



MPO-MICRO: PROTÓTIPO DE UM MEDIDOR DE POTÊNCIA ÓPTICA MICROCONTROLADO MULTIESCALA

Vitória Celani Sanguinetti Soares¹
Paulo Ixtânio Leite Ferreira²
Abraão Marques da Silva Medeiros³
José Winner Ribeiro Gomes da Silva⁴
Thyago Leite de Vasconcelos Lima⁵

Resumo: Os lasers de baixa potência tem sido usados cada vez mais em áreas que vão desde a medicina à educação, passando por comunicações ópticas e aplicações industriais. Uma etapa comum é que eles precisam passar por um processo confiável para aferir sua potência. Contudo, medidores comerciais de potência apresentam custos elevados, dificultando o acesso às instituições de ensino e à profissionais que trabalham com fotobiomodulação. Este trabalho consiste no desenvolvimento de um protótipo de medidor óptico, de baixo custo, capaz de medir diferentes níveis de potência (5 mW, 10 mW e 20 mW) de lasers que emitem luz vermelha (comprimento de onda de 650 nm). O protótipo é constituído por um sensor fotodiodo, amplificador de transimpedância, chave seletora do nível máximo a ser medido, microcontrolador Arduino e *display* LCD. Todo o sistema foi submetido a testes de medição em laboratório, com lasers de potências diferentes. Para validação do protótipo, os resultados foram comparados com os valores obtidos por meio do medidor de potência óptica, modelo PM20A da *Thorlabs*. Os resultados apresentaram um erro relativo máximo de 2,25% e mínimo de 0,04% entre a leitura obtida pelo protótipo e a leitura obtida no medidor comercial, o que demonstra a viabilidade e confiabilidade do sistema proposto para potencial aplicação em laboratórios didáticos e ambientes profissionais.

Palavras-chave: Laser. Medidor. Microprocessador. Multiescala. Óptico.

¹V. C. Sanguinetti Soares (👤). Instituto Federal da Paraíba. João Pessoa, PB, Brasil.
e-mail: vitoria.celani@academico.ifpb.edu.br.

²P. I. Leite Ferreira (👤). Instituto Federal da Paraíba. João Pessoa, PB, Brasil.

³A. M. da Silva Medeiros (👤). Instituto Federal da Paraíba. João Pessoa, PB, Brasil.

⁴J. W. Ribeiro Gomes da Silva (👤). Instituto Federal da Paraíba. João Pessoa, PB, Brasil.

⁵T. L. de Vasconcelos Lima (👤). Instituto Federal da Paraíba. João Pessoa, PB, Brasil.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a utilização de lasers de baixa potência (LBT) tem se tornado cada vez mais frequente em diversas áreas, tais como medicina (Saha et al., 2017), comunicações ópticas (Das et al., 2021), sensores (Wasser, 2024) e aplicações industriais (Ohring; Kasprzak, 2015). A medição precisa de sinais ópticos é um aspecto fundamental em áreas como telecomunicações e medicina. Em especial na medicina, os LBTs são muito usados para fotobiomodulação (Ibramed, 2022), com uso de equipamentos que emitem potência em torno de 100 mW. A capacidade de medir a potência de saída desses lasers de forma precisa é essencial para garantir a segurança, eficiência e confiabilidade desses sistemas (Fukuda et al., 2010). Entretanto, os equipamentos disponíveis no mercado para tal finalidade costumam ser caro e, muitas vezes, inacessíveis para estudantes e instituições de ensino técnico (Thorlabs, 2025).

Na calibração dos equipamentos LBP são usados medidores ópticos, cujo sensor mais utilizado é do tipo fotodiodo, associado a um circuito de amplificação (Ponchet, 2016). O circuito de amplificação usa um amplificador operacional na configuração chamada de amplificador de transimpedância (TIA). O desenvolvimento de um medidor óptico portátil e acessível ajudará a desmistificar o conhecimento em disciplinas de cursos de engenharia elétrica e afins. Principalmente em disciplinas de comunicação e rede ópticas.

Neste contexto, propõe-se o desenvolvimento de um medidor óptico, baseado em fotodiodo, microcontrolador e amplificador de transimpedância (TIA), com amplificador operacional, de baixo custo, que seja capaz de medir diferentes níveis de potências ópticas. O sistema proposto visa oferecer precisão, portabilidade e acessibilidade, promovendo uma alternativa viável para o uso em ambientes educacionais. Os lasers usados aqui trabalham dentro do espectro de luz vermelha, ou seja, com comprimento de onda (λ) de 650 nm (LUMITEX, 2018).

O medidor de potência óptica poderá contribuir significativamente para o aprendizado prático dos estudantes, uma vez que poderão entender e replicar todo o processo de medição óptica, tornando o conhecimento mais acessível e aplicado.

METODOLOGIA

Levantamento bibliográfico

Essa etapa consistiu-se em um nivelamento técnico, realizado por meio de leituras de materiais bibliográficos sobre TIA, diodos laser e fotodiodos. Também foram analisados artigos científicos que descrevem a aplicação prática dessas tecnologias em projetos experimentais. Esse estudo preliminar possibilitou a compreensão do funcionamento do sistema óptico e sua viabilidade em um dispositivo de baixo custo.

