem aplicadas a tensão desejada não foi alcançada, portanto foram utilizadas valores diferentes dos que antes foram testados. Diante disso, as resistências de feedback aplicadas ao protótipo final possuem os seguintes valores: 368 k Ω , 16,4 M Ω e 500 M Ω , que correspondem a RF1, RF2 e RF3, respectivamente. Para chegar nesses valores de resistências, foram utilizadas resistores comerciais disponíveis no mercado.

Cabe destacar, que as resistências de feedback utilizadas foram submetidas as mesmas técnicas e métodos, que as resistências utilizadas na simulação e nos testes em protoboard. Nesse caso, foram utilizados potenciômetros para encontrar as resistências de feedback através do método da tentativa e erro. Os valores de tensão e potência responsáveis por gerarem os gráficos de dispersão são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores obtidos com o dispositivo final e o OPM

Resistência de feedback (Ω)	Atenuação (dB)	Cascadeamento dos splitters				Tensão (V)	Potência medida pelo OPM (dBm)
368 k (100k + 100k + 100k + 68k)	-24,26	Sem				4,13	-18,86
		1/2				2,32	-21,4
		1/4				1,09	-23,8
		1/8				0,48	-27,18
		1/16				0,24	-30,13
		1/16 1/2				0,09	-34,02
16,4 M (1M + 2,7M + 2,7M + 10M)		1/16 1/2				4,32	-34,7
		1/16 1/4				2,49	-36,9
		1/16 1/8				1,17	-40,4
		1/16 1/16				0,63	-43,4
		1/16 1/16 1/2				0,26	-47
		1/16 1/16 1/4				0,12	-49,8
500 M (1 G // 1 G)	1/16 1/16 1/4				3,62	-49,8	
	1/16 1/16 1/8				1,93	-52,38	
	1/16 1/16 1/8 1/2				0,87	-55,98	
	1/16 1/16 1/8 1/4				0,35	-59,7	
	1/16 1/16 1/8 1/8				0,13	-63,8	

Fonte: elaborado pelo autor.

Ao consultar o gráfico de dispersão de cada uma dessas resistências, foi possível notar que o coeficiente de dispersão de cada uma delas (RF1, RF2 e RF3) possui uma linha de tendência aproximando-se de 1. Isso indica que a equação da linha de tendência se ajusta satisfatoriamente aos dados, conforme a literatura. Os coeficientes de determinação de RF1, RF2 e RF3, foram respectivamente: 0,9976; 0,9991; e 0,9997.

Com a aplicação dessas resistências, foi possível evidenciar variações na potência. Ao empregar a resistência de feedback 1 (RF1), o amp-op é capaz de detectar uma variação de potência entre aproximadamente -34,02 dBm e -18,86 dBm. Com a aplicação de RF2, o amp-op é capaz de detectar uma variação de potência entre aproximadamente -49,8 dBm e -34,7 dBm. Por fim, ao utilizar RF3, o amp-op é capaz de detectar uma variação de potência compreendida entre aproximadamente -63,8 dBm e -49,8 dBm.

Ao utilizar as três resistências de feedback, é possível abranger uma faixa de potência entre aproximadamente -63,8 dBm e -18,86 dBm. Com esse range é possível encontrar as equações do gráfico de dispersão de cada resistência de feedback.

Para o algoritmo do microcontrolador, o protótipo final precisa informar ao gateway a potência que está chegando para o cliente, desconsiderando a atenuação gerada para simular a potência de 1% do sinal que vai para o circuito de amplificação. Dessa forma, ao considerar as três resistências de feedback e adicionar os 24,26 dB a cada equação, é possível abranger uma faixa de potência entre -42,87 dBm e 5,42 dBm (Ver Tabela 8). Em comparação com a simulação, o dispositivo final apresenta uma faixa de potência mais ampla, visto que na simulação foi possível abranger uma faixa entre -41,6 dBm e 6 dBm, enquanto o dispositivo alcançou uma faixa entre -42,87 dBm e 5,42 dBm.

As equações das resistências (*RF*) utilizadas no código do dispositivo para informar a potência que chega no cliente, foram:

$$y = 490,51 \cdot e^{0,2535 \cdot (x)} + 24,26 \quad (4.1)$$

$$y = 13956 \cdot e^{0,2326 \cdot (x)} + 24,26 \quad (4.2)$$

$$y = 480587 \cdot e^{0,2368 \cdot (x)} + 24,26 \quad (4.3)$$

4.3 Validação do dispositivo

Após todos os ajustes realizados para os testes finais, e com o emprego das equações 4.1, 4.2 e 4.3, foi possível determinar a potência do sinal que a *OLT* está enviando para o splitter da CTO em que está instalado. Os valores medidos pelo protótipo final após serem solicitados pelo gateway são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Potência enviada pelo protótipo final ao gateway.

Resistência de feedback (Ω)	Atenuação (dB)	Cascateamento dos splitters					Tensão (V)	Potência enviada para o gateway (dBm)
368 k (100k + 100k + 68k)	-24,26	Sem					4,13	5,42
		1/2					2,32	3,14
		1/4					1,09	0,16
		1/8					0,48	-3,07
		1/16					0,24	-5,81
		1/16				1/2	0,09	-9,68
16,4 M (1M + 2,7M + 2,7M + 10M)		1/16 1/2					4,32	-10,48
		1/16 1/4					2,49	-12,85
		1/16 1/8					1,17	-16,10
		1/16 1/16					0,63	-18,76
		1/16 1/16				1/2	0,26	-22,56
		1/16 1/16				1/4	0,12	-25,89
500 M (1 G // 1 G)	1/16 1/16 1/4					3,62	-25,56	
	1/16 1/16 1/8					1,93	-28,21	
	1/16 1/16 1/8				1/2	0,87	-31,58	
	1/16 1/16 1/8				1/4	0,35	-35,42	
	1/16 1/16 1/8				1/8	0,13	-39,60	
	1/16 1/16 1/8			1/8	1/2	0,06	-42,87	

Fonte: elaborado pelo autor.

