



Aparato didático de baixo custo para demonstração experimental de um sistema WDM

Luiz Henrique Bonani
CECS, Universidade Federal do ABC
luiz.bonani@ufabc.edu.br

RESUMO Este artigo aborda os detalhes da construção de um aparato didático de baixo custo para a demonstração experimental de um sistema WDM, constituído por um LED RGB como fonte de luz, um segmento de fibra óptica POF de PMMA como canal, um divisor de potência e filtros ópticos de absorção construídos com filmes BOPP (papel celofane) como demultiplexador e um fotorreceptor cujo projeto foi minuciosamente detalhado. Uma placa Arduino Uno foi utilizada para a geração de sinais, e conectores personalizados foram desenvolvidos para a interligação dos componentes, podendo ser fabricados por meio de impressão 3D. É um projeto totalmente replicável, com toda a descrição técnica disponível.

Palavras-chave: Aparato Didático, Comunicações Ópticas, Sistema WDM.

ABSTRACT: This article details the construction of a low-cost didactic apparatus for the experimental demonstration of a WDM system, consisting of an RGB LED as a light source, a segment of PMMA POF optical fiber as a channel, an optical power splitter, and optical absorption filters constructed with BOPP films (cellophane paper) as a demultiplexer, and a photoreceptor whose design was meticulously detailed. An Arduino Uno board was used for signal generation, and custom 3D-printable connectors were developed for interconnecting the components. It is a fully replicable project, with all technical descriptions available.

Keywords: Didactic Apparatus, Optical Communications, WDM System.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.21397343>



INTRODUÇÃO

A tecnologia de comunicações ópticas tem suas pedras fundamentais lançadas em 1960, com a invenção do laser [1], e em 1962, com o desenvolvimento do diodo laser [2][3] e a demonstração prática do diodo emissor de luz (LED) [4]. Com a demonstração da viabilidade de uma fibra óptica de baixas perdas para o envio de sinais ópticos em 1966 [5], foi possível o desenvolvimento dos primeiros sistemas ópticos de comunicação na década de 1970, com a disponibilidade de LEDs baratos e confiáveis, fibras ópticas comerciais de baixas perdas e lasers semicondutores operando à temperatura ambiente [6].

E assim, são essas fontes de luz – LEDs e lasers – que permitiram a evolução dos sistemas ópticos de comunicação ao longo dos últimos 50 anos, sem que nenhum outro meio físico tenha superado sua capacidade, medida pelo produto da taxa de bits pela distância alcançada. Esse aumento vertiginoso de capacidade se deve à utilização de estratégias de envio simultâneo de múltiplos sinais ópticos compartilhando a mesma fibra, a exemplo da multiplexação por divisão de comprimentos de onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*), que utiliza múltiplos canais padronizados pela ITU-T que trafegam por um mesmo meio óptico.

A estratégia WDM é uma tecnologia-chave para compreender a grande capacidade dos sistemas ópticos de comunicação, mas, ao mesmo tempo, sua implantação comercial depende de vários dispositivos de alto valor agregado e alto custo, como múltiplos lasers e moduladores (um para cada canal óptico), multiplexadores, fibras, demultiplexadores e fotorreceptores. Assim, a abordagem experimental dessa tecnologia torna-se um grande desafio quando o objetivo é didático, pois nem todo laboratório universitário dispõe da multiplicidade de dispositivos necessários. Além disso, quando disponíveis, muitas vezes não é possível replicar um experimento na escala necessária para que múltiplos alunos se beneficiem. Por fim, a segurança dos estudantes durante as práticas experimentais de comunicações ópticas frequentemente limita a manipulação direta de determinados dispositivos.

Dado este cenário, a próxima seção descreve um aparato didático de baixo custo, utilizando uma placa de prototipagem Arduino Uno como modulador de um LED RGB comum (fonte de luz). Esses sinais são enviados por um segmento de fibra óptica para iluminação (canal óptico), demultiplexados por um divisor de potência simples e por

filtros de absorção, e recuperados por um receptor óptico cujo componente principal é um fotodiodo. Para as interligações entre os componentes desse setup foram projetados conectores personalizados que podem ser construídos em uma impressora 3D. O resultado é um conjunto experimental acessível e replicável por qualquer interessado, que permite demonstrar um sistema WDM e possibilita a abordagem didática de outros conceitos básicos de sistemas ópticos de comunicação.

DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

O aparato didático é constituído por uma fonte de luz, um canal óptico, um demultiplexador com filtros de absorção e um fotorreceptor. Nas subseções a seguir, serão discutidos os detalhes de cada componente.

Transmissor óptico

Um LED RGB, que emite luz nas cores vermelha (R), verde (G) e azul (B), é a fonte de luz escolhida para a demonstração do sistema WDM. Os LEDs têm sido utilizados em larga escala desde os primeiros sistemas ópticos de comunicação, não tendo perdido seu apelo em determinados cenários devido à sua confiabilidade, vida útil, ótima compatibilidade com fibras multimodo e baixo custo de produção e de utilização.

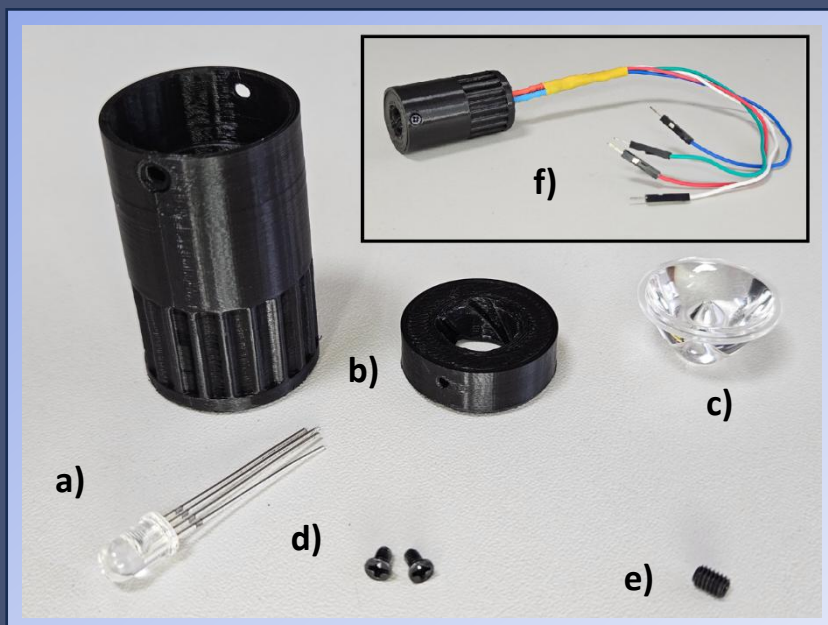


FIGURA 1: Transmissor óptico: a) LED RGB; b) visão das duas partes do corpo impresso em 3D; c) lente convergente de 5°; d) parafuso M2 de 5 mm para junção do corpo da transmissão; e) parafuso Allen M3 sem cabeça de 4 mm para fixação do LED no corpo do transmissor, usando o chanfro; f) Transmissor com suas conexões elétricas (resistores são soldados aos terminais do LED).

O feixe de luz proveniente do LED é colimado por meio de uma lente convergente, com ângulo de saída de 5°, para melhor acoplamento à fibra óptica. O conjunto é integrado a um corpo plástico fabricado em impressora 3D e dotado de conector

helicoidal fêmea, projetado especificamente para esta atividade didática experimental. O material usado para a construção do protótipo foi PLA; porém, é possível que outros tipos de filamento sejam utilizados. Esta estratégia permite que o próprio conjunto do transmissor óptico atue como um multiplexador, injetando simultaneamente três faixas de comprimentos de onda (cores) no mesmo canal óptico. A Figura 1 mostra os detalhes do transmissor, com o LED, a lente, a visão do corpo do transmissor RGB, suas conexões elétricas e a conectorização óptica fabricada em impressora 3D. Dois parafusos com rosca M2 e 5 mm de comprimento foram usados para fixar as duas partes do corpo do transmissor, e um parafuso Allen M3, sem cabeça, com 4 mm de comprimento foi usado para fixar o LED no corpo do transmissor, utilizando o chanfro do componente. As peças em questão já preveem os furos para os parafusos no projeto para impressão.