Após o levantamento teórico, iniciou-se a análise detalhada das fichas técnicas dos principais componentes eletrônicos. Nesta etapa, foram estudados diversos modelos de amplificadores operacionais e optou-se pelo modelo TL071, devido à sua baixa corrente de *bias*, largura de banda, alta impedância de entrada e baixo custo (TEXAS INSTRUMENTS, 2017).

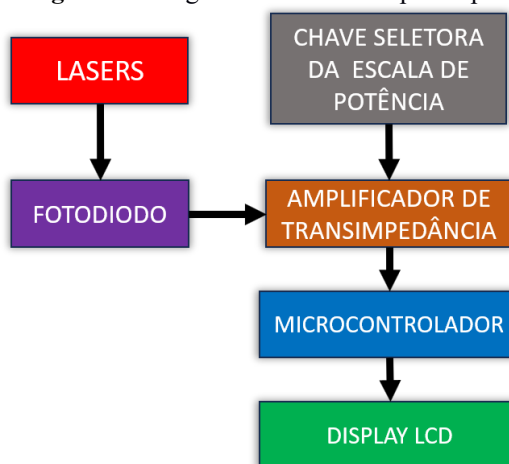
Protótipo proposto

O diagrama de blocos proposto para o protótipo do medidor de potência óptica, multiescala, está exposto na Figura 1. Nela é possível observar a interconexão entre os elementos que compõem o circuito. Desde a fonte de luz (Laser) até o *display* (responsável por



exibir a leitura), passando pelo sensor (fotodiodo), amplificador de transimpedância, chave de seleção de quatro posições, para selecionar o nível máximo de potência a ser medido e o circuito de processamento (microcontrolador).

Figura 1 - Diagrama de blocos do protótipo.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Lasers - fonte de luz

LASER é um acrônimo para “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” (amplificação da luz por emissão estimulada de radiação). Eles são dispositivos que geram luz coerente e direcional por meio da amplificação óptica de fótons em um meio ativo. São caracterizados pela sua coerência, monocromatismo e alta direcionalidade (Jokura, 2024). Neste estudo foram usados dois lasers que emitem luz vermelha ($\lambda = 650$ nm). O primeiro emite uma potência máxima de 5 mW (modelo: SYD1230) e o segundo, pode chegar até 100 mW (LM6501003L10-AL90), de acordo com os fabricantes. Este segundo laser foi calibrado para emitir 10 mW e depois 20 mW. Na Figura 2, são apresentadas as imagens dos lasers usados, respectivamente.

Figura 2 - Imagens dos lasers usados como fonte de luz neste trabalho.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Fotodiodo - sensor de luz

Os fotodiodos são dispositivos semicondutores que convertem luz em corrente elétrica através de uma junção de materiais semicondutores dos tipos positivo e negativo (P-N). Esse componente é preciso e eficiente para medição de luz. Seu uso é particularmente adequado para monitoramento de intensidade luminosa, tendo-se em mente que sua responsividade varia com o comprimento de onda. Eles podem operar em dois modos principais: fotovoltaico e fotocondutivo. Neste trabalho, o fotodiodo é usado no modo fotocondutivo, pois este modo é mais adequado para medição da potência proveniente da incidência de luz devido à ampliação



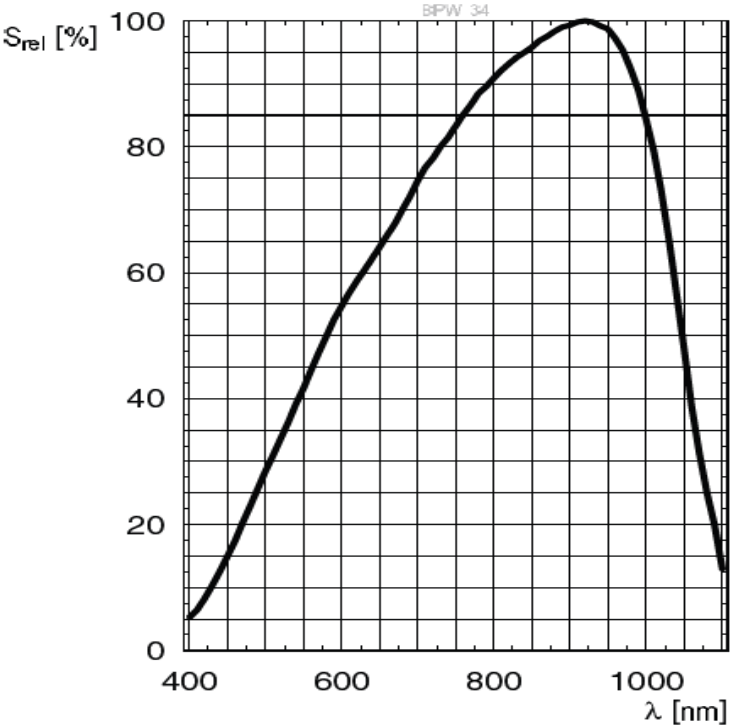
da região de depleção e a capacidade de absorção de luz (Electronics Inc, 2020).

