

MICROPOSICIONADOR AUTOMATIZADO PARA APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE ÓPTICA NO ESPAÇO LIVRE

Elaine Ap. Inacio¹ (IC), Ramon M. Borges¹ (PQ)

¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: Palavras-chave: Bluetooth, FSO, microposicionador.

Introdução

Óptica no espaço livre (FSO - *Free Space Optics*) é uma tecnologia de comunicação que transmite informações em sinais de luz não visível através do ar, não exigindo meio físico cabeado entre os transceptores. Tal característica é vantajosa por viabilizar sistemas ópticos mesmo em situações onde é difícil ou inviável instalar a fibra óptica. Aplicações típicas remetem, por exemplo, à comunicação em linha de visada entre prédios, sob lagos ou entre *chips* fotônicos em circuitos avançados. Dispositivos e *chips* ópticos não- conectorizados demandam também recursos de FSO para acoplamento da luz em fibra óptica caso desejado. Com a chegada das redes celulares de quinta geração (5G) e as investigações sobre a sexta geração (6G), FSO tem se tornado uma tecnologia atrativa estando presente inclusive entre as soluções técnicas listadas como potenciais para as redes futuras [1].

Apesar do potencial descrito, FSO enfrenta desafios significativos relacionados a condições atmosféricas e alinhamento. Condições atmosféricas como neblina, poeira e partículas no ar podem degradar o sinal óptico durante a propagação, comprometendo o desempenho do enlace. Já o alinhamento entre a fonte de luz e o receptor de luz, necessário para viabilizar o sistema FSO, requer precisão micrométrica e estabilidade. Trata-se de um ponto crítico ao considerar que o sinal de luz em questão é não visível e com feixe estreito. Além disso, dependendo do local de instalação, promover ajustes no alinhamento traz desafios operacionais [2].

Tipicamente, utiliza-se microposicionadores para auxiliar o processo de alinhamento dos equipamentos nas extremidades do enlace FSO. Microposicionadores são dispositivos mecânicos com plataforma móvel, sob a qual é fixada a fibra óptica ou o elemento transceptor. O controle progressivo e minucioso do movimento desta

plataforma nos eixos X, Y e Z (ou em apenas um ou dois destes) permite ajustes no alinhamento até que a condição ótima de acoplamento da luz seja atingida, referente à situação de menor perda de potência óptica. Existem no mercado vários tipos de microposicionadores com características distintas:

1. Microposicionadores manuais: Controlam a plataforma móvel através de um ou mais bastões giratórios, que ao serem manualmente rotacionados, a deslocam em uma ou mais direções. Embora sejam simples e capazes de proporcionar bons resultados devido a precisão micrométrica, demandam tempo significativo no ajuste manual e podem impor dificuldades operacionais em ambientes de difícil acesso [3].

2. Microposicionadores piezoelétricos: Utilizam materiais piezoelétricos que se deformam quando uma tensão elétrica é aplicada. Esses dispositivos permitem precisão e ajustes com resolução pequena. No entanto, comumente demandam controle eletrônico especializado e podem ser mais caros [4].

3. Microposicionadores eletromagnéticos: Funcionam através de campos eletromagnéticos para mover a plataforma de forma precisa. Esses dispositivos são menos suscetíveis a desgaste mecânico, mas podem ter limitações de capacidade de carga, além de elevar a complexidade do controle [5].

4. Microposicionadores hidráulicos e pneumáticos: Utilizam fluidos para gerar movimento e ajuste. Esses dispositivos podem oferecer alta capacidade de carga e estabilidade, mas são geralmente mais volumosos e complexos, podendo demandar manutenção adicional [6].

5. Microposicionadores Motorizados: Utilizam motores para realizar ajustes na posição da plataforma e são normalmente controlados por cabos que são

conectados a controladores via interfaces Ethernet, USB ou RS-232. Embora proporcionem controle preciso e repetibilidade, a presença de cabos pode limitar a flexibilidade e a facilidade de uso [7].

Este trabalho reporta uma inovação ao propor um microposicionador óptico automatizado e com controle sem fio para aplicações em sistemas FSO. O objetivo é criar uma solução de baixo custo que facilite e flexibilize o processo de alinhamento, que passa a contar com ajustes precisos a distância sem necessidade de cabos entre controlador e microposicionador. São utilizados recursos de eletrônica, motor de passo, tecnologia Bluetooth e microposicionador comercial (do tipo manual) para desenvolvimento de um protótipo. A prova de conceito em laboratório demonstra o controle do microposicionador automatizado em distâncias de até 50 m, bem como a otimização no acoplamento da luz e a praticidade obtida no alinhamento FSO.

Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho teve o processo dividido em etapas distintas, desde a pesquisa teórica até a construção e testes do protótipo em laboratório.

1. Pesquisa teórica

A primeira etapa consistiu em uma pesquisa teórica sobre sistemas FSO, microposicionadores e tecnologias de automatização. O estudo inicial abordou fundamentos dos sistemas FSO, incluindo os desafios associados ao alinhamento preciso entre transmissores e receptores. Em seguida, a pesquisa focou em microposicionadores, analisando suas características, tipos e limitações. Posteriormente foi realizada uma análise das tecnologias de automatização e controle remoto, incluindo microcontroladores com o objetivo de identificar requisitos técnicos.

2. Seleção e especificação dos componentes

Com base nos os requisitos técnicos identificados, a seleção e especificação dos componentes foram realizadas. O motor de passo NEMA 17 foi escolhido devido à sua precisão. Este motor possui 200 passos por rotação ($1,8^\circ$ por passo), o que proporciona a precisão necessária para o microposicionador que possui uma faixa de medição de 0 a 25 mm, com uma resolução de 0.01 mm por divisão, e é capaz de realizar 50 voltas completas no eixo giratório. Para alcançar um deslocamento linear de 0.01 mm, o motor precisa

rotacionar aproximadamente 7.19° , o que equivale a cerca de 4 passos.

O *driver* L298N foi selecionado para controlar o motor de passo, garantindo que o sistema operasse com a corrente necessária sem comprometer a estabilidade dos componentes. O microcontrolador ESP32 foi escolhido por sua capacidade de comunicação sem fio via Bluetooth e sua compatibilidade com o *driver*. O microposicionador utilizado foi do tipo manual, referente ao modelo Thorlabs disponível no laboratório.

3. Desenvolvimento e testes do protótipo

O desenvolvimento do protótipo envolveu a montagem dos componentes e a integração do ESP32 com o motor de passo NEMA 17 e seu *driver*. Os componentes foram montados em uma placa perfurada para facilitar os testes. Os ensaios iniciais focaram na verificação da funcionalidade/resposta do motor e na comunicação com o *software* de comando, sem ainda envolver o cenário FSO.

Uma vez validada a operação do motor, iniciou-se a etapa de integração deste com o microposicionador. A primeira solução contou com correia dentada e polia acoplado o eixo do motor ao bastão giratório do microposicionador, o que permitiu os primeiros testes de funcionamento. A evolução desta estratégia levou à segunda solução, com eixo do motor acoplado diretamente ao microposicionador através de polias, permitindo maior precisão. Cabe ressaltar que diversas adaptações foram realizadas, com ajustes no sistema de correia dentada e impressão de várias versões de polias em impressora 3D, para otimizar a precisão e estabilidade.

O microposicionador automatizado foi então utilizado em cenário FSO para alinhar um feixe de luz não visível entre um laser não conectorizado e um cordão óptico monomodo. A outra extremidade deste cordão foi conectada a um medidor de potência óptica, usado para detectar o acoplamento da luz na fibra em função da potência recebida. A **Figura 1** apresenta uma fotografia da montagem experimental. Os dispositivos utilizados foram: TED200C - controlador de temperatura do laser (1); LDC205C - controlador de corrente do laser (2); TCLDM9 - estrutura de montagem do laser (3); diodo laser (4) centrado no comprimento de onda de 1550 nm; microposicionador manual (5); motor de passo NEMA 17 (6); microcontrolador ESP32 (7) em conjunto com o driver L298N (8) para controle do motor; sensor S122C (9) e medidor de potência PM400 (10).

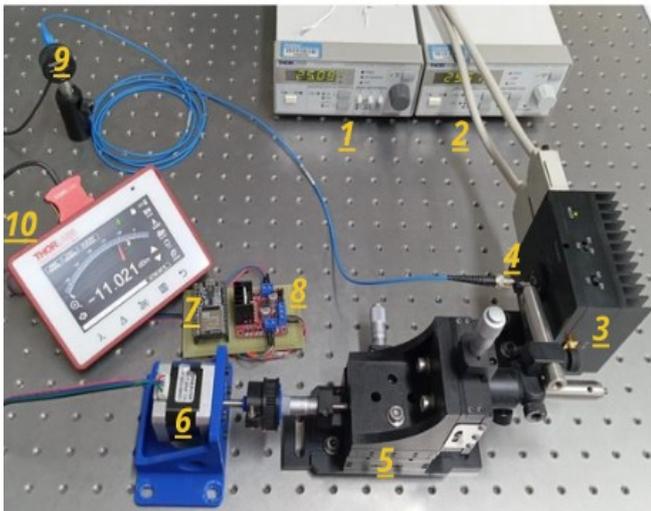


Fig. 1. Fotografia da montagem experimental.