Tabela 1 – Especificações do LED RGB

Característica	Especificação
Encapsulamento	5 mm com lente transparente
Ângulo de espalhamento	30°
Emissão espectral	R: 620-625 nm; G: 515-520 nm; B: 450-455 nm
Intensidade luminosa	R: 2000-3000 mcd; G: 15000-18000 mcd; B: 7000-8000 mcd
Tensão de polarização	R: 2,0-2,2 V; G/B: 3,0-3,2V
Corrente máxima	20 mA por cor
Resistores série	R: 470 Ω ; G/B: 820 Ω
Conexões	ânodo: cabo branco; cátodo R: cabo vermelho; cátodo G: cabo verde; cátodo B: cabo azul

As especificações do LED RGB utilizado estão descritas na Tabela 1, sendo basicamente um LED com ânodo (polo positivo) comum e resistores em série, cujos valores foram escolhidos para um melhor balanceamento de potência em cada terminal. As cores dos cabos foram escolhidas para coincidir com a cor da luz emitida e terminam com conectores *Modu* machos. A luz emitida pelo transmissor, em cada uma das cores, pode ser modulada por uma onda gerada por uma placa de prototipagem Arduino Uno ou por qualquer outra com características semelhantes. A possibilidade de utilizar um LED com cátodo (polo negativo) comum também existe e só demandaria algumas alterações nas ligações ao Arduino Uno e no código utilizado para a geração dos sinais a serem enviados simultaneamente pelo canal óptico.

Canal óptico

O canal óptico será composto por um segmento de 3 metros de fibra óptica POF (*Plastic Optical Fiber*) de PMMA (*polimetilmetacrilato*), usada para iluminação, com brilho final (*end glow*). Este tipo de fibra é de fácil acesso e de baixo custo. Deve-se notar que a escolha da característica de brilho final é importante para evitar que parte da potência escape pela casca, garantindo que, em geral, a propagação ocorra apenas pelo núcleo da fibra óptica. Cada segmento de fibra é dotado de dois conectores helicoidais, macho e fêmea, em cada extremidade, projetados para este aparato e fabricados por meio de impressão 3D.

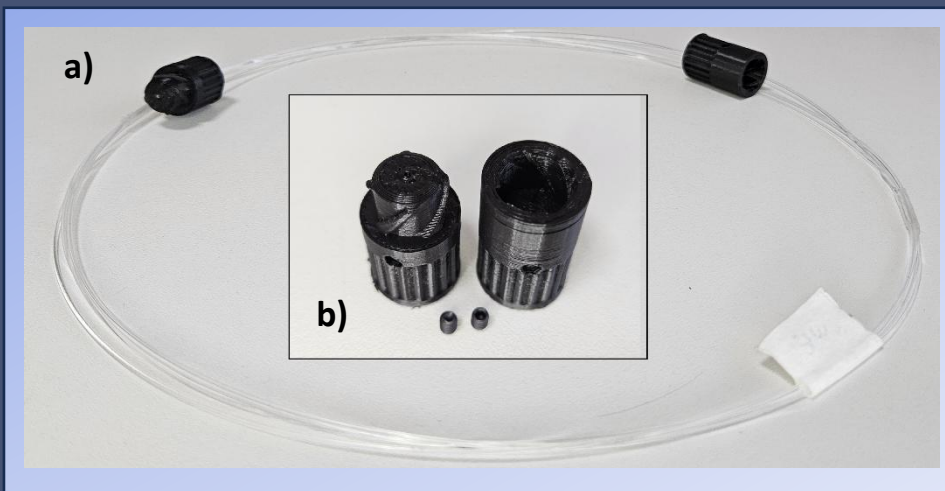


FIGURA 2: a) segmento de fibra óptica POF PMMA dotado de dois conectores helicoidais macho e fêmea construídos com impressora 3D; b) detalhe dos conectores, com seus parafusos de fixação para as fibras.

A plataforma de criação de sólidos *Tinkercad* [7] foi usada para projetar os conectores e teve projetos disponíveis como inspiração inicial, mas que foram completamente projetados de outra forma, principalmente no que se refere ao método de travamento das conexões, que se dá por acúmulo de atrito e rotação. A fibra óptica adotada possui diâmetro de 1000 μm e núcleo de 980 μm . Apesar da dificuldade em encontrar dados técnicos específicos sobre as fibras, em geral, apresentam abertura numérica de 0,47, índice de refração do núcleo de aproximadamente 1,49 e atenuação da ordem de 0,5 dB/m.