O sensor comercial usado foi o fotodiodo BPW34, cujos principais parâmetros são apresentados no Quadro 1 (Osram, 2020). Na Figura 3, é apresentada a curva de sensibilidade espectral do fotodiodo.

Quadro 1 - Parâmetros do fotodiodo, modelo BPW34.		
Parâmetros	Símbolo	Valor
Comprimento de onda na máx. sensibilidade	$\lambda_{S_{max}}$	850 nm
Responsividade em $\lambda_{S_{max}}$	$Resp_{max}$	0,62 A/W
Capacitância de Junção	C_j	72 pF
Fotocorrente típica	I_p	80 μ A
Potência total dissipada	P_{tot}	150 mW

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Figura 3 - Curva de sensibilidade espectral do sensor BPW34.



Fonte: (Osram, 2020).

Como a curva mostrada na Figura 3 está normalizada, foi necessário calcular a responsividade do sensor para o comprimento de onda desejado. Observe no gráfico, que para 650 nm, o parâmetro $S_{rel} = 70\%$ e em 850 nm, $S_{rel} = 100\%$, correspondendo a 0,62 A/W. Usando a expressão (1), determinou-se a responsividade ($Resp$) para 650 nm.

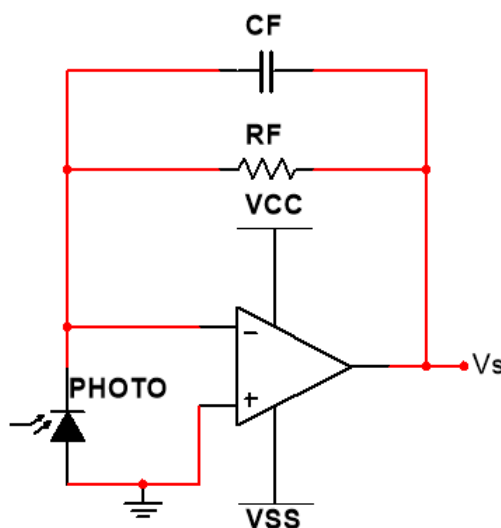
$$Resp = \frac{70\% \times 0,62}{100\%} = 0,434 A/W \quad (1)$$

Amplificador de transimpedância

Um amplificador de transimpedância, do inglês *transimpedance amplifier* (TIA), é um componente fundamental em sistemas de detecção de luz e fotodetectores. Ele converte a corrente (I) gerada por um fotodiodo ou fototransistor, em uma tensão proporcional (V_s), dada pela expressão 2 (Robbins, 2021), em que R_F é o resistor de realimentação, responsável pelo ganho do amplificador e C_F é um capacitor usado para definir a largura de banda do circuito, entre outras funções (Texas Instruments, 2019). O TIA é usado para amplificar sinais de baixa corrente, tornando-os mais facilmente mensuráveis (Ferrari et al., 2009). O circuito de um TIA é mostrado na Figura 4.

$$V_s = -I \times R_F \quad (2)$$

Figura 4 - Configuração geral de um TIA, usada neste trabalho.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Para determinar a potência (P) do laser, a partir da tensão de saída do circuito da Figura 4, usou-se a expressão (3) (Donati, 2001), que relaciona tensão de saída e responsividade do fotodiodo. É importante destacar que o valor da responsividade deve ser aquele relacionado ao comprimento de onda da luz que se deseja medir, obtido pela análise do gráfico mostrado na Figura 3.

$$P = \frac{V_s}{R_F \cdot Resp} \quad (3)$$

Para determinação do amplificador operacional, a ser usado no TIA, foram considerados os modelos: LM741, TL082, TL074, TL071, LM324 e OPA4227PA. Levando em consideração características técnicas, custo e dimensões, optou-se pelo modelo TL071, cujos parâmetros mais importantes para esta aplicação, são apresentados no QUADRO 2.



Quadro 2 - Parâmetros do amplificador operacional, modelo TL071.

Parâmetros	Símbolo	Valor
Corrente de <i>bias</i>	I_{IB}	200 pA
Corrente de alimentação	I_{CC}	2,5 mA
Impedância de entrada	R_i	$10^{12} \Omega$
Produto ganho largura de banda	GBW	4 MHz
Tensão de saída mínima	V_{omin}	0 V

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Plataforma de desenvolvimento Arduino

O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em *hardware* e *software* fáceis de usar. As placas Arduino são capazes de ler entradas e transformá-las em uma saída, (ARDUINO, 2024). A plataforma de desenvolvimento permite ao usuário uma experiência simples e efetiva, com um *software* simples para iniciantes, mas flexível o suficiente para usuários avançados. São acessíveis para projetos científicos de baixo custo, tornando-a ideal para aplicações educacionais e prototipagem rápida. Além dessas características, ela foi escolhida por apresentar viabilidade econômica, precisão no levantamento de dados e eficiência na transmissão de informações. Tudo isso é fundamental para garantir o equilíbrio entre acessibilidade e desempenho no sistema proposto.

Determinação dos componentes do protótipo

Além do amplificador e do sensor do protótipo, é preciso definir os valores do resistor de realimentação e do capacitor. O processo, a seguir, foi usado para o caso em que se deseja medir a potência de um laser de até 5 mW, $\lambda = 650$ nm, $Resp = 0,434$ A/W, frequência de 10 kHz, tensão máxima de saída igual a 4,1 V (valor escolhido para evitar saturação na saída do Arduino). O mesmo processo foi usado para os casos de 10 mW e 20 mW.