4. Implementação do software de controle

O software de controle foi desenvolvido na plataforma Arduino e carregado no microcontrolador ESP32. O controle via Bluetooth foi realizado utilizando um aplicativo serial, permitindo enviar comandos no formato "&L000", onde "&" é um caractere de segurança, "L" indica a direção (com "R" para rotação à direita e "L" para rotação à esquerda), e "000" representa a quantidade de passos por vez (variando de 000 a 200).

Resultados e discussão

1. Desempenho do sistema automatizado

A Figura 2 reporta o comportamento da potência óptica medida ao longo do intervalo de ajuste do microposicionador (16:50h a 16:51h) e após o alinhamento (16:51h a 16:56h) já sem novos movimentos no bastão giratório. As oscilações registradas após ajuste indicam instabilidade de potência do laser utilizado. Foi importante conhecer tal instabilidade para não atribuí-la como consequência da solução proposta.



Fig. 2. Oscilação da potência do laser.

A Figura 3 apresenta a potência óptica acoplada no cordão em função dos movimentos do motor de passo durante o alinhamento automatizado, operando com 1 passo por vez. Os ajustes demonstram a capacidade do protótipo em realizar ajustes finos progressivos, provocando saltos na potência óptica até obter o maior valor. Ao desconsiderar a oscilação do laser, nota-se que a solução proposta mantém a potência óptica estável em cada passo, o que sugere a característica de estabilidade no alinhamento. Na Figura 4 são exibidos os comandos enviados ao motor de passo via Bluetooth, demonstrando correspondência entre o tempo dos comandos e o resultado observado.

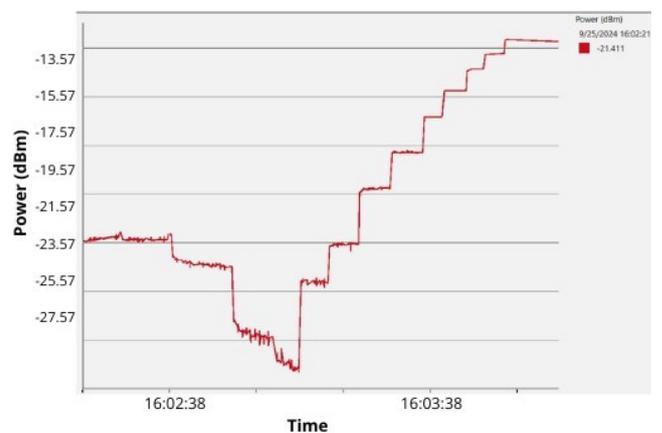


Fig. 3. Potência óptica em função do controle do microposicionador automatizado, considerando saltos de 1 passo.

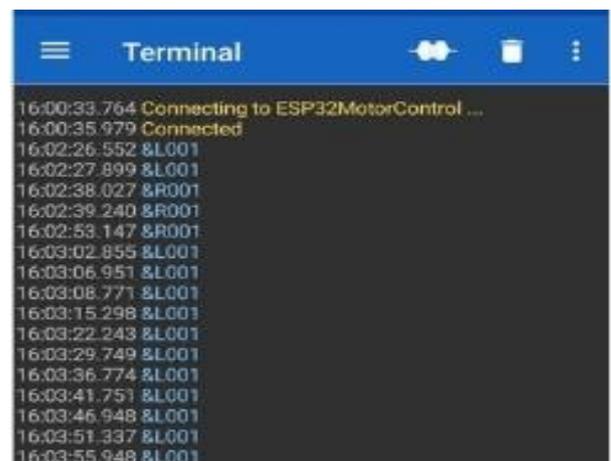


Fig. 4. Comandos enviados ao motor de passo.

A Figura 5 mostra um resultado obtido com ajuste exclusivamente manual do microposicionador. Observa-se saltos abruptos no valor da potência óptica até a condição de alinhamento, o que dificulta otimizações quando comparado ao uso do microposicionador automatizado.