Como mencionado no capítulo anterior, o menor valor de potência permitido que pode chegar ao cliente é de -32 dBm. Potências abaixo desse valor indicam possíveis irregularidades na rede óptica do cliente. Entre os problemas estão a má conexão entre os splitters, curvas da fibra óptica acima do permitido ou até mesmo rompimento na fibra. Ao analisar a Tabela 8, observa-se que o protótipo consegue medir valores entre -42,87 dBm e 5,42 dBm, ou seja, ele consegue medir uma faixa de potência maior do que a delimitada pela OLT.

Para verificar a confiabilidade do dispositivo, foram efetuados testes de medição onde se comparava o valor medido pelo sensor e o valor medido pelo *OPM*, utilizando a mesma técnica de cascadeamento das medições anteriores. Para obter e visualizar estes dados foi utilizado o monitor serial da IDE do Arduino. A Tabela 9 apresenta a comparação dos resultados.

Tabela 9 – Comparação das medições do dispositivo e do OPM.

Atenuação (dB)	Potência medida pelo dispositivo (dBm)	Potência medida pelo OPM (dBm)	Erro relativo percentual (%)
-24,26	-18,84	-18,86	0,08
	-21,12	-21,4	1,31
	-24,10	-23,8	1,26
	-27,33	-27,18	0,57
	-30,07	-30,13	0,20
	-33,94	-34,02	0,24
	-34,74	-34,7	0,11
	-37,11	-36,9	0,56
	-40,36	-40,4	0,11
	-43,02	-43,4	0,88
	-46,82	-47	0,38
	-50,15	-49,8	0,69
	-49,82	-49,8	0,03
	-52,47	-52,38	0,17
	-55,84	-55,98	0,26
-59,68	-59,7	0,03	
-63,86	-63,8	0,10	
-67,13	SEM LEITURA		

Fonte: elaborado pelo autor.

Ao analisar a Tabela 9, observa-se que os erros relativos entre as medições realizadas pelo dispositivo e pelo *OPM* são muito pequenos. A maior margem de erro apresentada foi de apenas 1,31%. Vale ressaltar que durante as medições, o dispositivo conseguiu captar uma potência de -67,13 dBm, enquanto que o *OPM* saturou, não sendo capaz de realizar essa medição. Esses resultados indicam a eficácia e confiabilidade do dispositivo, destacando sua capacidade de fornecer medições precisas em comparação com o *OPM*. A consistência entre os valores medidos reforça a validade e a utilidade do dispositivo na avaliação da potência óptica em sistemas de fibra óptica.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho descreveu o desenvolvimento de um sistema de medição de potência óptica para fibra óptica, com o propósito de avaliar o sinal fornecido aos usuários, utilizando o protocolo de comunicação LoRaWAN.

Em meio ao desenvolvimento do protótipo, ocorreram situações que precisaram ser avaliadas e alteradas. Durante a etapa de projeção do sistema, cogitou-se a utilização do sistema embarcado ESP LoRa, devido ao dispositivo possuir um microcontrolador e um módulo LoRa em sua estrutura. No entanto, o sistema demanda uma tensão de aproximadamente 9 V, e o ESP somente opera com 3,3 V. Com isso, a utilização deste dispositivo foi descartada, optando-se pelo Arduino Nano V3 em conjunto com um módulo LoRa e um conversor bidirecional.

Outro ponto relevante é que, possivelmente devido à simulação utilizar as características de um fotodiodo p-i-n convencional e aos testes em protoboard serem conduzidos sem a inclusão de capacitores de desacoplamento, as resistências de feedback na simulação, no protótipo 1 e no dispositivo final divergiram. Além de que os valores de potência utilizados em cada situação foram diferentes.

Após os ajustes, foi possível conduzir os testes e constatar que o sistema proposto e elaborado nesta pesquisa se destaca, apresentando vantagens em comparação aos dispositivos comerciais. O principal diferencial está na faixa de potência alcançada pelo sistema proposto, onde o dispositivo conseguiu medir um range de -42,87 dBm à 5,42 dBm, mostrando sua eficiência em captar as possíveis perdas causadas em campo.

Além desse diferencial, o sistema apresenta uma interface que permite informar ao usuário o valor da potência medida na sua rede de fibra óptica sempre que necessário. Esse processamento ocorre por meio do gateway. Vale ressaltar que o sistema é classificado como inteligente, integrando-se à categoria de dispositivos *IoT*.

O dispositivo possibilita, ainda, o monitoramento remoto em momentos de manutenção. Sendo capaz de transmitir dados de potência de modo remota, possibilitando uma economia de tempo e mão-de-obra, ao mesmo tempo em que permite uma análise em tempo real do estado da rede.

Pode-se concluir que o sistema proposto se destaca pela inovação, apresentando potencial para a otimização de sistemas ópticos. Os resultados obtidos evidenciam a eficácia e

a aplicabilidade do sistema, sendo uma contribuição significativa para o avanço no campo dos sistemas ópticos.

5.1 Trabalhos Futuros

Em trabalhos futuros, deseja-se realizar algumas melhorias para otimização do protótipo final. Com a finalidade de redução de custos, de ampliar a faixa de potência, ajustes na alimentação e melhorias na interface e comunicação do sistema.

Com esse propósito, o primeiro trabalho futuro é aprimorar o protótipo para utilizar o sistema embarcado ESP LoRa, realizando ajustes na alimentação do sistema para acomodar o embarcado. Essa mudança de microcontrolador ocorre devido à redução de custos, uma vez que o sistema teria o microcontrolador e o LoRa integrados em um único sistema embarcado. Além dessa alteração, deseja-se utilizar o splitter de 1/99 desbalanceado em vez do cascadeamento dos splitters 1/8 e 1/16 balanceados, para que haja uma economia de espaço dentro da CTO.