- Passo 1 - Cálculo do resistor de ganho (R_F): modificando a expressão (3), chega-se à expressão (4). Considerando as condições de projeto têm-se:

$$R_F = \frac{V_s}{P \cdot Resp} = \frac{4,1}{5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,434} = 1,889 \text{ k}\Omega \quad (3)$$

O valor comercial usado foi 1,8 k Ω que permite medir até 5,25 mW. O mesmo cálculo foi feito para obter os valores dos resistores para os casos em que a potência é 10 mW e 20 mW.

- Passo 2 - Cálculo do capacitor de realimentação (C_F): usou-se a expressão (4) para determinar esse valor (Texas Instruments, 2019).

$$C_F = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_F \cdot F_p} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1,8 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3} = 8,84 \text{ nF} \quad (4)$$

O valor comercial usado foi 8,2 nF.

- Passo 3 – Determinação da capacitância total de entrada do TIA (C_{Tin}): usou-se a expressão (5), neste cálculo (Texas Instruments, 2019). Esse parâmetro é importante para o cálculo no passo 4.



$$C_{Tin} = C_j + C_d + C_{cm} \quad (5)$$

Em que:

C_{Tin} = Capacitância total de entrada;

C_j = Capacitância de junção do fotodiodo;

C_d = Capacitância diferencial de entrada do amplificador;

C_{cm} = Capacitância de modo comum da entrada do amplificador;

C_d e C_{cm} normalmente são estimados em 2 pF e 1 pF respectivamente, baseado em aproximações de outros amplificadores (Texas Instruments, 2019). Substituindo os valores em (5), tem-se que:

$$C_{Tin} = 72 \cdot 10^{-12} + 2 \cdot 10^{-12} + 1 \cdot 10^{-12} = 75 \text{ pF}$$

- Passo 4 - Determinação do produto ganho largura de banda (GBW): usou-se a expressão (6) neste cálculo (Caldwell, 2014). Esse parâmetro indica a frequência máxima em que o amplificador ainda consegue operar com ganho constante. Ele é crucial para a escolha do amplificador operacional.

$$GBW > \frac{C_{Tin} + C_F}{2 \cdot \pi \cdot R_F \cdot C_F^2} \quad (6)$$

Substituindo os valores em (6), tem-se:

$$GBW > \frac{75 \cdot 10^{-12} + 8,2 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot \pi \cdot 1,8 \cdot 10^3 \cdot (8,2 \cdot 10^{-9})^2} > 10,9 \text{ kHz}$$

Portanto, o TL071 satisfaz totalmente essa condição, uma vez que seu GBW é de 4 MHz.

Implementação do circuito

Todos os dispositivos que fazem parte do protótipo, estão listados na Tabela 1. Já na Figura 5 é apresentado o esquemático completo do protótipo.

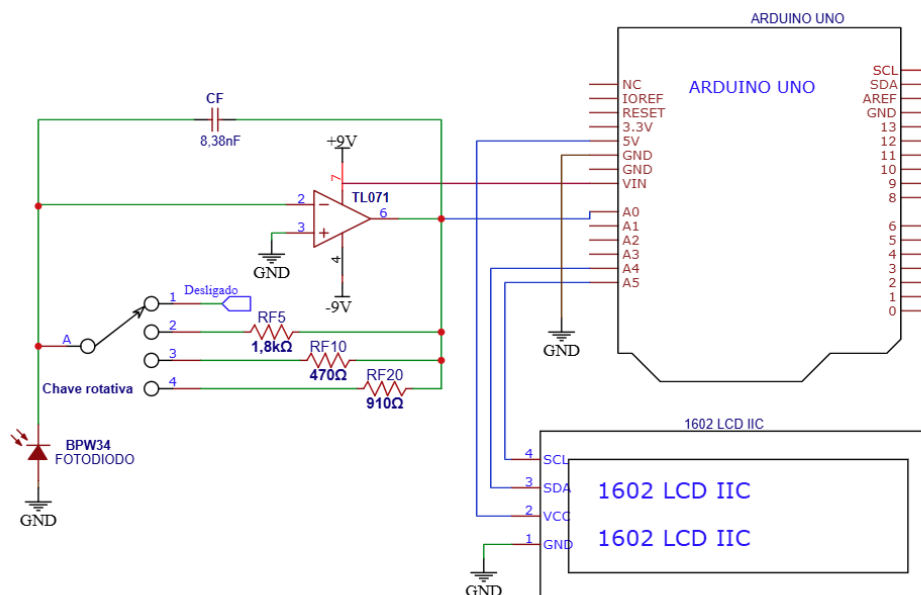
Tabela 1 - Componentes comerciais usados no protótipo.

