

REVISTA DA

sbfoton

Vol. 4 - Jun/2024

ISSN 2966-0726

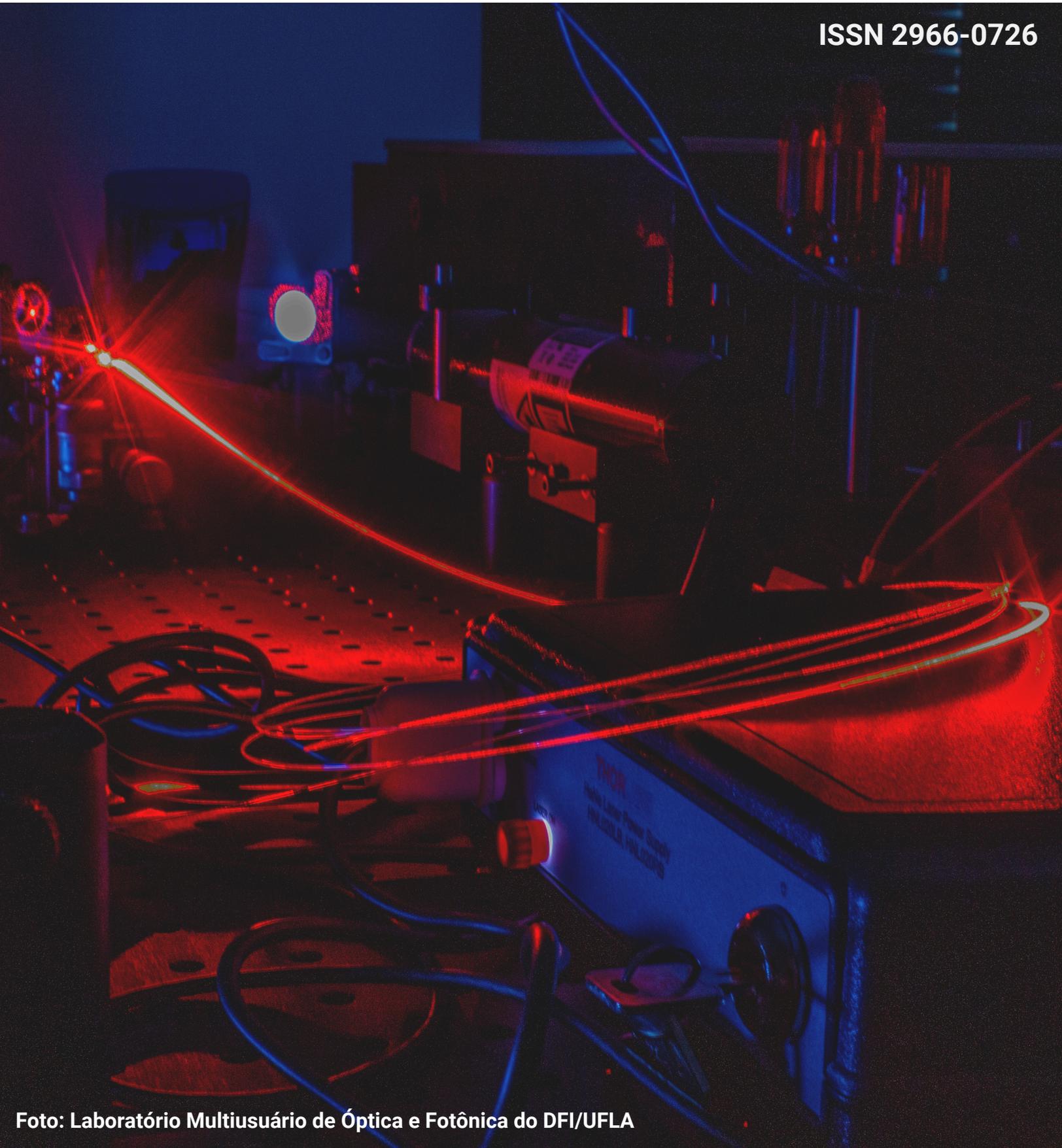


Foto: Laboratório Multiusuário de Óptica e Fotônica do DFI/UFLA



Revista de divulgação
científica da Sociedade
Brasileira de Ótica e Fotônica

Expediente

Editor-chefe

Marcio Peron Franco de Godoy

Corpo Editorial: Alexandre de Almeida Prado Pohl, Cristiano Monteiro de Barros Cordeiro, Eduardo Fontana, Luciana Reyes Pires Kassab

Colaboradores: Camilla Teodoro e Gabriela Pinheiro

Autores dos artigos

Alexandre A. C. Cotta, André L. Moras, Diego C. Fuzatto, Fabrício L. Figueiredo, Flavio A. M. Marques, Jefferson E. Tsuchida, João B. Rosolem, Jonas H. Osório, Julio C. Ugucioni, Luís A. M. Barêa, Maurício Casotti, Mauro Vieira de Lima, Newton C. Frateschi, Paulo H.D. Ferreira, Rafael C. Figueiredo, Rivaél S. Penze, Rodney, Nascimento, Tiago Sutili

Diretoria SBFoton

Presidente: Alexandre de Almeida Prado Pohl/ UTFPR

Diretor Administrativo: Diego José Rátiva Millan/ UPE

Diretor de Relações Institucionais: Denise Zezell/ IPEN

Diretor de Relações com Empresas: Manuel Steidle/ Fundação CERTI

Diretor de Eventos: Luiz Henrique Bonani do Nascimento/ UFABC

Diretor de Publicações: Marcio Peron Franco de Godoy/ UFSCar

Diretor de Educação: Bruno Rodrigues Gama/ Padtec

ISSN 2966-0726

Os artigos publicados nesta Revista representam a visão e opinião dos autores e podem não representar a opinião da Editoria da Revista.

ENDEREÇO

Cidade universitária Zeferino Vaz, Av. Albert Einstein, 400.
Distrito de Barão Geraldo, CEP 13083-852 - Campinas - SP

Carta do Editor

Em mais um passo no fortalecimento da Revista da SBFoton, obtivemos recentemente o ISSN que é a sigla em inglês para o Número Internacional Normalizado para Publicações Seriadas (*International Standard Serial Number*) Este é um código utilizado para o registro internacional de documentos periódicos, como jornais, revistas e trabalhos científicos e representa um marco para o nosso veículo. Isso não seria possível sem a colaboração de muitas mãos envolvidas no processo: autores(as), estagiários(as), corpo editorial e ao Prof. Alexandre Pohl pelo incentivo dado na SBFoton para a consolidação desta iniciativa.

Este quarto volume da revista traz artigos instigantes que abordam os sensores ópticos que empregam a tecnologia das chamadas moléculas fotônicas, a experiência no ensino de óptica nos laboratórios universitários, as iniciativas do Sistema Nacional de Laboratórios de Fotônica (Sisfóton) e o emprego de relógios ópticos na definição da unidade de tempo fundamental: o segundo.