Os conectores helicoidais foram projetados especificamente para a dimensão das fibras ópticas utilizadas e levam em conta sua fixação por meio de parafusos Allen M3, sem cabeça, com 4 mm de comprimento. Os conectores podem se conectar entre si (macho e fêmea), bem como aos módulos do transmissor, do receptor e do demultiplexador. A Figura 2 mostra o projeto de ambos os conectores, bem como um

segmento de fibra óptica pronto para uso. As fibras POF PMMA não passam pelo processo de clivagem, mas uma boa conexão requer um corte reto, seguido de lixamento em etapas, começando com lixa d'água 400 e chegando a 2500.

Demultiplexador

Para que o experimento de WDM seja possível, é necessário dividir a potência em três partes e filtrar os componentes espectrais da luz para obter, individualmente, os três comprimentos de onda (cores) de interesse. A divisão de potência foi obtida de maneira elementar, por meio da sobreposição do núcleo da fibra óptica de transmissão aos núcleos de outras três fibras ópticas no próprio demultiplexador, aproveitando o fato de essas fibras apresentarem abertura numérica elevada. Para tanto, um conector macho foi construído com este propósito específico. Outras possibilidades de construir o divisor de potência de forma simples serão testadas no futuro. Após a divisão de potência, as três fibras passam por um processo de filtragem para selecionar o comprimento de onda (cor) de interesse.



FIGURA 3: a) módulo demultiplexador completo, composto por três fibras, com b) detalhe do conector de entrada e c) detalhe dos conectores de saída com seus respectivos filtros de cor feitos a de filmes BOPP.

A filtragem é realizada por meio da inserção de filtros de absorção constituídos por filmes BOPP (*polipropileno biorientado*), de fácil obtenção e comumente conhecidos como “papel celofane” em conectores fêmeas. Como o LED gera três ondas moduladas nos comprimentos de onda correspondentes às cores vermelha, verde e azul, são necessários filmes nas mesmas cores para a construção do filtro e separação dos comprimentos de onda. A Figura 3 apresenta o demultiplexador, destacando o divisor de potência e os filtros de cor.

Receptor óptico

O módulo receptor é composto por um circuito de fotodetecção, seguido de um circuito com amplificador de áudio. O principal componente do circuito fotodetector é um fotodiodo de silício do tipo PIN, modelo SFH203P, com encapsulamento de 5 mm e responsividade. Este componente foi escolhido por apresentar boa responsividade na região da luz visível, conforme dados técnicos fornecidos pelo fabricante. O circuito de fotodetecção é projetado em dois estágios: o primeiro é um amplificador de transimpedância que converte a potência óptica recebida pelo fotodiodo em um nível de tensão. Portanto, este circuito faz com que a tensão de saída seja proporcional à potência óptica recebida. O segundo estágio é um circuito amplificador na configuração inversora, com ganho de aproximadamente -10, de modo a recuperar a fase original do sinal enviado. Os dois estágios do circuito de fotodetecção foram projetados com o chip OPA2134, que possui dois amplificadores operacionais encapsulados, largura de banda de 8 MHz e baixos níveis de distorção. A alimentação deve ser simétrica para evitar limitações de sinal e foi realizada com ± 9 V, fornecidos por baterias. Possivelmente, podem-se usar fontes simétricas para o mesmo propósito, visto que foram introduzidos capacitores de desacoplamento na entrada de alimentação dos chips. Foi construído um conector macho helicoidal para acomodar o fotodetector e mantê-lo preso por meio de seu chanfro e de um parafuso Allen sem cabeça M3 com 2 mm de comprimento.