Dispositivos	Símbolo	Valor nominal	Valor calculado
Resistor de ganho para 5 mW	R_{F5}	1,8 k Ω	1,89 k Ω
Resistor de ganho para 10 mW	R_{F10}	910 Ω	945 Ω
Resistor de ganho para 20 mW	R_{F20}	470 Ω	472 Ω
Capacitor	C_F	8,2 nF	8,84 nF
Amplificador Operacional	AmpOP	TL071	-
Fotodiodo	Photo	BPW34	-
Microcontrolador	A_Uno	Arduino Uno	-
Display LCD - 16x2	Disp	LCD1602 I2C	-
Chave seletora de 4 posições	SW4	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).



Figura 5 - Esquemático do circuito com chave seletora do nível de potência e capacitor.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

O circuito foi montado inicialmente em *protoboard*, verificado seu funcionamento e foi desenvolvida uma placa de circuito impresso.

Placa de Circuito Impresso (PCI)

Uma PCI é uma placa eletrônica composta por trilhas condutoras, áreas metálicas e diferentes componentes fixados em sua superfície. Sua principal função é integrar e interligar todos os elementos do circuito em um único suporte. O projeto dessas placas é feito previamente em *softwares* de *design* eletrônico, nos quais o *layout* é elaborado para atender às necessidades específicas do equipamento em que será utilizada (Chaves, 2023).

Além disso, a corrosão corresponde à etapa em que o excesso de cobre é retirado da placa, permitindo a definição das trilhas condutoras que garantirão o correto funcionamento do circuito conforme o desenho projetado. Esse procedimento geralmente é feito com solução de percloroeto de ferro, um composto corrosivo capaz de reagir com o cobre e dissolvê-lo (Álvaro, 2023). A PCI do protótipo é mostrada na Figura 6.

Figura 6 – PCI do Protótipo.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).



Modelagem e impressão 3D

Com o objetivo de aumentar a estabilidade mecânica e a precisão das medições ópticas, foi desenvolvido um suporte específico para o fotodiodo BPW34 juntamente com o laser de 5 mW. A modelagem tridimensional da peça foi realizada na plataforma *Onshape*, permitindo a criação de um *design* compatível com a geometria do sensor e com o posicionamento adequado em relação ao feixe de luz incidente.

O suporte projetado foi fabricado por meio de impressão 3D, utilizando tecnologia de deposição de filamento (FDM) com material PLA. O resultado final apresentou boa fidelidade dimensional em relação ao modelo virtual, assegurando o posicionamento adequado do fotodiodo e a fixação estável no sistema experimental, minimizando variações causadas por desalinhamento do laser ou movimentos acidentais durante os testes. Na Figura 7 é ilustrado o suporte físico após a impressão e montagem, evidenciando a viabilidade da solução proposta para aplicações laboratoriais. Além deste suporte foi desenvolvida uma caixa para acomodar todo o circuito do protótipo, conforme pode ser observado também na Figura 7.

Figura 7 – Suporte e caixa de acomodação em impressão 3D.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Programação do microcontrolador

O código desenvolvido para realizar a leitura da tensão de saída do TIA é relativamente simples e segue os seguintes passos.

- Passo 1: Leitura da tensão - São realizadas 2000 leituras analógicas da tensão (*suma_tensão*), na porta A0 do Arduino UNO. Então, é calculada a média e convertida para uma tensão em Volts de acordo com a expressão (7):

$$tensão = \frac{suma_tensão}{2000} \cdot \frac{5}{1023} \quad (7)$$

Em que:

tensão é o valor resultante da média das duas mil leituras.

- Passo 2: Cálculo da potência do laser - Foi implementada a expressão (3), sendo reescrita na forma da expressão (8):

$$Plaser = \frac{tensão}{R_F \cdot Resp} \cdot 1000 \quad (8)$$

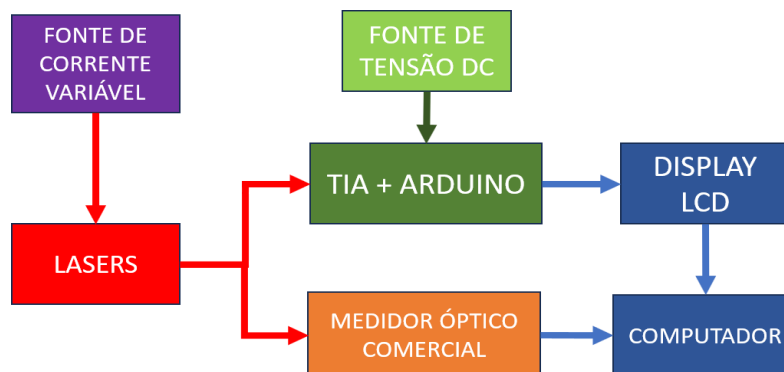
O valor de *Plaser* é multiplicado por 1000 para que o resultado final seja exibido em miliWatts, no *display*.



Configuração do ambiente para medição

A configuração usada para realizar os experimentos e coleta de dados é apresentada, em forma de diagrama, na Figura 8.