Ótima Leitura,
Marcio Peron Franco de Godoy



*Marcio Peron Franco de Godoy,
Editor-Chefe*

Mensagem do Presidente

A SBFoton tem realizado um enorme esforço para a divulgação da ótica e fotônica em nosso país. Exemplo desse esforço é a sua revista que, neste momento, chega ao seu quarto volume. Sobretudo, ficamos felizes com a conquista do ISSN, que eleva a publicação a um novo status. Com isto esperamos atrair novas contribuições e ampliar o número de autores e leitores. A periodicidade da revista e a dedicação de nosso corpo editorial contribuem enormemente para o fortalecimento da publicação e sua consolidação como importante veículo de divulgação de nossas atividades.

Desejo a todos uma instrutiva e gratificante leitura, fazendo votos que os trabalhos agora publicados enriqueçam o conhecimento de um grande número de leitores!

Cordiais Saudações,
Prof. Alexandre Pohl
Presidente da SBFoton

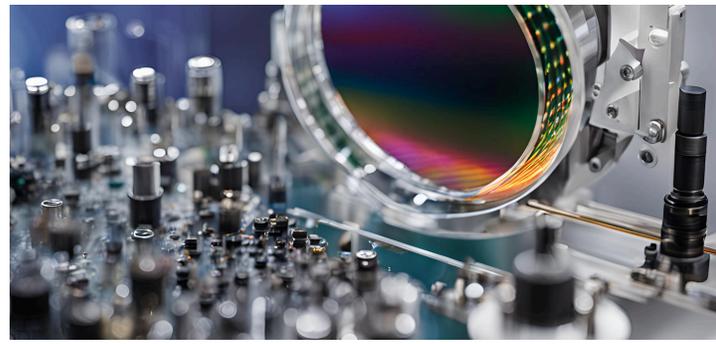


*Alexandre Pohl,
Presidente da SBFoton*

SUMÁRIO

- 3
Carta do Editor
- 4
Mensagem do Presidente
- 6
Notícias da SBFoton
- 7
Moléculas fotônicas e seu impacto em sensores ópticos
- 14
Ensino de óptica e fotônica utilizando instrumentação a
experiência do curso de engenharia física da
Universidade Federal de Lavras
- 20
Laboratório Integrador do Sisfóton e seu papel no
ecossistema de fotônica no Brasil
- 25
Redefinição do segundo e disseminação de relógios óticos

Notícias da SBFoton



A SBFoton, fundada em 2017, é pessoa jurídica de direito privado, sob a forma de associação civil sem fins lucrativos, exclusivamente de caráter científico, tecnológico e de inovação. Seus objetivos são o incremento da pesquisa e inovação em ótica e fotônica e a criação no Brasil de um ambiente propício ao seu desenvolvimento.

Seus associados são docentes, pesquisadores, empresários, engenheiros, técnicos, estudantes e empresas, todos interessados no estudo, desenvolvimento e aplicação da luz em diversas áreas do conhecimento.

Você também pode ser parte desta sociedade.

Associe-se em:

<https://www.sbfoton.org.br/associese>

Newsletter

A *Newsletter da SBFoton* é um veículo de comunicação quinzenal com as principais notícias de Ótica e Fotônica do Brasil e do mundo. Com mais de 140 edições, conta com editorias especializadas em biofotônica, comunicações e redes óticas, lasers, ótica e instrumentação, ótica integrada e sensores. Além das notícias técnicas, divulga também convites para eventos, conferências e oportunidades profissionais e acadêmicas.

Acesse as edições anteriores e assine nossa newsletter.

Eventos

Periodicamente, a SBFoton realiza eventos de forma presencial e remota, como o encontro anual SBFoton IOPC e os webinários.

2024 SBFoton IOPC International Optics and Photonics Conference

Salvador - BA
11-13 de novembro de 2024

Moléculas fotônicas e seu impacto em sensores ópticos

André L. Moras¹, Paulo H.D. Ferreira², Newton C. Frateschi¹ a e Luís A. M. Barêa²
¹ Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP); ² Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

A fotônica integrada é uma importante área tecnológica e científica que permite criar e manipular a luz de forma controlada e precisa em regiões de dimensões reduzidas. Assim como a eletrônica permite controlar a eletricidade e os elétrons em *chips* eletrônicos, a fotônica integrada permite controlar a luz e os fótons em *chips* fotônicos miniaturizados. Por meio da fotônica integrada, é possível criar dispositivos ópticos denominados de guias de ondas, os quais são capazes de confinar e guiar a luz em circuitos fotônicos. Conforme pode ser observado na figura 1(a), os guias de ondas são compostos de um núcleo, geralmente envolto em óxido tanto por cima (TOX) quanto por baixo (BOX). O confinamento da onda ocorre quando o índice de refração do núcleo do guia é maior do que o índice de refração dos óxidos que o envolvem. Além disso, os guias de ondas podem comportar dois tipos de modos eletromagnéticos: Transversal Elétrico (TE) e Transversal Magnético (TM). As figuras 1(b) e 1(c) mostram a norma do campo elétrico na

seção transversal do guia para os modos fundamentais TE e TM, respectivamente. É interessante observar que a direção da descontinuidade do campo elétrico é diferente em cada caso. Os guias de ondas podem ser utilizados para formar microcavidades ressonantes, conectando sua entrada e saída por exemplo, formando anéis ressonantes. As microcavidades ressonantes são dispositivos capazes de confinar a luz em uma região diminuta, da ordem de micrômetros, por um tempo relativamente longo, permitindo a geração de alta potência luminosa em uma região espacial muito pequena. Devido a essas características, as cavidades ópticas apresentam ressonâncias com larguras de linha muito finas, ou seja, com altos fatores de qualidade (Q), e muito sensíveis às variações do ambiente ao seu redor, o que as tornam bastante promissoras para criação de novos sensores. Nas últimas décadas, tem-se observado um grande avanço na pesquisa e desenvolvimento de dispositivos fotônicos baseados em cavidades ópticas acopladas para aplicações em diversas áreas, co-

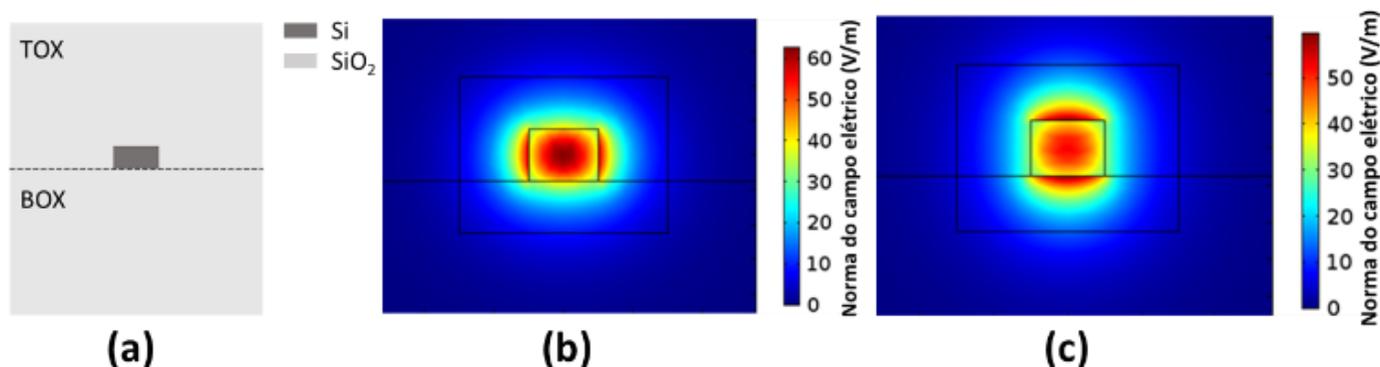


Fig. 1. (a) Ilustração da seção transversal de um guia de ondas de silício (Si) envolto por dióxido de silício (SiO₂). TOX: *Top Oxide*. BOX: *Bottom Oxide*. Simulações dos modos fundamentais (b) TE e (c) TM na seção transversal do guia.