Outro ajuste futuro consiste em otimizar o Gateway utilizado para comunicar-se com o protótipo final, o qual foi construído para validar o funcionamento deste. É plenamente possível desenvolver um gateway mais robusto, que demande menos componentes.

O protótipo foi desenvolvido para estar inserido dentro das CTOs, realizando as medidas da potência da fibra óptica sempre que solicitado ou quando houver uma falha na rede. Em trabalhos futuros, pretende-se criar um protótipo menor, capaz de se acomodar dentro da CTO. Além disso, deseja-se realizar testes com a finalidade de otimizar a economia de energia e realizar ajustes de corrente baseados nas leituras do sensor de temperatura.

REFERÊNCIAS

AGRELL, E.; KARLSSON, M.; CHRAPLYVY, A. R.; RICHARDSON, D. J.; KRUMMRICH, P. M.; WINZER, P.; ROBERTS, K.; FISCHER, J. K.; SAVORY, S. J.; EGGLETON, B. J.; SECONDINI, M.; KSCHISCHANG, F. R.; LORD, A.; PRAT, J.; TOMKOS, I.; BOWERS, J. E.; SRINIVASAN, S.; BRANDT-PEARCE, M.; GISIN, N. Roadmap of optical communications. **Journal of Optics**, v. 18, n. 6, p. 063002, jun. 2016. ISSN 2040-8978, 2040-8986. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2040-8978/18/6/063002>.

ANATEL. **INFOGRÁFICO SETORIAL DE TELECOMUNICAÇÕES - FEV/2022**. 2022. Disponível em: https://sei.anatel.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?eEP-wqk1skrd8hSlk5Z3rN4EVg9uLJqrLYJw_9INcO64YqHrlAMQv6UbFt7rY_EvwmlpuyS0KTqHatd7yr-PfJhjOsmVqh30Pawxe9KZ5hVKUvSfh8IMnGgiFAxwkjO. Acesso em: 11 nov. 2023.

AREVALO, G.; SIERRA, J. Redes WDM PON: Tendencias y Propuestas Para Viabilizar y Optimizar su Implementación. **Revista Politécnica**, v. 35, n. 1, p. 103–103, fev. 2015. ISSN 2477-8990. Disponível em: https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/503.

AUTOMATION, H. **WiFi LoRa 32(V3)**. 2020. Disponível em: <https://resource.heltec.cn/download/Manual%20Old/WiFi%20Lora32Manual.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2023.

CARRION, P.; QUARESMA, M. Internet da coisas (iot): Definições e aplicabilidade aos usuários finais. **Human Factors in Design**, v. 8, n. 15, p. 049–066, 2019.

COMPANY, S. **LM7805 datasheet, Positive voltage regulator ICs**. 2018. Disponível em: <https://www.st.com/en/power-management/l78.html#overview>. Acesso em: 26 nov. 2023.

CONEC. **Os principais problemas em uma rede óptica e como evitá-los**. 2023. Disponível em: <https://dconectelecom.com.br/2023/04/28/os-principais-problemas-em-uma-rede-optica-e-como-evita-los/>. Acesso em: 11 nov. 2023.

CRETU, V. F.; KEHL, F.; METZ, B. C.; WILLIS, P. A. Open-source lab hardware: Low noise adjustable two-stage gain transimpedance amplifier with dc offset for low-light detection. **HardwareX**, Elsevier, v. 10, p. e00233, 2021.

DUTTON, H. J. R. **Understanding optical communications**. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall PTR, 1998. (The ITSO networking series). ISBN 9780130201416.

ELECTRIC, F. **SPLITTER ÓPTICO 1XN BALANCEADO | Furukawa Electric LatAm**. 2021. Disponível em: <https://www.furukawatam.com/pt-br/catalogo-de-produtos-detalhes/splitter-optico-1xn-balanceado-abnt>. Acesso em: 12 dez. 2023.

FONTES, P. **Contratar provedor de internet: o que seus clientes avaliam?** 2019. Disponível em: <https://www.cianet.com.br/gestao-e-boas-praticas/contratar-provedor-de-internet/>. Acesso em: 11 nov. 2023.

FURUKAWA. **SPLITTER ÓPTICO 1XN DESBALANCEADO | Furukawa Electric LatAm**. 2021. Disponível em: <https://www.furukawatam.com/pt-br/catalogo-de-produtos-detalhes/splitter-optico-1xn-desbalanceado>. Acesso em: 12 dez. 2023.

G-NICERF. **FCC Certified 915MHz SX1276 LoRa Module LoRa1276|NiceRF**. 2017. Disponível em: <https://www.nicerf.com/item/sx1276-lora-module-lora1276>. Acesso em: 26 nov. 2023.

HELENE, O. **Método dos Mínimos Quadrados**. [S. l.]: Editora Livraria da Física, 2013.

INSTRUMENTS, T. **TXS0108E data sheet, product information and support | TI.com**. 2023. Disponível em: <https://www.ti.com/product/TXS0108E?dcmp=dsproject&hqs=td&#doctype2>. Acesso em: 26 nov. 2023.

JÚNIOR, F. F. Testes em fibras ópticas utilizando o otdr: parâmetros de configuração do instrumento. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, v. 3, n. 2, p. 81–92, 2021.

KAO, K.; HOCKHAM, G. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 113, n. 7, p. 1151–1158, jul. 1966. ISSN 0020-3270, 2053-7891. Disponível em: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/piee.1966.0189>.

KEISER, G. **Optical communications essentials**. New York: McGraw-Hill, 2003. (McGraw-Hill networking professional). ISBN 9780071412049.

LAVIERI, D.; SWITCHES, A. V. D. U. D.; CAMADA, D.; ES, V. V. Escola superior aberta do brasil–esab curso de pós-graduação lato sensu em redes de computadores.