Figura 8 - Diagrama de blocos usados para realizar os ensaios investigativos sobre o protótipo.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

A alimentação dos lasers foi realizada por meio de uma fonte de corrente variável (modelo LDC205C da *ThorLabs*) com o limite da corrente ajustável. Como cada laser possui uma especificação de corrente limite, este equipamento foi essencial para prevenir possíveis danos. Além disso, os diodos lasers costumam alterar suas características conforme o aumento da temperatura, portanto, para manter uma regularidade nas medições, os lasers também foram conectados a um aparelho que mantém a temperatura estabilizada, chamado controlador de temperatura de bancada, modelo TED200C da *ThorLabs*. A temperatura foi definida como 25°C para todos os experimentos. O modelo do medidor de potência óptica comercial usado como referência foi o P20A, do fabricante *Thorlabs*. Para alimentar o protótipo foi usada uma fonte de alimentação simétrica, modelo U8031A, do fabricante *Agilent*. Usou-se um computador comum para registrar os valores das medições para análises posteriores.

Processo de medição

As medições foram realizadas em laboratório e minimizadas as fontes de luz externas, como lâmpadas e luz solar. Para cada laser estudado foram feitas 10 medições com o protótipo proposto e 10 com o medidor comercial PM20A, mantendo as mesmas condições. Em todas elas, buscou-se orientar o feixe do laser diretamente e o mais próximo possível do sensor, seja do protótipo seja do medidor PM20A. Dessa forma, foi possível capturar a máxima potência do laser, sobre teste. Após isso calculou-se a média e desvio padrão entre as 10 medições.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O protótipo, com as conexões de *hardware* e *software*, é mostrado na Figura 9. Nela é exibido um exemplo de coleta de dados para a medição do laser de 5 mW.



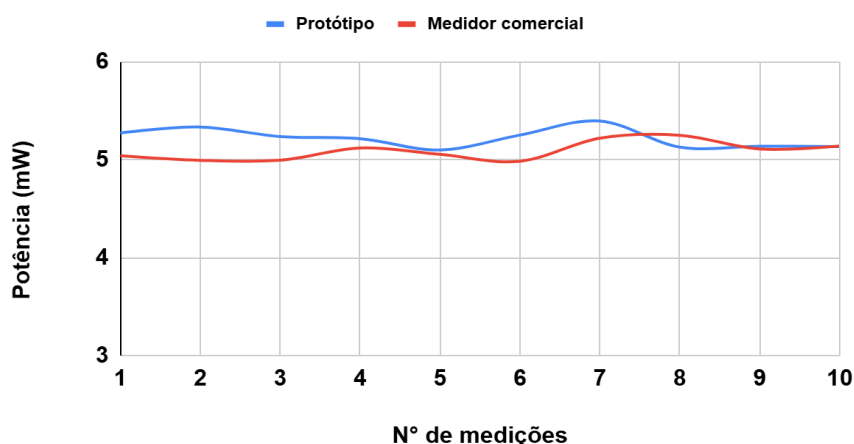
Figura 9 - Protótipo com componentes dispostos na PCI e display LCD.

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

O gráfico mostrado na Figura 10 ilustra a comparação entre os dados obtidos com o protótipo e aqueles obtidos pelo PM20A para o laser de potência nominal (P_{nom}) de 5 mW.

Figura 10 - Comparação entre as medições com o protótipo e o medidor comercial, $P_{nom} = 5$ mW.

Medição para 5 mW



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

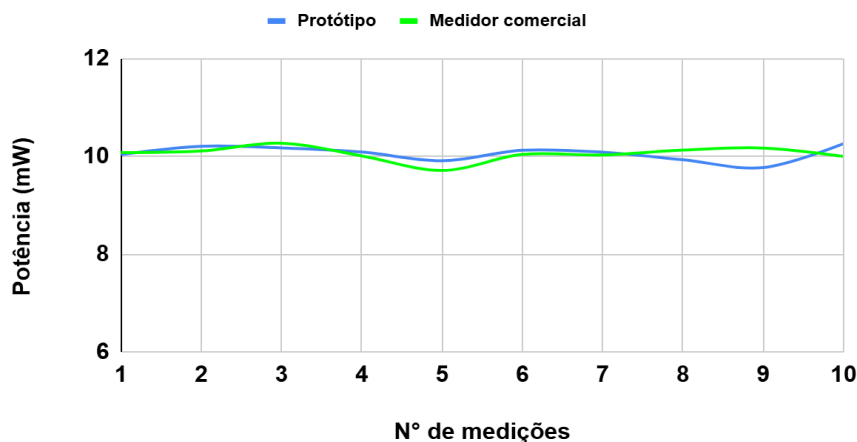
Observa-se, na Figura 10, que o comportamento das medições obtidas pelo protótipo é semelhante às obtidas pelo medidor comercial, estando um pouco acima deste. O valor médio das medições é, respectivamente: 5,221 mW (desvio padrão = 0,092) e 5,091 mW (desvio padrão = 0,089), ou seja, uma diferença de apenas 0,13 mW que pode estar relacionada a pequenas variações nos valores do resistor e capacitor, ou ainda, ao posicionamento entre o laser e o sensor. De toda forma, o valor medido pelo protótipo apresenta um erro relativo de 2,56 %, tomando o valor obtido pelo medidor comercial como referência. Um valor baixo que está dentro da faixa de tolerância do P20A, que é de $\pm 5\%$ ($\pm 0,25$ dB) (Thorlabs, 2020).