mo engenharia espectral, óptica quântica, processamento de sinais e sensores ópticos [1] - [16]. Esses dispositivos podem ser chamados de Moléculas Fotônicas (PMs) devido à sua semelhança com as moléculas químicas. Assim como átomos distintos se unem para formar moléculas mais complexas com características singulares, cavidades distintas, quando acopladas, interagem entre si para formar moléculas fotônicas com novas propriedades que dependem principalmente desta interação. As PMs são estruturas fotônicas compostas de duas ou mais cavidades ressonantes acopladas em diversas configurações, o que permite alcançar novas respostas espectrais que não são possíveis empregando cavidades únicas independentes acopladas apenas com um guia de onda. O emprego de PMs permite um controle mais preciso das características espectrais dos dispositivos fotônicos em uma área reduzida do *chip*. Em [1], por exemplo, pesquisadores mostraram que é possível quebrar a relação intrínseca entre o espaçamento espectral livre (FSR), o fator de qualidade (Q) e o tamanho da cavidade utilizando PMs. Nesse mesmo trabalho, os autores também demonstraram PMs com dupletos e tripletos ressonantes, cuja distância espectral das ressonâncias só pode ser alcançada usando anéis únicos muito maiores. Já em [3], o uso de PMs garantiu a demonstração de transmissão de um mesmo sinal para quatro ressonâncias separadas de 50 GHz, utilizando somente 1 mW de potência de controle. Para efeito de comparação, seriam necessárias dimensões e potência de controle dez vezes maiores para alcançar o mesmo efeito empregando um único anel. Partindo para a área de sensores ópticos, o uso de PMs permitiu demonstrar um aumento da sensibilidade dos sensores

[15], com redução na dependência com variações de temperatura [16], tornando-os mais eficazes e confiáveis. No entanto, mesmo com todas as características favoráveis para aplicações em sensoriamento, ainda há pouco trabalho na literatura explorando o uso de PMs em sensores, o que as tornam interessantes para inovações nessa área.

A figura 2 ilustra os princípios básicos de operação de um sensor óptico baseado em PMs. Conforme pode ser observado nas figuras 2(a) e 2(b), apenas a cavidade interna é exposta ao meio ambiente, enquanto que o restante do dispositivo permanece coberto e protegido pelo revestimento de SiO₂. Dessa forma, somente a cavidade interna do dispositivo é sensível às variações do índice de refração do ambiente próximo à superfície do sensor, o que pode ser provocado, por exemplo, pela presença de uma substância desconhecida. Por esse motivo, a cavidade interna e a região exposta são denominadas, respectivamente, de cavidade de detecção e região de detecção. A cavidade externa é utilizada como referência e por isso é denominada de cavidade de referência, responsável pela inserção das ressonâncias de referência no espectro da PM. A figura 2(c) mostra o *chip* com sensores integrados posicionado sobre um *setup* de caracterização e, na figura 2(d), é possível ver uma micrografia do *chip* após a aplicação de uma solução aquosa de etilenoglicol (EG) com 5% de concentração. A figura 2(e) mostra o espectro de transmissão do sensor de PM antes e após a detecção de um elemento desconhecido. O espectro da PM pode ser obtido utilizando um laser sintonizável na entrada e um medidor de potência sincronizado com o laser. Os vales

observados correspondem às ressonâncias da cavidade de detecção (λ_{antes} e $\lambda_{\text{após}}$) e referência (λ_{ref}). Dessa forma, a resposta do sensor é definida como $c = \Delta\lambda_{\text{após}} - \Delta\lambda_{\text{antes}}$ [16]. Porém, como utilizamos uma PM onde apenas a cavidade de detecção é exposta, temos a possibilidade de realizar medidas diferenciais, definidas como:

$$\Delta\lambda_{\text{após}} = \lambda_{\text{após}} - \lambda_{\text{ref}} \text{ e } \Delta\lambda_{\text{antes}} = \lambda_{\text{antes}} - \lambda_{\text{ref}}$$

Em outras palavras, a resposta do sensor corresponde basicamente ao desvio ressonante da ressonância de detecção com relação às ressonâncias de referência. Nessas condições, a sensibilidade às variações de índice de refração (RI) do sensor de PM pode ser definida como:

$S_{\text{RI}} = \Delta\lambda_{\text{res}}/\Delta n$, onde Δn corresponde à variação do índice de refração do material presente na região de detecção. Conforme pode ser observado na figura 3(a), que mostra o espectro de transmissão do sensor de PM em função da temperatura do dispositivo, tanto as ressonâncias de referência quanto de detecção sofrem um desvio espectral para o vermelho (comprimento de onda maiores) com o aumento da temperatura. Vale comentar que, nesse experimento, a tempe-

ratura do dispositivo foi estabelecida e controlada por um sistema de controle contendo um termistor para a medida de temperatura e um elemento Peltier para resfriamento do chip. A figura 3(b) mostra que os desvios espectrais sofridos pelas ressonâncias de detecção e referência não são exatamente iguais, pois as cavidades não são idênticas. No entanto, a diferença entre os desvios, que está associada à resposta diferencial do sensor, é muito pequena. Nesse caso, equivalente à $(0,008 \pm 0,002)$ nm/°C. Portanto, a dependência da temperatura é 10 vezes menor para a resposta diferencial do sensor de PM do que cada cavidade individual. Esses resultados mostram que o emprego da cavidade de referência nessa configuração reduz significativamente a dependência da temperatura, promovendo aumento da especificidade e confiabilidade do sensor. O uso de dispositivos ópticos de referência para reduzir efeitos provocados por variações de temperatura tem sido reportado por vários autores [17]-[19]. No entanto, o emprego em PMs é uma novidade e precisa ser todavia mais explorado. Para se

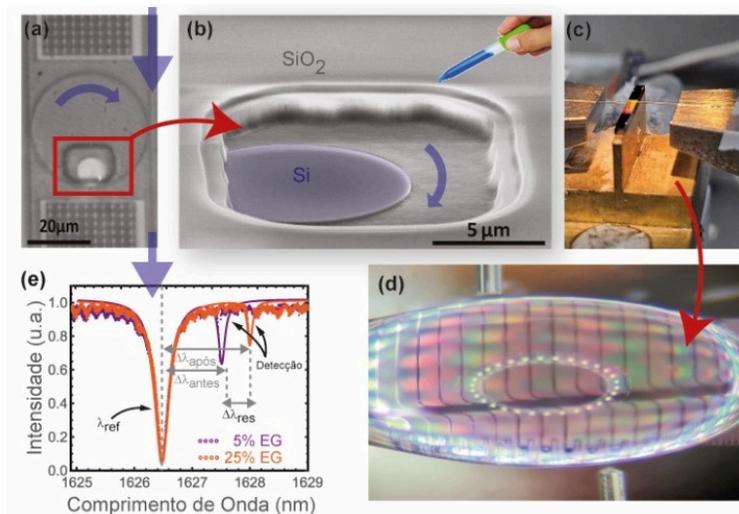


Fig. 2. (a) Imagem de microscopia óptica do sensor de PM. (b) Imagem de microscopia eletrônica da região de detecção aberta sobre uma parte do microdisco, que nesse caso é a cavidade de detecção. (c) Foto do chip fotônico em uma plataforma de caracterização. (d) Foto da vista superior do chip no setup de caracterização e após a aplicação do analito alvo (solução aquosa de etilenoglicol). (e) Espectro de transmissão do sensor. A curva laranja mostra o desvio ressonante provocado pela alteração do índice de refração da região de detecção após mudança da concentração de EG diluído em água (5% EG para 25% EG).