MICROCHIP. **MCP601 Datasheet**. 2007. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/74938/MICROCHIP/MCP601.html>. Acesso em: 14 fev. 2023.

OPTOELECTRONICS, M. **InGaAs PIN Photodiode Datasheet**. 2017. Disponível em: https://br.mouser.com/datasheet/2/1094/MTPD1346D_100-1900758.pdf. Acesso em: 20 mai. 2023.

PAIVA, G. E. R. **Estudo de esquemas de amplificação para redes PON de longo alcance**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 2012.

PALA, L. O. d. O. **Revisitando a estimação de coeficiente de determinação**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Alfenas, 2019.

PEREIRA, F. **PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA OTIMIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE REDES GPON**. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2013.

PIE-YAU, W. X.-Y. C. | **Optical Power Meter Download**. 2005. Disponível em: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/034859708/publication/US2005184221A1?q=pn%3DUS2005184221A1>. Acesso em: 14 nov. 2023.

PINHEIRO, J. M. d. S. **Redes ópticas de acesso em telecomunicações**. [S. l.]: Elsevier, 2017. ISBN 9788535286137.

RUA, M. G. **Difusão de Zn em fotodiodos de InGaAs/InP para detecção infravermelha**. Tese (Doutorado) – PUC-Rio, 2019.

SACKINGER, E. **Analysis and design of transimpedance amplifiers for optical receivers**. Hoboken, NJ: Wiley, 2018.

SILVA, J. P. S. B. d. *et al.* Plataforma de teste de gateway lora para iot baseada em sdr. Universidade Federal da Paraíba, 2023.

SILVA, M. A. d. Redes ópticas passivas e as redes lan. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

SKALJO, E.; MUJICIC, A.; SULJANOVIC, N. Usage of Optical Power Meter in Passive Optical Networks. **Fiber and Integrated Optics**, v. 30, n. 5, p. 308–321, out. 2011. ISSN 0146-8030, 1096-4681. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01468030.2011.607886>.

SOUSA, A. Coeficiente de correlação de pearson e coeficiente de correlação de spearman : o que medem e em que situações devem ser utilizados? **Correio dos Açores**, p. 19–19, 2019. Disponível em: <https://repositorio.uac.pt/handle/10400.3/5365>.

TORMANN, S. M. *et al.* **Métodos de otimização combinatória aplicados ao problema de projeto de redes FTTx**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2023.

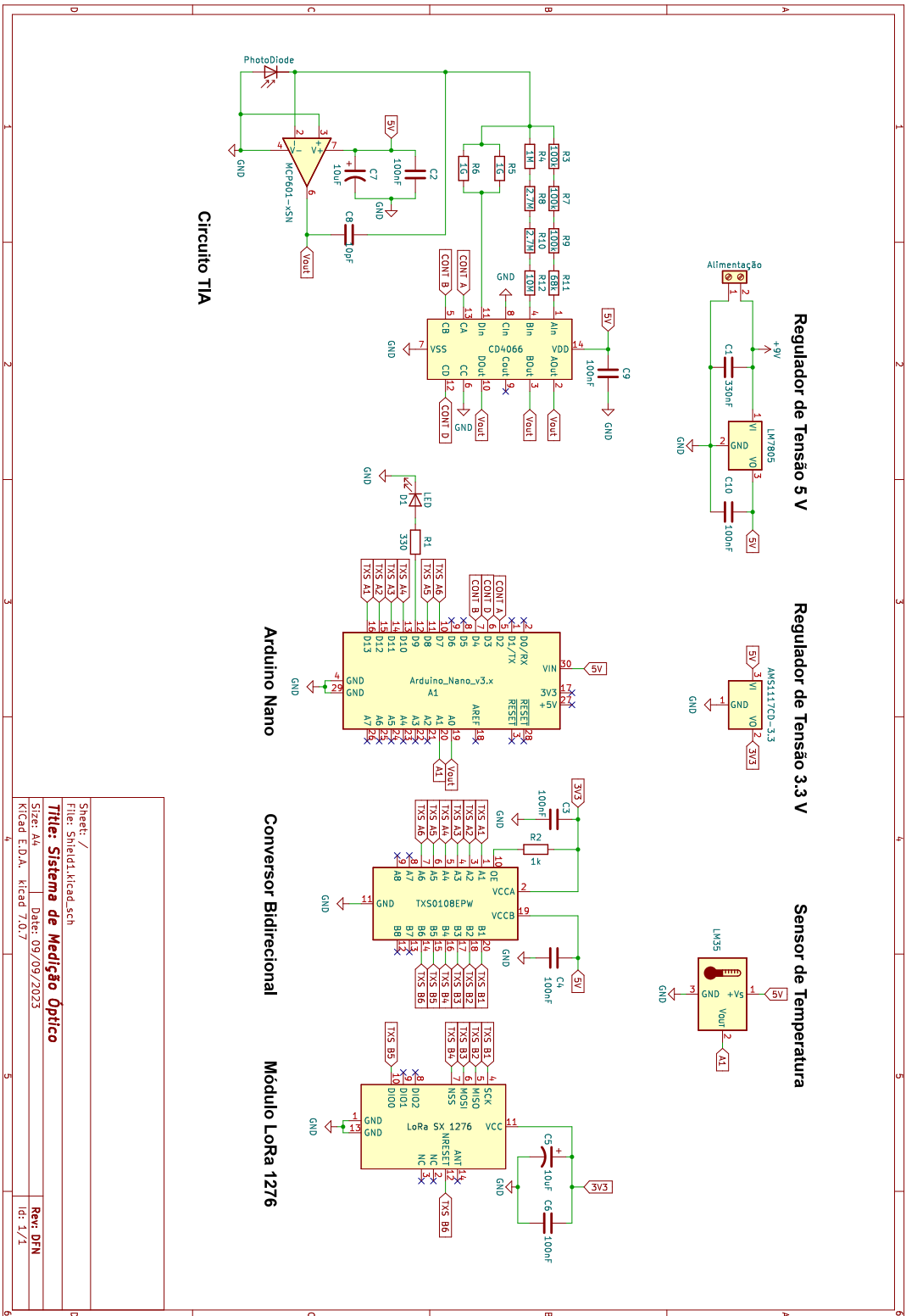
UBIDOTS. **Ubidots** I. 2023. Disponível em: <https://stem.ubidots.com/accounts/signin/?next=/app/dashboards/64f9c989ce75a424227b3b80>. Acesso em: 12 nov. 2023.