Na Figura 11 é apresentada a comparação entre os dados obtidos para o caso em que o laser tem potência nominal (P_{nom}) de 10 mW. Já na Figura 12, são apresentados os valores obtidos para o caso em que o laser tem potência nominal igual a 20 mW.



Figura 11 - Comparação entre as medições com o protótipo e o medidor comercial, $P_{nom} = 10$ mW.

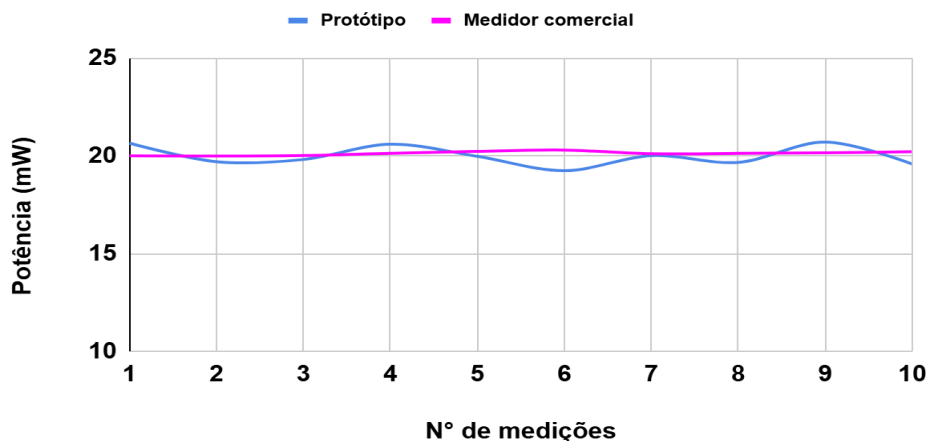
Medição para 10 mW



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Figura 12 - Comparação entre as medições com o protótipo e o medidor comercial, $P_{nom} = 20$ mW.

Medição para 20 mW



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Observa-se que as leituras fornecidas pelo protótipo (Figuras 10 – 12) acompanham de forma consistente as do medidor comercial, indicando boa concordância entre ambos os conjuntos de dados. O valor médio das medições, na Figura 11, são respectivamente: 10,059 mW (desvio padrão = 0,143) e 10,055 mW (desvio padrão = 0,139), ou seja, uma diferença de apenas 0,004 mW. Para 20 mW, as médias foram 19,996 mW (DP = 0,475) no protótipo e 20,250 mW (DP = 0,098) no PM20A, a diferença entre médias foi 0,254 mW (DP = 0,098), pouco maior que nos outros dois casos. Diferença que pode estar diretamente ligada ao alinhamento entre laser e sensor. Para as duas medições (10 mW e 20 mW), os valores medidos também estão dentro da tolerância do medidor comercial.

Na Tabela 2 é apresentado um comparativo da média, desvio padrão e erro relativo das medições para os casos estudados. O cálculo do erro, foi realizado entre o valor obtido no protótipo e a referência sendo a potência nominal do laser (P_{nom}) e também tomando como referência o medidor comercial P20A.



Tabela 2 - Resumo comparativo dos valores: médias, desvios padrão e erro relativo.

Potências nominais (mW)	Protótipo		Medidor comercial		Erro relativo (%) - Pnom	Erro relativo (%) - PM20A
	Média (mW)	Des. padrão (mW)	Média (mW)	Des. padrão (mW)		
5	5,221	0,092	5,091	0,089	4,45	2,25
10	10,059	0,143	10,055	0,139	0,59	0,04
20	19,996	0,475	20,250	0,098	0,02	1,25

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Analisando os valores da Tabela 2, observa-se que o protótipo apresentou valores muito próximos aos valores medidos pelo medidor comercial para os três casos. Fato observado tanto nos valores médios como nos desvios padrão, que foram próximos, indicando uma dispersão compatível entre os conjuntos de dados obtidos. Do ponto de vista do erro, o pior valor foi inferior a 5%. Se for tomado como referência o medidor comercial, esse erro cai para menos de 2,5%. Valores aceitáveis para aplicações de engenharia e para situações de experimentos educacionais.

Na Tabela 3 é apresentado a lista de componentes do protótipo proposto e seus respectivos valores. Os valores foram obtidos do *e-commerce* UsinaInfo (Usina Info, 2025). O objetivo é ter uma visão do custo final do protótipo. Os valores não incluem gastos com mão de obra, impostos ou frete.

Tabela 3 - Componentes comerciais e seus preços.

Dispositivos	Valor (R\$)
Resistor R_{F5} (1,8 k Ω)	0,20
Resistor R_{F10} (910 Ω)	0,20
Resistor R_{F20} (470 Ω)	0,20
Capacitor C_F (8,2 nF)	0,20
TL071	2,11
BPW34	9,09
Arduino Uno	49,95
Display LCD - 16x2	17,58
Chave seletora de 4 posições	doação
TOTAL =	79,53

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado um protótipo de medidor de potência óptica de baixo custo, multiescala e microcontrolado, para medição de laser de cor vermelha e potências máximas de 5, 10 e 20 mW. Os objetivos foram alcançados e os resultados mostram-se promissores.