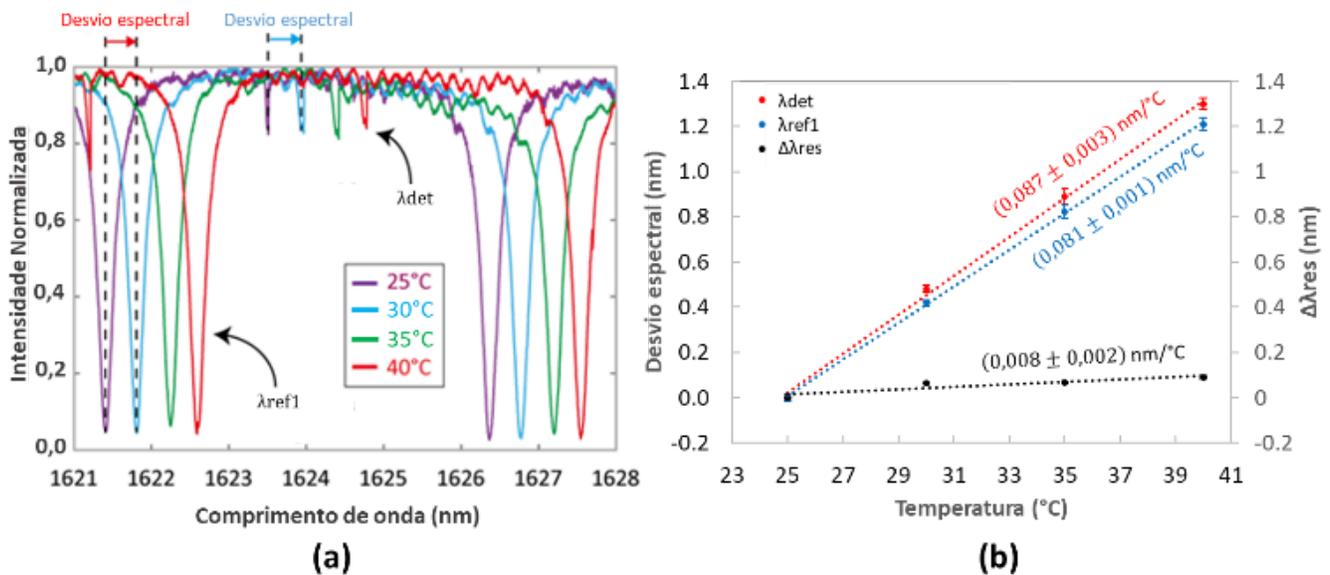


Fig. 3: (a) Espectro de transmissão do sensor de PM em temperaturas distintas. Encontram-se destacados os desvios espectrais sofridos pelas ressonâncias de detecção (λ_{det}) e referência (λ_{ref1}) quando a temperatura aumenta de 25°C a 30°C. (b) Desvios espectrais das ressonâncias de detecção (vermelho) e referência (azul), e resposta diferencial do sensor (preto), em função da temperatura. Figura alterada de [16].

ter uma ideia do impacto dos resultados apresentados, o sensor de PM mostrado e sua metodologia de detecção encontram-se protegidos por uma patente [20] e tem potencial para aplicações imediatas na indústria. Porém, o impacto das características das PMs em sensores não está limitado apenas na maneira simples de redução da dependência com variações da temperatura. Em 2022, pesquisadores da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), junto com a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), mostraram por meio de simulações que é possível aumentar ainda mais a sensibilidade dos sensores de PM de duas formas, (1) aumentando o tamanho da região de detecção e, (2) realizando o estrangulamento do guia de onda que forma a cavidade de detecção, presente na região de detecção. A figura 4(a) ilustra o sensor de PM proposto no trabalho em questão. É importante obser-

var que a cavidade interna apresenta formato de anel, permitindo o estrangulamento do guia de onda que forma essa cavidade. Os parâmetros w_t e w_L representam, respectivamente, a largura do guia estrangulado e o perímetro exposto do anel de detecção. A figura 4(b) mostra o espectro de transmissão do sensor de PM simulado para água pura e com 5% de EG diluído em água, tanto para cavidade de detecção sem estrangulamento quanto para cavidade estrangulada ($w_t = 300$ nm), ambas com janela de detecção idênticas com valor de $w_L = 126$ μ m, e em uma condição sem considerar perdas de propagação inerentes aos materiais. É importante observar que a ressonância de referência praticamente não sofre desvio com o aumento da concentração da solução, enquanto a ressonância de detecção sofre um desvio espectral para o vermelho com o aumento da concentração.

A figura 4(d) mostra a sensibilidade RI do sensor de PM em função de wL e para várias larguras de guia (w_t). Pode-se observar que para todas as larguras, a sensibilidade RI do sensor aumenta com o aumento do tamanho da região de detecção. Esse aumento ocorre basicamente devido ao aumento da interação entre o modo ressonante na cavidade de detecção e o material presente na região de detecção. Os resultados também mostram que a sensibilidade RI do sensor aumenta com o estrangulamento do guia, isto é, quanto mais reduzida for a largura do guia, maior será a sensibilidade RI. Conforme pode ser observado na figura 4(c), o estrangulamento do guia da cavidade de detecção reduz o confinamento do modo ressonante, permitindo uma maior interação com o material da região de detecção, o que promove aumento da sensibilidade do dispositivo. Em particular, estima-se nesse trabalho que é possível alcançar uma sensi-

bilidade RI de 264 nm/RIU quando o guia da cavidade de detecção é estrangulado para 300 nm e o perímetro exposto do anel de detecção é equivalente a 126 μm , o que corresponde à 50% de exposição da cavidade de referência ao analito. Apesar dos estudos e resultados já alcançados e mostrados pela comunidade científica no desenvolvimento e aplicação de PMs em sensores ópticos, ainda há muito a ser explorado. No caso do sensor com guias estrangulados, todavia falta uma demonstração experimental. Além disto, é importante observar que os dois principais trabalhos citados e apresentados nesse texto correspondem a sensores de PM baseados em duas cavidades acopladas. Quase não há estudos, por exemplo, no emprego de PMs compostas de três ou mais cavidades acopladas em diversas topologias para aplicações de sensores ópticos. Configurações mais complexas de PMs permitem novas condições espectrais espe-