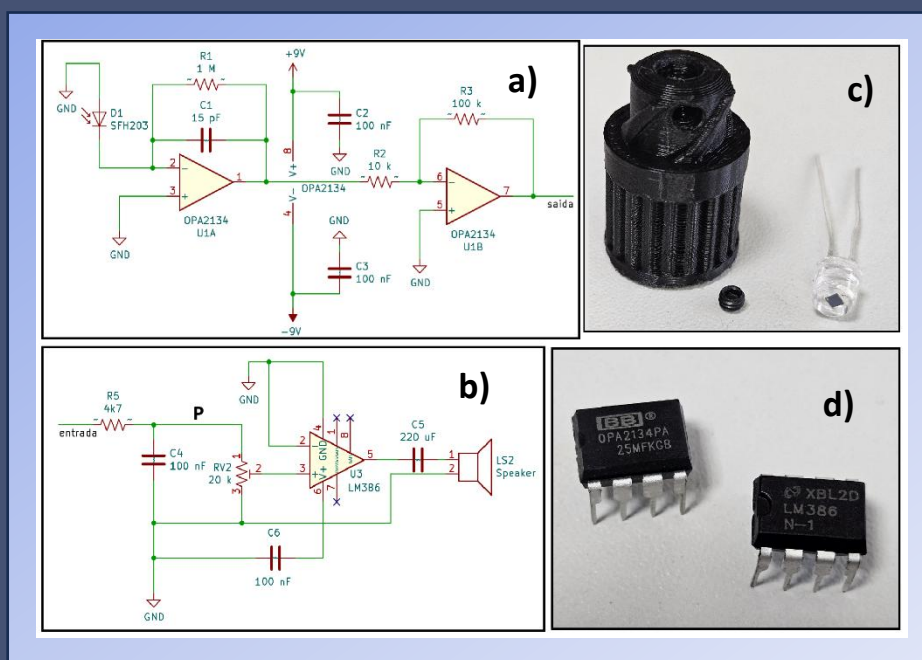


FIGURA 4: a) esquemático do circuito fotodetector; b) esquemático do circuito amplificador de áudio com filtro passa-baixas; c) fotodiodo SFH203P e detalhe de seu conector helicoidal; d) circuitos integrados OPA2134 e LM386 (DIP8) usados no fotorreceptor.

Alguns cuidados especiais para o desenvolvimento do projeto são: a resistência do resistor R1 deve ser suficientemente alta para gerar uma tensão em resposta à fotocorrente do fotodetector. Porém, valores elevados de resistência podem acarretar excesso de ruído térmico, comprometendo o processo de fotodetecção. Já o capacitor C1 atua na estabilidade do processo de fotodetecção, e o ideal é que tenha um valor entre 10 e 50 pF. Uma vez que, juntamente com o resistor R1, C1 forma um filtro passa-baixas que limita a largura de banda de operação, valores altos de capacitância tendem a suavizar as transições de sinal, o que é problemático para certas aplicações. Porém, valores muito baixos dessa capacitância tendem a tornar o processo de fotodetecção mais instável, com o aparecimento de sinal residual mesmo na ausência de luz incidente. Para o protótipo, sugere-se um valor de 22 pF para C1. Tanto C1 como o fotodiodo devem ser colocados o mais próximo possível do OPA2134 para diminuir a influência indesejada de capacitâncias parasitas.

O circuito receptor ainda é composto por um filtro passa-baixas de primeira ordem, com frequência de corte teórica de aproximadamente 338 Hz, que suaviza as transições de um sinal de áudio retangular. Esse sinal é injetado em um amplificador de áudio composto por um chip LM386, ligado a um alto-falante com impedância de 8 Ω e 0,5 W de potência. O volume do áudio recuperado pode ser ajustado por meio de um *trimpot* de 20 k Ω . Os circuitos descritos foram desenvolvidos com montagem em placa de prototipagem padrão e *protoboard*, com detalhes apresentados na Figura 4. Embora não testado, foi gerado um projeto de PCB para o circuito do fotorreceptor, no qual os circuitos fotodetector e o amplificador de áudio são conectados por um jumper.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O experimento tem início com o carregamento do código disponível em [8]. Este código gera três sinais de áudio diferentes e simultâneos a partir da variação das frequências e das durações de ondas retangulares, de acordo com as melodias escolhidas. Os vetores de frequência e de duração foram gerados a partir dos códigos originais disponíveis em [9]. O esquema adotado corresponde a uma forma de modulação por duração de pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*), mas não é necessário usar uma porta PWM do Arduino Uno. Como a onda gerada é essencialmente quadrada, aplicou-se um filtro passa-baixas na entrada do amplificador de áudio para atenuar as

transições. Por questões de simplicidade e de custo, um mesmo circuito receptor foi usado, alternando sua ligação nas três portas de saída do demultiplexador.