VILLALBA, T. V. **Distribuição de divisores de potência em redes ópticas passivas utilizando algoritmos genéticos**. Tese (Doutorado) – São Carlos, Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, 2009.

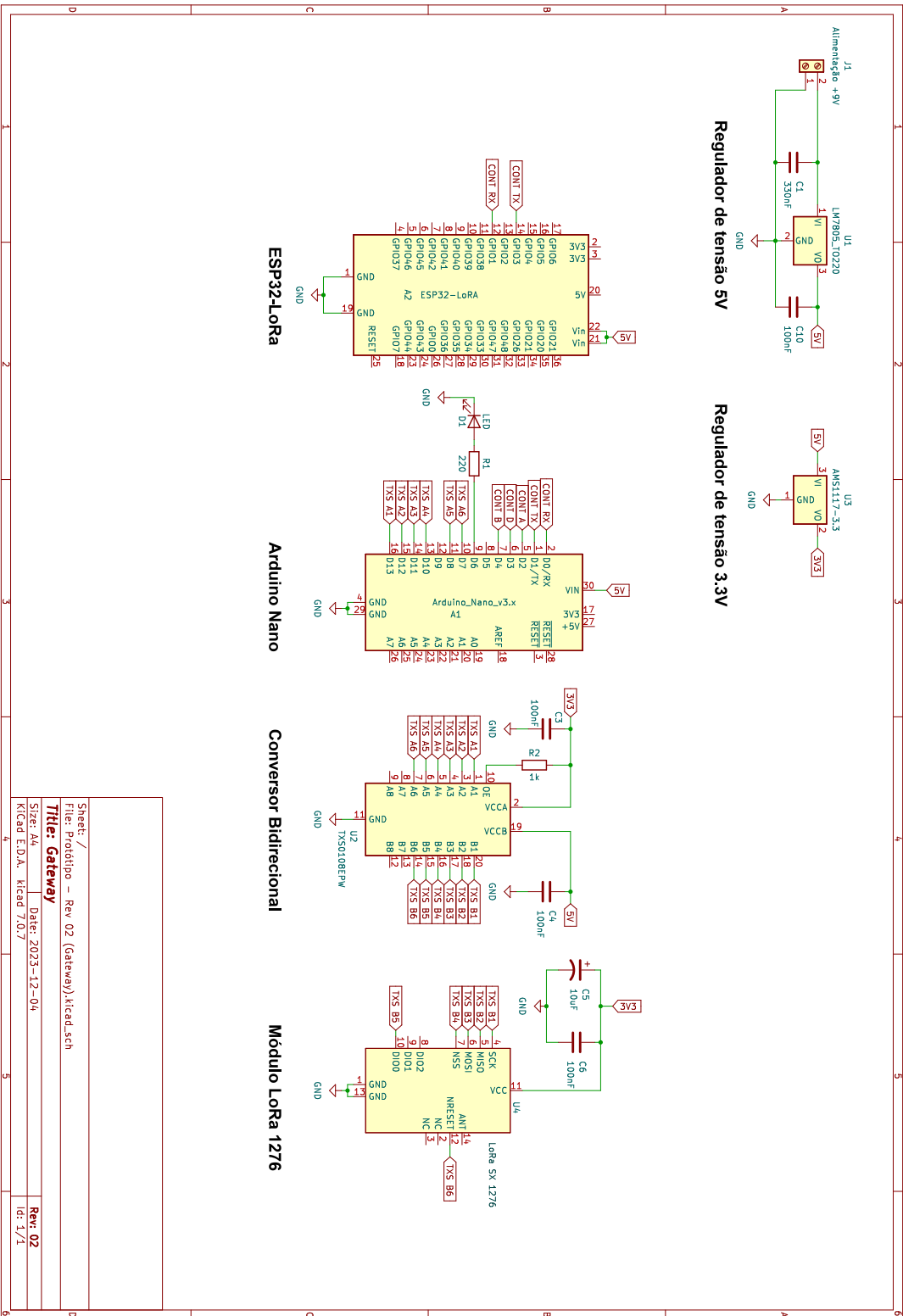
VSOL. **16 Port EPON OLT**. 2023. Disponível em: https://flytec.com.py/download/files/VSOL%20EPON%20L3%20OLT%20DataSheet%20V1_4.pdf. Acesso em: 20 mai. 2023.

WEBER, R. H.; WEBER, R. **Internet of Things: Legal Perspectives**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 9783642117091 9783642117107. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-642-11710-7>.