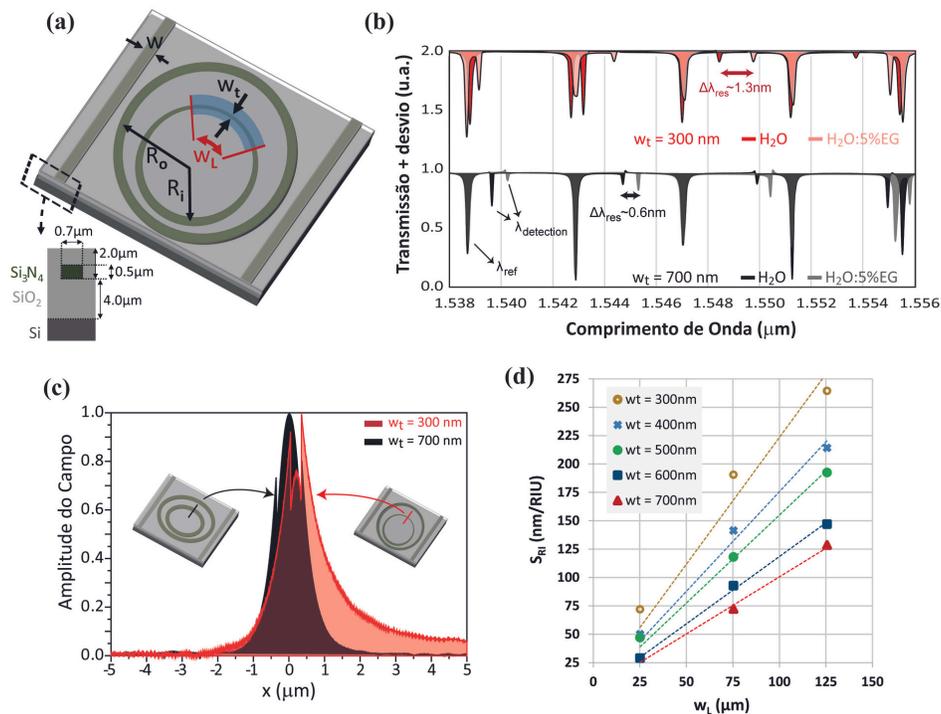


Fig. 4: (a) Ilustração do sensor de PM mostrando as cavidades de detecção ($R_i=40\mu\text{m}$) e referência ($R_o=50\mu\text{m}$). As distâncias entre guia de onda e cavidade externa e, entre cavidades interna e externa, são equivalentes a 700nm e 500nm, respectivamente. (b) Espectro de transmissão do sensor de PM simulado para água pura e 5% EG diluído em água, tanto para cavidade de detecção sem estrangulamento quanto para cavidade estrangulada ($w_t = 300 \text{ nm}$), ambas com janela de detecção $w_L = 126 \mu\text{m}$. (c) Perfil da norma do campo elétrico do modo TE da cavidade de detecção na região com e sem estrangulamento. (d) Sensibilidade RI versus estrangulamento do guia de onda da cavidade de detecção (w_L). Figura alterada de [21].

ciais únicas, como o surgimento de tripletos, quadrupletos e sextupletos de ressonâncias, as quais podem ser extensivamente exploradas para uso em aplicações de detecção com novas abordagens além dos métodos diferenciais apresentadas aqui. Essas novas abordagens são caminhos de pesquisa da colaboração entre grupos da Unicamp e UFSCar e apontam, por exemplo, para possibilidade de uso de pontos excepcionais em PMs [22], que são singularidades espectrais que exibem uma forte resposta espectral às perturbações externas, com potencial de incrementar ainda mais a sensibilidade dos sensores, ou a investigação do espalhamento de luz nas PMs, permitindo a realização de medidas no domínio espacial onde cada cavidade da PM passa a ser um pixel [23].

Os autores agradecem à FAPESP (2018/25339-4) e ao CNPq (Projeto 3105432021-5).

Referências

[1] L.A.M. Barea et al., "Spectral Engineering With CMOS Compatible SOI Photonic Molecules", IEEE Photonics Journal, vol. 5, no. 6, pp. 2202717, (2013) Art n° 2202717, doi: 10.1109/JPHOT.2013.2289977.

[2] L.A.M. Barea et al., "Silicon technology compatible photonic molecules for compact optical signal processing". Applied Physics Letters, **103**, 201102 (2013) doi: 10.1063/1.4829743

[3] M.C.M.M. Souza et al., "Embedded coupled microrings with high-finesse and close-spaced resonances for optical signal processing," Opt. Express **22**, 10430 (2014) doi: 10.1364/OE.22.010430

[4] M.C.M.M. Souza et al., "Spectral engineering with coupled microcavities: active control of resonant mode-splitting" Opt. Lett. **40**, 3332 (2015) doi:10.1364/OL.40.003332

[5] M.C.M.M. Souza et al., "Modeling quasi-dark states with temporal coupled-mode theory," Opt. Express **24**, 18960 (2016). doi: 10.1364/OE.24.018960

[6] G.F.M. de Rezende et al., "Tunable, Reconfigurable and Active Silicon Photonic Devices employing Photonic Molecules," in Latin America Optics and Photonics Conference (2018), paper Th2A.3, doi: 10.1364/LAOP.2018.Th2A.3.

[7] Ó.B. Helgason et al., "Dissipative solitons in photonic molecules". Nat. Photonics **15**, 305 (2021). doi: 10.1038/s41566-020-00757-9

[8] Kun Liao et al., "Photonic molecule quantum optics," Adv. Opt. Photon. **12**, 60 (2020). doi: 10.1364/OE.27.037579

[9] S.Woska et al., "Tunable coupling of chip-scale photonic molecules via thermal actuation," Opt. Mater. Express **11**, 3194 (2021). doi: 10.1364/OME.432655

[10] M. Borghi et al., "Four Wave Mixing control in a photonic molecule made by silicon microring resonators". Sci Rep **9**, 408 (2019). doi: 10.1038/s41598-018-36694-5.

[11] M.C.M.M. Souza et al., (2016). "Tunable photonic molecules for spectral engineering in dense photonic integration". Future Trends in Microelectronics: Journey into the Unknown, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA.

[12] A.L. Moras et al., "Development of SOI sensor using simulations based on the effective index method", in Frontiers in Optics + Laser Science (2022), paper JTU5A.82, doi: 10.1364/FIO.2022.JTU5A.82.

[13] A.L. Moras et al., "Silicon nitride photonic molecules for robust sensing applications," in Frontiers in Optics / Laser Science (2020), paper JTh4B.12. doi: 10.1364/FIO.2020.JTh4B.12.

[14] L.A.M. Barea et al., "Photonic molecules for application in silicon-on-insulator optical sensors", Proc. SPIE 10537, Silicon Photonics XIII, 105371B (2018). doi: 10.1117/12.2287844.

[15] X. Zhou et al., "On-Chip Biological and Chemical Sensing With Reversed Fano Lineshape Enabled by Embedded Microring Resonators" IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, **20** (3), 35 (2014). doi: 10.1109/JSTQE.2013.2294465.