Foram escolhidas as melodias referentes a três trechos de músicas clássicas bastante conhecidas para serem transmitidas. Assim, o primeiro sinal gerado é um trecho da música “Ode à Alegria”, que integra a Nona Sinfonia de Beethoven. O segundo sinal gerado é um trecho da música “Greensleeves”, de autor desconhecido e datada do final do século XVI. O terceiro sinal gerado é um trecho da música “Minueto em Sol Maior”, composta por Christian Petzold por volta de 1720 e popularizada por Johann Sebastian Bach por sua presença na coletânea “Caderno de Anna Magdalena Bach”.

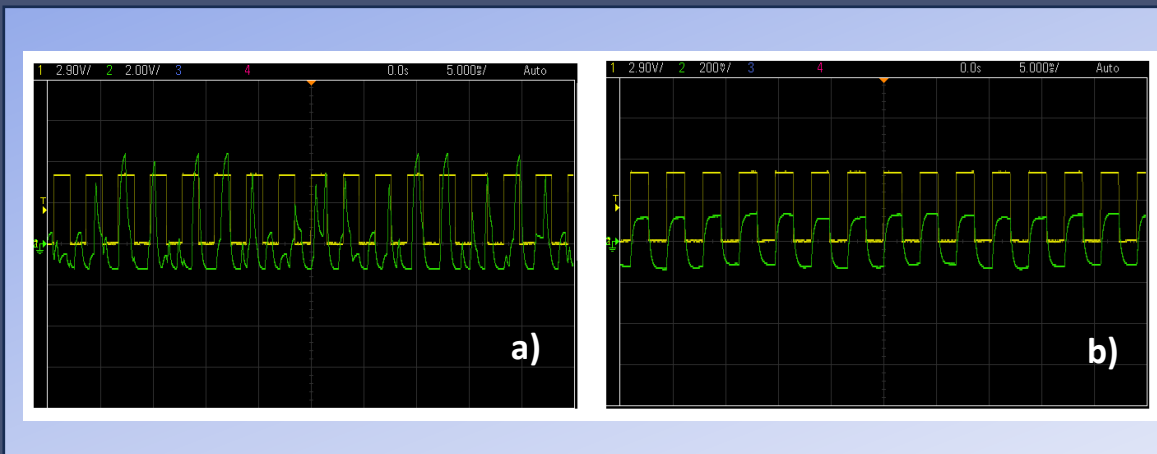


FIGURA 5: Em verde: a) sinal com a saída da fibra óptica conectada diretamente ao circuito fotorreceptor (sem o demultiplexador); b) usando uma das portas do demultiplexador. Em amarelo: referência de um dos sinais gerados pelo Arduino Uno.

Questões conceituais a serem observadas são as cores da luz obtida na saída do transmissor, tanto quando cada canal (cor) é modulada separadamente (ligando e desligando os terminais do transmissor da placa arduino Uno) quanto quando todos os canais (cores) são modulados simultaneamente, com todos os terminais do transmissor ligados ao arduino Uno. Além disso, o áudio recuperado é uma ótima métrica para avaliação da prova de conceito. A Figura 5a mostra, em verde, o sinal obtido na saída do filtro passa-baixas (ponto P na Figura 4b) quando a saída da fibra óptica é conectada diretamente ao circuito do fotorreceptor (sem o demultiplexador, e, portanto, com a influência simultânea de todos os canais no receptor). Em amarelo está a referência de um dos sinais gerados pelo Arduino Uno. Já a Figura 5b mostra o resultado quando o demultiplexador é utilizado para filtrar um dos canais de cor. Nesse caso, a entrada do fotodetector é ligada à saída de uma das portas do demultiplexador. O áudio obtido também é de grande valor didático na comparação dos resultados.