APÊNDICE A – CIRCUITO ELETRÔNICO DO DISPOSITIVO



APÊNDICE B – CIRCUITO ELETRÔNICO DO GATEWAY



Sheet: /
 File: Prototipo - Rev 02 (Gateway).kicad_sch
Title: Gateway
 Size: A4
 Kicad E.U.A. kicad 7.07

Date: 2023-12-04
 Rev: 02
 Id: 17/1

APÊNDICE C – ALGORITMOS UTILIZADOS NO PROJETO**DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO ÓPTICA (PROTÓTIPO FINAL)**

```
1
2 #include "LoRa_Rx_Tx.h"
3
4 const int CONT_1 = 2; // Pino do CONT 1
5 const int CONT_2 = 3; // Pino do CONT 2
6 const int CONT_4 = 4; // Pino do CONT 4
7 const int ANALOG_IN = A0; // Pino da entrada analogica
8 const int ledPin = 6; // Novo pino para o LED
9
10 float voltage = 0; // Valor da tensao lido da entrada
    analogica
11 float power = 0; // Valor da potencia calculado a partir da
    tensao
12
13 String comando_chave = "rqst";
14
15 void setup() {
16     pinMode(CONT_1, OUTPUT);
17     pinMode(CONT_2, OUTPUT);
18     pinMode(CONT_4, OUTPUT);
19     pinMode(ledPin, OUTPUT);
20     Serial.begin(115200);
21     digitalWrite(CONT_1, HIGH);
22     setupLoRa();
23 }
24
25 void loop() {
26     // CONT 1
27     String comando = rxLoRaPacket();
```

```
28
29  if (comando == comando_chave)
30  {
31      Serial.println("Chegou comando");
32      digitalWrite(ledPin, HIGH);
33      delay(500);
34      digitalWrite(ledPin, LOW);
35
36      if (digitalRead(CONT_1) == HIGH) {
37          voltage = (5.0 / 1023.0) * analogRead(ANALOG_IN);
38          power = log(voltage / 490.51) / 0.2535 + 24.26;
39          Serial.print("CONT 1 - Tensao: ");
40          Serial.print(voltage);
41          Serial.print("V / Potencia: ");
42          Serial.print(power);
43          Serial.println("dBm");
44          if (voltage < 0.075) {
45              digitalWrite(CONT_1, LOW);
46              digitalWrite(CONT_2, HIGH);
47              digitalWrite(CONT_4, LOW);
48              delay(2000);
49          }
50      }
51      // CONT 2
52      if (digitalRead(CONT_2) == HIGH) {
53          voltage = (5.0 / 1023.0) * analogRead(ANALOG_IN);
54          power = log(voltage / 13956) / 0.2326 + 24.26;
55          Serial.print("CONT 2 - Tensao: ");
56          Serial.print(voltage);
57          Serial.print("V / Potencia: ");
58          Serial.print(power);
59          Serial.println("dBm");
```

```
60     if (voltage < 0.12) {
61         digitalWrite(CONT_1, LOW);
62         digitalWrite(CONT_2, LOW);
63         digitalWrite(CONT_4, HIGH);
64         delay(2000);
65     } else if (voltage > 4.32) {
66         digitalWrite(CONT_4, LOW);
67         digitalWrite(CONT_2, LOW);
68         digitalWrite(CONT_1, HIGH);
69         delay(2000);
70     }
71 }
72 // CONT 4
73 if (digitalRead(CONT_4) == HIGH) {
74     voltage = (5.0 / 1023.0) * analogRead(ANALOG_IN);
75     power = log(voltage / 480587) / 0.2368 + 24.26;
76     Serial.print("CONT 4 - Tensao: ");
77     Serial.print(voltage);
78     Serial.print("V - Potencia: ");
79     Serial.print(power);
80     Serial.println("dBm");
81     if (voltage > 3.62) {
82         digitalWrite(CONT_4, LOW);
83         digitalWrite(CONT_2, LOW);
84         digitalWrite(CONT_1, HIGH);
85         delay(2000);
86     }
87 }
88 if(txLoRaPacket("Power: " + String(power)))
89 {
90     digitalWrite(ledPin, HIGH);
91     delay(100);
```

```
92     digitalWrite(ledPin, LOW);
93     }
94     }else{
95     Serial.println("esperando comando");
96     }
97 }
```

```
1
2 #ifndef LoRa_Rx_Tx_h
3 #define LoRa_Rx_Tx_h
4
5 void setupLoRa();
6 String rxLoRaPacket();
7 bool txLoRaPacket(String outgoing);
8
9 #endif
```

```
1
2 #include <SPI.h>
3 #include <LoRa.h>
4
5 const int csPin = 10;
6 const int resetPin = 7; // Alterado para pino 8
7 const int irqPin = 8; // Alterado para pino 7
8
9 byte localAddress = 0xBB;
10 byte destination = 0xAA;
11 long lastSendTime = 0;
12
13 void setupLoRa()
14 {
15     LoRa.setPins(csPin, resetPin, irqPin);
```

```
16  if(!LoRa.begin(915E6))
17  {
18      Serial.println("Erro ao iniciar o LoRa");
19      while(true) Serial.print(".");
20  }
21  LoRa.setSpreadingFactor(9);
22  LoRa.setSignalBandwidth(125E3);
23  LoRa.setCodingRate4(5);
24  LoRa.setPreambleLength(6);
25  LoRa.setSyncWord(0x12);
26 }
27
28 String rxLoRaPacket()
29 {
30     int packetSize = LoRa.parsePacket();
31     String message = "";
32
33     if (packetSize > 0)
34     {
35         byte destination = LoRa.read();
36         byte sender = LoRa.read();
37         byte incomingLength = LoRa.read();
38
39         // Checa se a mensagem eh para mim ou eh broadcast
40         if (destination != localAddress && destination != 0xFF)
41         {
42             Serial.println("[ERRO]: Mensagem nao eh para mim");
43             return "";
44         }
45
46         // Faz a leitura da mensagem
47         while (LoRa.available())
```

```
48     {
49         message += (char) LoRa.read();
50     }
51
52     // Checa se a mensagem chegou com o tamanho certo
53     if (incomingLength != message.length())
54     {
55         Serial.println("[ERRO]: Tamanho invalido");
56         return "";
57     }
58
59     Serial.println("Recebido do dispositivo: 0x" + String(
60         sender, HEX));
61     Serial.println("Enviado para: 0x" + String(destination,
62         HEX));
63     Serial.println("Tamanho da mensagem: " + String(
64         incomingLength));
65 }
66
67
68 bool txLoRaPacket(String outgoing)
69 {
70     Serial.println("enviando:");
71     Serial.println(outgoing);
72     LoRa.beginPacket();
73     LoRa.write(destination);
74     LoRa.write(localAddress);
75     LoRa.write(outgoing.length());
76     LoRa.print(outgoing);
```

```
77 LoRa.endPacket();
78 }
```