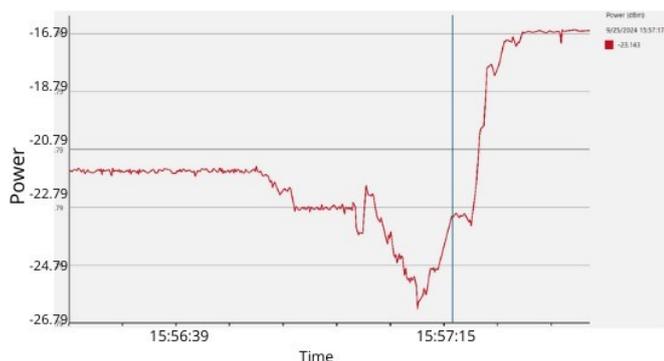


Fig. 5. Potência óptica em função do ajuste manual do microposicionador ao longo do tempo.

2. Desafios durante o desenvolvimento e os testes

2.1. Acionamento do motor de passo: O *driver* de motor inicial não suportava a corrente necessária, levando à substituição por um modelo mais adequado. Esse ajuste exigiu modificações no circuito e no código de controle para gerenciar adequadamente as rotações do motor, equilibrando a flexibilidade para ajustes finos e movimentos amplos.

2.2. Acoplamento mecânico: As polias impressas em 3D passaram por várias versões até alcançar um tamanho ideal que garantisse precisão e robustez. As primeiras versões incluíam limites laterais para evitar o escape da correia, enquanto as versões subsequentes foram ajustadas para um encaixe direto entre o eixo X do microposicionador e o eixo do motor.

2.3. Instabilidade do laser: A instabilidade persistente do laser, apesar do controle da temperatura e da corrente do mesmo, foi um desafio significativo, o que dificultou análises de estabilidade do sistema e comprometeu comparações com outras metodologias de alinhamento.

2.4. Comparação entre ajustes manuais e automatizados: Comprometida devido à instabilidade do laser. Entretanto, embora ambas as estratégias possibilitem alinhamento, os resultados sugerem que a solução automatizada oferece melhorias de desempenho quanto a otimização progressiva, além da maior praticidade no alinhamento controlado sem fio.

Conclusões

O artigo apresentou o desenvolvimento de um microposicionador automatizado com controle via Bluetooth para aplicação em sistemas FSO. Esta solução se destaca como alternativa ao ajuste manual de microposicionadores mecânicos e inova ao incorporar o

controle sem fio, trazendo praticidade operacional. O protótipo desenvolvido após ampla fundamentação teórica foi testado em laboratório com uma montagem experimental envolvendo acoplamento da luz oriunda de laser não conectorizado em cordão óptico monomodo. A função do protótipo foi auxiliar o processo de alinhamento entre laser e cordão óptico no cenário FSO. Os resultados experimentais demonstraram a capacidade do protótipo em realizar ajustes finos progressivos e precisos, em resposta a comandos de controle via Bluetooth enviados de até 50 m de distância. Apesar da instabilidade inerente ao laser, os resultados sugerem melhorias de desempenho fruto da otimização sistemática em relação à estratégia de ajuste manual. O trabalho traz contribuições para o campo das comunicações ópticas ao expor a viabilidade de uso de microposicionadores automatizados e com controle sem fio em aplicações FSO. Sugestões para trabalhos futuros incluem a miniaturização do protótipo e a comparação prática com outras soluções existentes.

Agradecimentos

Os autores agradecem a UNIFEI pelo suporte financeiro associado a bolsa de Iniciação Científica e infraestrutura laboratorial. Os autores agradecem também o prof. José Alberto F. Filho, a equipe do LabTel e os engenheiros Nedson Maia e José Reis pelo suporte técnico prestado.

Referências

- [1] FILGUEIRAS, H. R. D. et al. Wireless and optical convergent access technologies toward 6G. *IEEE Access*, v. 11, Jan. 2023.
- [2] KAUSHAL, H.; KADDOUM, G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 19, 2017.
- [3] THORLABS. Plataformas de flexura e posicionadores de 3 eixos. Plataformas multi-eixos.
- [4] SHIEH, H. J.; HUANG, P. K. Adaptive tracking control of a piezoelectric micropositioner. In: *IEEE International Conference on Industrial Electronics and Applications*, Singapore, 2006.
- [5] CHEN, M.-Y.; HUANG, H.-H.; HUNG, S.-K.; FU, L.-C. Design and implementation of a new 3-DOF electromagnetic micropositioner utilizing flexure mechanism. In: *American Control Conference*, Minneapolis, USA, 2006.
- [6] PHYMÉP. *Micropositioner hydraulic with 25mm travel*. Disponível em: <https://www.phymep.com/produit/micropositioner-hydraulic-with-25mm-travel/>. Acesso em: 03 out. 2024.
- [7] HORSLEY, D. A.; SINGH, A.; PISANO, A. P.; HOROWITZ, R. Angular micropositioner for disk drives. In: *International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, 1997.