Os resultados quantitativos demonstram que o protótipo apresenta desempenho próximo ao do equipamento comercial ao longo dos diferentes pontos de medição. Fato observado pelos baixos valores da média e dos desvios padrão. A estabilidade dos valores e a baixa discrepância observada reforçam a coerência das medições obtidas, a linearidade e o baixo custo de implementação, sugerindo uma boa reprodutibilidade dos dados ao longo dos testes realizados, o que possibilita seu uso tanto em ambientes educacionais quanto profissionais. Além disso, o projeto contribui para democratizar o acesso a ferramentas de medição óptica, favorecendo o aprendizado prático e a pesquisa em áreas relacionadas.

As diferenças encontradas foram pouco significativas e não comprometem a análise geral, demonstrando a confiabilidade do dispositivo proposto.

Os problemas encontrados, na sua grande maioria, estão relacionados ao alinhamento entre o feixe do laser e o sensor. Como trabalho futuro, indica-se o desenvolvimento de suportes 3D para superar esse problema. Além disso, vê-se a necessidade de usar resistores e capacitores de maior precisão e, realizar estudos para outros comprimentos de onda.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e ao Instituto Federal da Paraíba (IFPB) pelo auxílio no pagamento de bolsas e no ambiente laboratorial, respectivamente.

REFERÊNCIAS

ALVARO, Julie. **Cloreto Férrico: essencial no tratamento de água**. Disponível em: <https://www.quimica.com.br/cloreto-ferrico-essencial-no-tratamento-de-agua>. Acesso em: 29 set. 2025.

ARDUINO. **Arduino Documentation**. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/hardware/>. Acesso em: 31 jul. 2024.

BY ALLDATASHEET.COM, Provided. **TL07xx Low-Noise FET-Input Operational Amplifiers**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: www.ti.com.

CALDWELL, John. 1 MHz, Single-Supply, Photodiode Amplifier Reference Design. **Texas Instruments**, n. November, p. 1–21, 2014.

CHAVES, Laís E. **Placas eletrônicas: o que são? Para que servem?** Disponível em: <https://www.engenhariahibrida.com.br/post/placas-eletronicas-o-que-sao-para-que-servem>. Acesso em: 29 set. 2025.

DAS, Basudeb *et al.* Design of a 10 GHz optical wireless communication link using low power C-band laser diode. **Results in Optics**, v. 5, p. 100129, 2021.



DONATI, Silvano. Photodetectors: Devices, Circuits, and Applications. **Measurement Science and Technology**, v. 12, n. 5, p. 653–653, 1 maio 2001.

ELECTRONICS INC, Wavelength. Photodiode Basics: Selection & Operation. **Application Note**, n. 406, p. 1–4, 2020.

FERRARI, Giorgio *et al.* Transimpedance Amplifier for High Sensitivity Current Measurements on Nanodevices. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 44, n. 5, p. 1609–1616, maio 2009.

FUKUDA, Thiago Y. *et al.* Calibration of low-level laser therapy equipment. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 14, n. 4, p. 303–308, 2010.

IBRAMED. **Entenda tudo sobre FOTOBIMODULAÇÃO e como utilizar.**

JOKURA, Tiago. **Como funciona o raio laser?** Disponível em: <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-funciona-o-raio-laser/>. Acesso em: 29 set. 2025.

LUMITEX. **Color Visible Light Spectrum.** Disponível em: <https://www.lumitex.com/blog/visible-light-spectrum>. Acesso em: 15 fev. 2025.

OHRING, Milton; KASPRZAK, Lucian. Electronic Devices. *In: Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices*. 2a. ed. [S.l.]: Elsevier, 2015. p. 39–109.

OSRAM. **Ordering Information.** [S.l.: S.n.]. Disponível em: www.osram-os.com.

PONCHET, André da Fontoura. **Projeto de amplificadores de transimpedância de baixo ruído para redes ópticas de longa distância.** [S.l.]: Unicamp, Campinas, SP, 2016.

ROBBINS, Michael F. Op-Amp Transimpedance Amplifier. *In: Practical Circuit Design and Analysis*. 1. ed. [S.l.]: CircuitLab, 2021. p. 1.

SAHA, A. *et al.* A wireless optical power system for medical implants using low power near-IR laser. **Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS**, p. 1978–1981, 2017.

TEXAS INSTRUMENTS. **TL071/TL072/TL074 - Low-Noise JFET-Input Operational Amplifiers.** Dallas, 2017. Datasheet. Disponível em: www.ti.com.

TEXAS INSTRUMENTS. **Transimpedance amplifier circuit.** [S.l.: S.n.].

THORLABS. **PM20 Series Operation Manual.** [S.l.: S.n.]. Disponível em: <https://www.thorlabs.com/drawings/b5ff1368ad39f05e-D86FB9DA-ECEA-4447-074E4C914915369D/PM20A-Manual.pdf>.

THORLABS. **Medidores da Potência de Fibra Óptica com Sensor Interno.**



USINA INFO. **Placa Uno SMD compatível Arduino.** Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br>. Acesso em: 29 set. 2025.

WASSER, Leah A. **The Basics of LiDAR - Light Detection and Ranging - Remote Sensing.** Disponível em: <https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/lidar-basics>. Acesso em: 15 fev. 2025.