GATEWAY - RECEPTOR (ARDUINO NANO, CONVERSOR BIDIRECIONAL E MÓDULO LORA)

```
1
2 #include "LoRa_Rx_Tx.h"
3
4 const int ledPin = 6; // Novo pino para o LED
5 String comando_chave = "rqst\n";
6 void setup() {
7     Serial.begin(115200);
8     while (!Serial);
9
10    Serial.println("Comunicacao LoRa - Receptor");
11
12    pinMode(ledPin, OUTPUT); // Configura o pino do LED como
    saida
13
14    setupLoRa();
15
16    Serial.println("Modulo LoRa configurado com sucesso!!!");
17 }
18
19 void loop() {
20
21     if (Serial.available())
22     {
23         digitalWrite(ledPin, HIGH);
```



```
24 String comando = Serial.readStringUntil('\n');
25 Serial.println(comando);
26 delay(100);
27 digitalWrite(ledPin, LOW);
28 if (comando.compareTo(comando_chave))
29 {
30     Serial.println("Request arrived");
31
32     if(txLoRaPacket("rqst"))
33     {
34         digitalWrite(ledPin, HIGH);
35         delay(200);
36         digitalWrite(ledPin, LOW);
37     }
38 }
39 }
40
41 String receivedPwr = rxLoRaPacket();
42
43 if (receivedPwr != "") Serial.println(receivedPwr);
44
45 }
```

```
1
2 #ifndef LoRa_Rx_Tx_h
3 #define LoRa_Rx_Tx_h
4
5 void setupLoRa ();
6 String rxLoRaPacket ();
7 bool txLoRaPacket (String outgoing);
8
9 #endif
```

```
1
2 #include <SPI.h>
3 #include <LoRa.h>
4
5 const int csPin = 10;
6 const int resetPin = 7; // Alterado para pino 8
7 const int irqPin = 8; // Alterado para pino 7
8
9 byte localAddress = 0xAA;
10 byte destination = 0xBB;
11 long lastSendTime = 0;
12
13 void setupLoRa()
14 {
15     LoRa.setPins(csPin, resetPin, irqPin);
16     if(!LoRa.begin(915E6))
17     {
18         Serial.println("Erro ao iniciar o LoRa");
19         while(true);
20     }
21     LoRa.setSpreadingFactor(9);
22     LoRa.setSignalBandwidth(125E3);
23     LoRa.setCodingRate4(5);
24     LoRa.setPreambleLength(6);
25     LoRa.setSyncWord(0x12);
26 }
27
28 String rxLoRaPacket()
29 {
30     int packetSize = LoRa.parsePacket();
31     String message = "";
32
```

```
33  if (packetSize > 0)
34  {
35      //Serial.println("Chegou alguma coisa");
36      byte destination = LoRa.read();
37      byte sender = LoRa.read();
38      byte incomingLength = LoRa.read();
39
40      // Checa se a mensagem eh para mim ou eh broadcast
41      if (destination != localAddress && destination != 0xFF)
42      {
43          Serial.println("[ERRO]: Mensagem nao eh para mim");
44          return "";
45      }
46
47      // Faz a leitura da mensagem
48      while (LoRa.available())
49      {
50          message += (char) LoRa.read();
51      }
52
53      // Checa se a mensagem chegou com o tamanho certo
54      if (incomingLength != message.length())
55      {
56          Serial.println("[ERRO]: Tamanho invalido");
57          return "";
58      }
59
60      Serial.println("Received from the device: 0x" + String(
        sender, HEX));
61      //Serial.println("Enviado para: 0x" + String(destination,
        HEX));
62      Serial.println("Message size: " + String(incomingLength))
```

```
        ;
63
64     }
65
66     return message;
67 }
68
69 bool txLoRaPacket(String outgoing)
70 {
71     LoRa.beginPacket();
72     LoRa.write(destination);
73     LoRa.write(localAddress);
74     LoRa.write(outgoing.length());
75     LoRa.print(outgoing);
76     LoRa.endPacket();
77 }
```