[16] Andre L. Moras et al., "Integrated Photonic Platform for Robust Differential Refractive Index Sensor", IEEE Photonics Journal **12** (5), 3024856, (2020); doi:10.1109/jphot.2020.3024856

[17] D. Kim et al., "On-chip integrated differential optical microring refractive index sensing platform based on a laminar flow scheme," Opt. Lett. **40**, 4106 (2015).

- [18] X. Tu et al., "Thermal independent Silicon-Nitride slot waveguide biosensor with high sensitivity," *Opt. Express* **20** (3), 2640 (2012). doi: 10.1364/OE.20.002640
- [19] L. Jin et al., "Optical waveguide double-ring sensor using intensity interrogation with a low-cost broadband source," *Opt. Lett.*, **36** (7), 1128 (2011). doi: 10.1364/OL.36.001128.
- [20] L.A.M. Barea et al., Patente: Privilégio de Inovação. N°do registro: BR1020170270157, "BIOSSENSOR ÓPTICO INTEGRADO, MÉTODO DE DETECÇÃO E USOS DO BIOSSENSOR", Instituição de registro: INPI - Depósito: 14/12/2017. Concessão: 16/01/2024.
- [21] A.L. Moras et al., "Enhanced Sensitivity Photonic Molecule Sensor based on Embedded Tapered Microring Resonators," in 2022 IEEE Photonics Conference (IPC), (2022), 1. doi: 10.1109/IPC53466.2022.9975699.
- [22] J. Wiersig, "Review of exceptional point-based sensors," *Photon. Res.*, PRJ **8** (9), 1457 (2020). doi: 10.1364/PRJ.396115.
- [23] J. Wang et al., "Silicon coupled-resonator optical-waveguide-based biosensors using light-scattering pattern recognition with pixelized mode-field-intensity distributions" *Sci Rep.* **4** (1), 7528 (2014). doi: 10.1038/srep07528.

Ensino de óptica e fotônica utilizando instrumentação: a experiência do curso de engenharia física da Universidade Federal de Lavras

Flavio A. M. Marques, Jonas H. Osório, Alexandre A. C. Cotta, Jefferson E. Tsuchida, Julio C. Ugucioni,
Diego C. Fuzatto
Laboratório Multiusuário de Óptica e Fotônica (LaMOF), Instituto de Ciências Naturais, Departamento de Física,
Universidade Federal de Lavras

Ao se considerar o contexto científico e tecnológico atual, nota-se que as áreas de óptica e fotônica são habilitadoras para os novos desenvolvimentos em ciência fundamental e aplicada. Assim, a formação de profissionais com sólidos conhecimentos em física aplicados à engenharia e capazes de atender às demandas por inovação e tecnologia se torna imperativo. Dessa forma, a formação em engenharia física desponta como área estratégica, já que tais profissionais são especializados em elaborar, gerenciar e executar projetos avançados em diversas áreas, tanto em empresas e indústrias, quanto em institutos de pesquisa e universidades, agregando, assim, valor tecnológico à sociedade.

No curso de graduação em Engenharia Física oferecido pelo Departamento de Física (DFI) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), o foco da formação do aluno está na instrumentação, o que é essencial para o desenvolvimento tecnológico do país. Com uma base sólida em ciências básicas, os alunos são preparados para aplicar seus conhecimentos na resolução de problemas em ciência, tecnologia e inovação, abrangendo tópicos como mecânica quântica, física do estado sólido, eletrônica e optoeletrônica. A formação multidisciplinar capacita o engenheiro físico a desenvolver instrumentação de alta tecnologia e contribu-

ir para o avanço de novos materiais em áreas como engenharia e nanotecnologia, tornando-o apto a enfrentar os desafios tecnológicos do presente e do futuro [1].

No oitavo período do curso de Engenharia Física, os alunos são introduzidos à disciplina teórica obrigatória de óptica e fotônica. Durante esta disciplina, os estudantes adquirem conhecimentos fundamentais sobre óptica e fotônica, explorando uma ampla gama de tópicos, incluindo o estudo das ondas eletromagnéticas, interação da luz com a matéria, fontes de luz coerentes e incoerentes, tipos de fotodetectores, e temas avançados como holografia e displays de cristal líquido [2, 3, 4]. No semestre seguinte, os alunos se dedicam à disciplina prática de Instrumentação em Óptica e Fotônica, onde aplicam os conceitos teóricos na montagem e desenvolvimento de instrumentos ópticos completos, com aplicações práticas em diversas áreas como científica, industrial ou didática. Esta abordagem prática visa capacitar os alunos a utilizar a instrumentação óptica de forma eficaz na resolução de problemas reais. Nos parágrafos seguintes, descrevemos uma seleção de projetos desenvolvidos pelos alunos na disciplina acima mencionada de modo a ilustrar a experiência da equipe do Laboratório Multiusuário de Óptica e Fotônica (LaMOF) no ensino de óptica e fotônica por meio da instrumentação.

No primeiro semestre em que a disciplina foi oferecida (2022/2), os alunos se empenharam no desenvolvimento de um espectrômetro [5]. Partindo de uma estrutura não funcional que havia sido enviada para descarte, os alunos projetaram e construíram uma fonte de tensão simétrica para alimentar o amplificador do fotodiodo e estabeleceram o interfaceamento do Arduino para aquisição de dados via comunicação serial [6, 7]. Utilizaram ainda controladores de ponte H para regular os motores de passo responsáveis pelo movimento das fendas de entrada e saída do feixe de luz, bem como da grade de difração, e realizaram o processo de calibração.

As Figuras 1a e 1b ilustram detalhes internos e externos do aparato, destacando seus principais componentes, como a grade de difração associada a um motor de passo, o fotodiodo amplificado, as fendas, os espelhos e a eletrônica controlada pelo Arduino. A Figura 1c ilustra a calibração do sistema utilizando lâmpadas de hélio, mercúrio e hidrogênio. Na Figura 1c, são apresentados os picos de emissão da lâmpada de hélio em relação aos passos do motor, com os valores de comprimento de onda indicados em nanômetros, permitindo a realização da calibração do espectrômetro de maneira precisa. Além disso, os alunos desenvolveram uma interface gráfica utilizando o ambiente