Algo inicialmente não previsto na concepção do experimento é que a recuperação de um dos canais sofreu interferência de um canal adjacente, percebida em áudio como um sinal de fundo fraco, composto por outra melodia. Isso provavelmente ocorre porque o filtro BOPP utilizado não corresponde exatamente à faixa de comprimentos de onda requerida. Com isso, foi possível demonstrar o conceito de interferência intercanal (ICI - *Inter-Channel Interference*) em WDM e, inclusive, medir o nível dessa interferência por meio de um procedimento experimental adequado usando o osciloscópio.

Não são apresentados detalhes adicionais do experimento, a fim de preservar os resultados obtidos, para possíveis roteiros experimentais que usem esse aparato. É importante relatar que tentou-se transmitir voz em um dos canais. Porém, como é necessária uma alta taxa de amostragem para preservar o conteúdo espectral, o hardware do arduino Uno não suportou a demanda e passou a introduzir *jitter* nos demais canais. Mudanças de hardware para arquiteturas como a ESP32 são consideradas e podem ser úteis para futuras aplicações, desde que se usem conversores de nível lógico de 3,3 V para 5 V, devido à alimentação do LED RGB.

CONCLUSÕES

Neste artigo, apresentaram-se todos os detalhes da implementação de um aparato didático de baixo custo e escalável para a demonstração experimental de um sistema WDM. Os resultados do experimento foram discutidos e o conceito pôde ser validado. Além disso, é importante destacar que o mesmo aparato, quando aplicado a diferentes cenários, pode ser utilizado para abordar outros conceitos pertinentes a sistemas ópticos de comunicação.

APÊNDICE

Com o intuito de tornar acessível a construção do aparato didático descrito, está sendo disponibilizado o código para Arduino para a geração das ondas, no qual consta a pinagem para a ligação do módulo transmissor. Da mesma maneira, um arquivo com as referências de fornecedores dos principais componentes, um arquivo com o esquemático do circuito, arquivos de projeto para a PCB e projetos de conectores em STL para impressão 3D também estão disponíveis no repositório [8].



AGRADECIMENTOS

O autor agradece a leitura e os comentários dos professores Eric Alberto de Mello Fagotto e Marcelo Luis Francisco Abbade

REFERÊNCIAS

- [1] T. Maiman, “Stimulated Optical Radiation in Ruby”, *Nature*, Vol. 187, pp. 493–494, 1960. <https://doi.org/10.1038/187493a0>.
- [2] R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T.J. Soltys, R. O. Carlson, “Coherent Light Emission From GaAs Junctions”, *Physical Review Letters*, Vol. 9, No. 9, pp. 366-368, 1962. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.9.366>.
- [3] M.I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns, F. H. Dill, G. Lasher; “Stimulated Emission of Radiation from GaAs p-n Junctions”, *Appl. Phys. Lett.* 1, Vol 1, No. 3, pp. 62-64, 1962. <https://doi.org/10.1063/1.1777371>.
- [4] N. Holonyak, S. F. Bevacqua, “Coherent (visible) Light Emission from Ga(As_{1-x}P_x) Junctions”, *Appl. Phys. Lett.* 1, Vol. 1, No. 4, pp. 82-83, 1962. <https://doi.org/10.1063/1.1753706>.
- [5] K.C. Kao, G.A. Hockham, “Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies”, *Proc. of the Institution of Electrical Engineers*, Vol. 113, No. 7, pp. 1151 – 1158, 1966. <https://doi.org/10.1049/piee.1966.0189>.
- [6] L. H. Bonani, E. A. M. Fagotto, M. L. F. Abbade, “Sistemas de comunicação ótica: do surgimento à maturidade”, *Revista da SBFoton*, Vol 3, pp-27-39, 2023. <http://doi.org/10.5281/zenodo.14890678>.
- [7] Autodesk Tinkercad, <https://www.tinkercad.com>, Acesso em 01/05/2026.
- [8] Luiz H. Bonani, “Aparato Didático de Baixo Custo para Demonstração Experimental de um Sistema WDM (Arquivos)”, *Mendeley Data*, V1, 2026. <https://doi.org/10.17632/d2dykfr4fd.1>.
- [9] Músicas para Arduino, <https://dragaosemchama.com/2019/02/musicas-para-arduino/>, Acesso em 01/05/2026.