GATEWAY - ESP WIFI LORA 32, SERVIDOR UBIDOTS E PROTOCOLO MQTT

```
1
2 #include <heltec.h>
3
4 #include "mqttclient.h"
5
6 #define DISPLAY_STATE true // Liga o display
7 #define LORA_STATE false // Desliga o LoRa
8 #define SERIAL_STATE true // Liga o serial
9 #define AMP_POWER_STATE false // Desliga amplificador LoRa
10 #define BAND 915E6 // Define banda de transmissao em 915MHz
```

```
11 #define TIMEOUT 3E4 // Tempo maximo de espera para entrar em
    modo sleep em 30 segundos
12
13 void customCallback (char* topic, byte* payload, unsigned int
    length);
14
15 void setup() {
16
17     // Configura a placa heltec
18     Heltec.begin(DISPLAY_STATE, LORA_STATE, SERIAL_STATE,
        AMP_POWER_STATE, BAND);
19     // Inicia a comunicacao serial
20     Heltec.display->setFont(ArialMT_Plain_16);
21     Serial.begin(115200);
22
23     // Inicializa MQTT, conectando o ESP no WiFi, configura e
        conecta ao servidor da ubidots
24     Heltec.display->clear();
25     Heltec.display->drawString(0, 0, "[INFO]");
26     Heltec.display->drawString(16, 20, "Inicializando MQTT");
27     Heltec.display->display();
28     // A funcao de callback quando recebe mensagens deve ser
        passada como argumento para `mqttInit()`
29     if (!mqttInit(callbackMQTT))
30     {
31         delay(3000);
32         Heltec.display->clear();
33         Heltec.display->drawString(0, 0, "[ERRO]");
34         Heltec.display->drawString(16, 20, "Falha na conexao!");
35         Heltec.display->display();
36     }
37
```

```
38 Heltec.display->clear();
39 Heltec.display->drawString(0, 0, "[INFO]");
40 Heltec.display->drawString(16, 20, "MQTT: Conexao
    estabelecida");
41 Heltec.display->display();
42
43 }
44
45 void loop() {
46
47     // Checa se ha algo no buffer da porta serial
48     if (Serial.available())
49     {
50         // Le o que esta la
51         String comando = Serial.readStringUntil('\n');
52
53         // Procura a String "pwr: ". Esse sera a estrutura
            utilizada para diferenciar depuracao de comando
54         int found = comando.indexOf("Power: ");
55         if (found != -1)
56         {
57             // Extrai o valor da potencia optica
58             String strPwr = comando.substring(found + 5);
59             // Converte para float
60             float pwr = strPwr.toFloat();
61             // Envia o valor para o Ubidots
62             if(!sendMQTT(pwr)) Serial.println("[ERRO] Falha no
                envio ao ubidots");
63         }
64
65     }
66     client.loop();
```

```
67
68 }
69
70 void callbackMQTT(char* topic, byte* payload, unsigned int
    length)
71 {
72     // Mensagens de depuracao
73
74     for (int i = 0; i < length; i++)
75     {
76         Serial.print((char) payload[i]);
77     }
78     Serial.println();
79     // Ao chegar um request, o faz para o arduino via Serial
80     delay(2000);
81     Serial.println("rqst");
82
83 }
```

```
1
2 #ifndef mqttclient_h
3 #define mqttclient_h
4 #include <PubSubClient.h>
5
6 extern PubSubClient client;
7
8 bool mqttInit ( void (*callback)(char*, byte*, unsigned int)
    );
9 void reconnectMQTT ();
10 bool sendMQTT(float m_value);
11
12 #endif
```

```
1
2 #include <stdio.h>
3 #include <WiFi.h>
4 #include <PubSubClient.h>
5
6 #define TOKEN "BBFF-16Bz56DcitZJub4eCGFk4TNhV1Chen" // Token
   da conta UBIDOTS
7 #define VAR_LABEL_POWER "optical-power" // Nome da variavel
   criada na UBIDOTS
8 #define DEVICE_ID "651b6a43075ff2000c5afb19" // ID do
   dispositivo, fornecido pela UBIDOTS
9 #define SERVER "things.ubidots.com" // Servidor do broker
10 #define PORT 1883 // Porta padrao
11
12 const char *WIFI_SSID = "*****"; //SSID da rede WiFi para
   o ESP se conectar
13 const char *WIFI_PASS = "*****"; // Senha da rede WiFi
   para o ESP se conectar
14
15 char subtopic[] = "/v1.6/devices/esp32-gateway/rqst-esp32";
16 char pubtopic[] = "/v1.6/devices/esp32-gateway/";
17
18 WiFiClient ubidots;
19
20 PubSubClient client(ubidots);
21
22 bool mqttInit ( void (*callback)(char*, byte*, unsigned int)
   )
23 {
24   // Inicia o WiFi com o SSID e a senha da rede a ser
   conectada
25   WiFi.disconnect(true);
```



```
26 WiFi.mode(WIFI_STA);
27 WiFi.setAutoConnect(true);
28 WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
29
30 // Loop de checagem, ate a conexao ser estabelecida
31 while(WiFi.status() != WL_CONNECTED)
32 {
33     delay(1000);
34     Serial.println("[INFO] Tentando conectar a rede WiFi...")
35     ;
36 }
37 // Exibe que foi conectado corretamente
38 Serial.println("[INFO] Conexao estabelecida com sucesso");
39 Serial.print("[INFO] Endereco de IP: ");
40 Serial.println(WiFi.localIP());
41
42 // Seta servidor com o broker e a porta
43 client.setServer(SERVER, PORT);
44 // Seta a funcao de callback
45 client.setCallback(callback);
46
47 // Conecta com Ubidots pelo DEVICE_ID, TOKEN e senha
48     informada como vazio
49 while(!client.connect(DEVICE_ID, TOKEN, ""))
50 {
51     Serial.println("[ERRO] MQTT: Erro de conexao");
52     return false;
53 }
54 client.subscribe(subtopic);
55
```

```
56 // Exibe no serial o estado da conexao
57 Serial.println("[INFO] MQTT: Conectado com sucesso");
58 return true;
59 }
60
61 void reconnectMQTT ()
62 {
63 // Loop ate que o MQTT esteja conectado
64 while (!client.connected())
65 {
66 // Sinaliza no serial que esta tentando conectar ao MQTT
67 Serial.println("[INFO] Tentando conectar ao MQTT");
68
69 // Tenta reconectar
70 if (client.connect(DEVICE_ID, TOKEN, "")) Serial.println(
71 "[INFO] MQTT: Conectado");
72 else
73 {
74 Serial.print("[ERRO] MQTT: Falha na conexao. rc=");
75 Serial.println(client.state());
76 Serial.println("[INFO] MQTT: Tentando reconectar em 2
77 segundos");
78 delay(2000);
79 }
80 }
81 // Sinaliza no serial que foi reconectado
82 Serial.println("[INFO] MQTT: Reconectado");
83 }
84 bool sendMQTT(float m_value)
85 {
```

```
86 char json[250];
87
88 sprintf(json, " {\"%s\":{\"value\":%02.02f, \"context\":{\"
      pwr-esp32\":%02.02f}} } ",
89 VAR_LABEL_POWER, m_value, m_value);
90
91 // Se nao conseguir publicar, retorna `false`
92 if(!client.publish(pubtopic, json)) return false;
93
94 // Se tudo der certo, retorna true
95 return true;
96
97 }
```