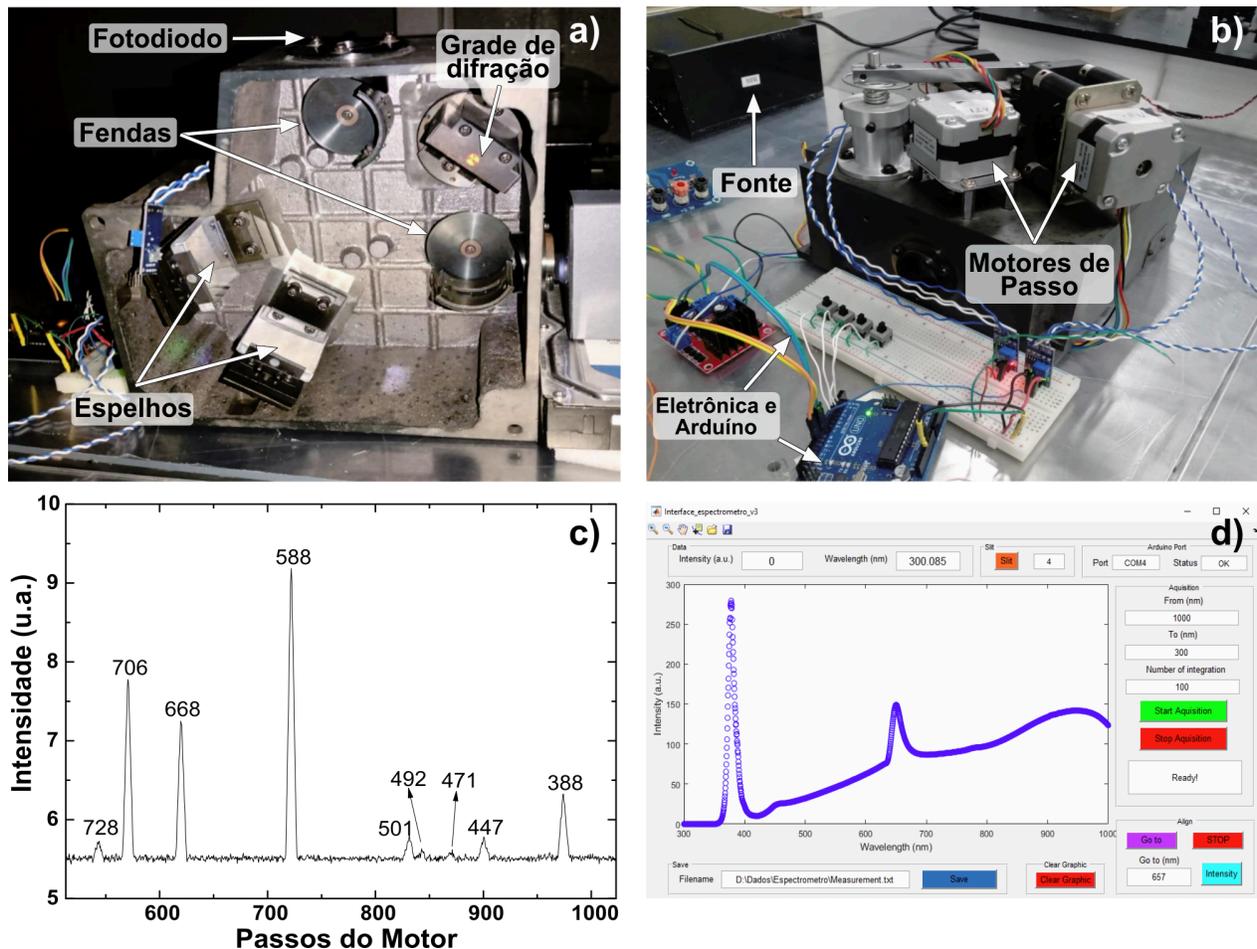


Figura 1. Montagem do espectrômetro: a) Vista interna, destacando os principais componentes; b) Vista externa mostrando a estrutura física e disposição dos elementos; c) Espectro da lâmpada de hélio em relação aos passos do motor, com valores de comprimento de onda em nanômetros; d) Interface gráfica desenvolvida no *MATLAB (GUIDE)* para operação do espectrômetro.

de desenvolvimento de interfaces gráficas do MATLAB (GUIDE, Figura 1d). Essa interface permite a visualização em tempo real dos espectros capturados e oferece diversas funcionalidades, como ajuste da grade de difração para um comprimento de onda específico, medição da intensidade da luz, seleção da fenda desejada e salvamento dos dados obtidos.

No semestre 2023/1, os alunos montaram um microscópio de objetiva invertida para implementar uma pinça óptica. Para isso, utilizaram um microscópio de campo claro convencional e um laser de diodo (635 nm, 30 mW), conforme ilustrado na Figura 2a [8]. O microscópio foi invertido de maneira improvisada, como mostrado na Figura 2a, devido à sedimentação das esferas de poliestireno no fundo da lamínula e a limitações do sistema óptico. Na Figura 2b, é apresentado um esquema da montagem da

pinça óptica, com a descrição dos principais componentes, incluindo um laser de diodo, uma objetiva, um espelho dicróico e uma câmera CMOS. A amostra foi preparada com uma solução de água contendo microesferas de poliestireno com diâmetro de 3 micrômetros e depositadas sobre uma lamínula de microscópio. A Figura 2c mostra uma imagem obtida pela câmera CMOS, ilustrando as microesferas. Ao ajustar a plataforma nos eixos x, y e z, os alunos foram capazes de aprisionar as microesferas na região acima do foco do laser, onde o somatório das forças é nulo, conforme ilustrado na Figura 2d. Os alunos puderam, neste projeto, abordar e aprender sobre o tema de pinças ópticas, que são amplamente utilizadas na pesquisa científica para realizar medidas das propriedades viscoelásticas de células e DNA [8].

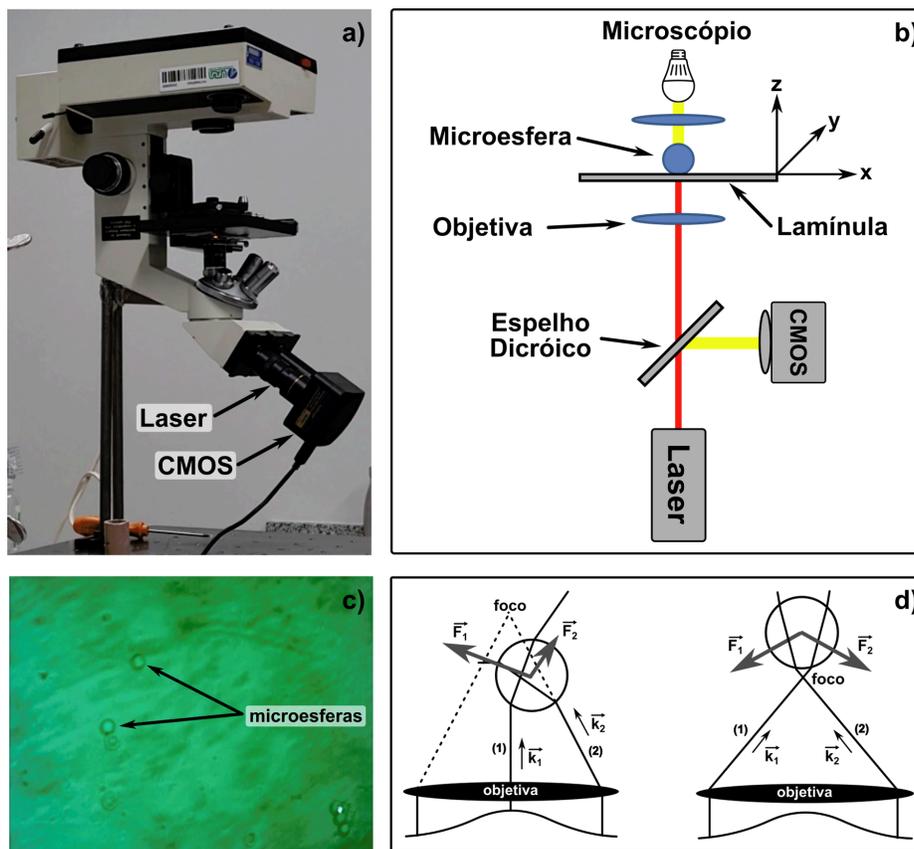


Figura 2. Montagem do microscópio de objetiva invertida para pinça óptica: a) Fotografia da montagem; b) Esquema da configuração da pinça óptica; c) Imagem capturada pela câmera CMOS das microesferas focalizadas; d) Esquema ilustrando as forças atuantes na microesfera na região do foco do laser.

No semestre 2023/2, os alunos revitalizaram um espectrofotômetro *Perkin Elmer Lambda 25 UV-Vis-NIR* que estava inoperante (Figuras 3a e 3b), automatizando-o e restaurando sua funcionalidade. Para isso, utilizaram pontes H, um módulo relé e um Arduino para o interfaceamento. O módulo relé controlou a lâmpada de filamento de tungstênio e a lâmpada de vapor de deutério. Motores de passo, também controlados por pontes H, movimentaram o espelho, a grade de difração e um filtro de densidade neutra. Os feixes da amostra e referência foram obtidos através de um *beamsplitter* 50:50 após a grade de difração (Figura 3a). O espectrofotômetro foi calibrado com lâmpadas de hélio, mercúrio e hidrogênio e os valores dos picos de emissão foram ajustados linearmente (Figura 3c). Após a calibração, os espectros das lâmpadas de va-

por de deutério e incandescente foram obtidos (Figura 3d), demonstrando a cobertura de um amplo espectro nas regiões ultravioleta, visível e infravermelho próximo. Uma interface gráfica similar à anteriormente desenvolvida facilitou a utilização pelo usuário.

Por fim, no semestre de 2024/1, os alunos se concentraram no desenvolvimento de um setup de Espalhamento de Luz Dinâmico (DLS, *dynamic light scattering*), utilizando uma câmera CMOS e um laser de diodo (Figura 4a) [9, 10]. A Figura 4b apresenta o esquema do setup montado, descrevendo os principais componentes ópticos. A calibração do sistema ocorreu com uma amostra de microesferas de poliestireno, com 3 micrômetros de diâmetro, suspensas em uma mistura de glicerina e água. Uma sequência de imagens da intensidade da luz

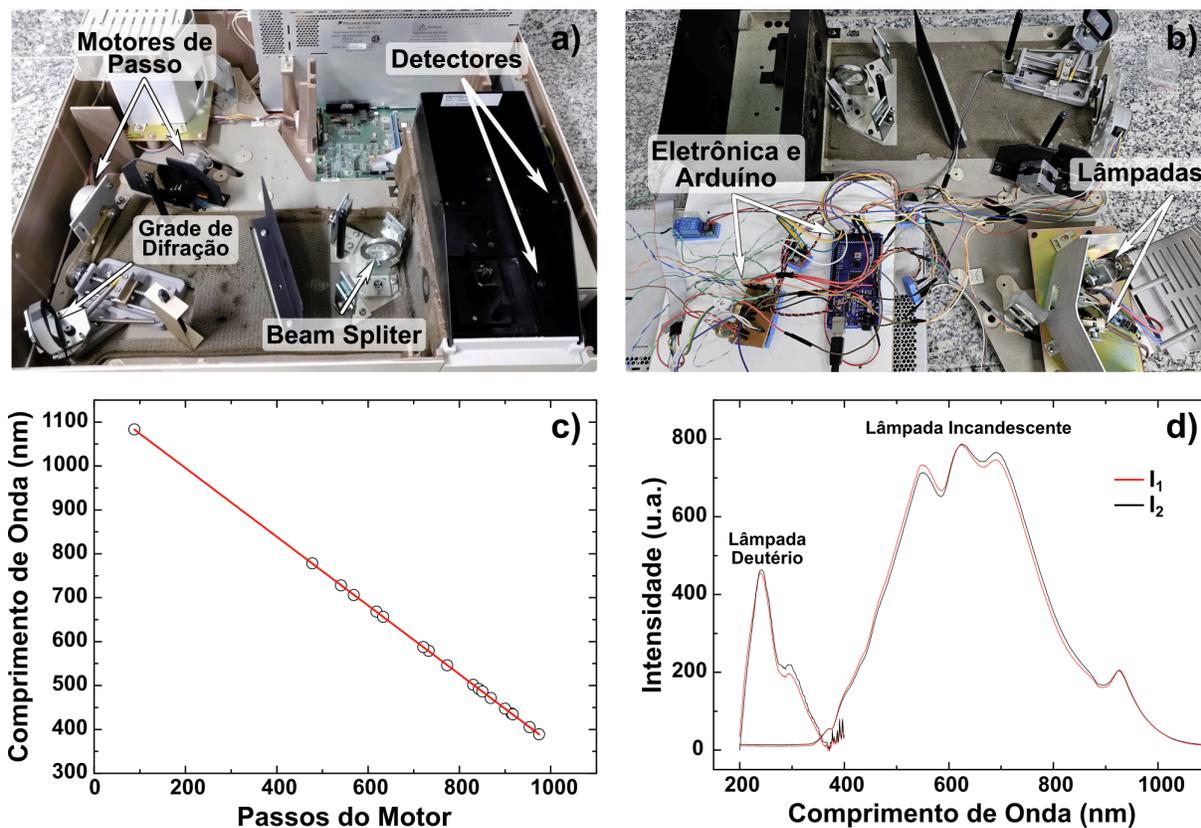


Figura 3. Montagem do espectrofotômetro: a) Fotografia da parte interna; b) Fotografia da parte interna com eletrônica e Arduino integrados; c) Ajuste linear para a calibração do comprimento de onda dos picos de emissão das lâmpadas; d) Espectro das lâmpadas de vapor de deutério e incandescente após a calibração.

espalhada, conhecida como *Speckle*, é registrada pela câmera CMOS (Figura 4c), e posteriormente processada para obter a curva da autocorrelação temporal da intensidade da luz espalhada (Figura 4d). Essa curva, ajustada com uma função exponencial simples, fornece o tempo médio de oscilação da intensidade, refletindo a velocidade das partículas em movimento Browniano na suspensão coloidal. Utilizando a expressão de Stokes-Einstein e parâmetros físicos da solução, como viscosidade, índice de refração e temperatura, é possível calcular o raio hidrodinâmico das partículas em suspensão e, assim, medir as dimensões das partículas suspensas, variando desde poucos nanômetros até micrômetros de diâmetro [9, 10].

Conclusão

Dessa forma, analisamos que durante a montagem desses experimentos os alunos se

depararam com uma série de desafios, tanto de natureza técnica, como ajustes na montagem mecânica das partes móveis e eletrônicas, quanto de natureza científica, como a realização da calibração do sistema, a obtenção de dados e a análise sistemática para testar a validade e a reprodutibilidade do aparato montado. Acreditamos, portanto, que a abordagem da instrumentação proporciona aos alunos um aprendizado sólido que integra conhecimentos teóricos com o mundo real, onde as limitações técnicas e os desafios da engenharia estão sempre presentes. Neste contexto, o curso de Engenharia Física da UFLA destaca-se como um curso altamente versátil, capacitando os alunos com habilidades diversas em múltiplas áreas de conhecimento dentro da física, incluindo eletrônica analógica e digital, microprocessadores, sistemas embarcados, óptica e fotônica, entre outros.

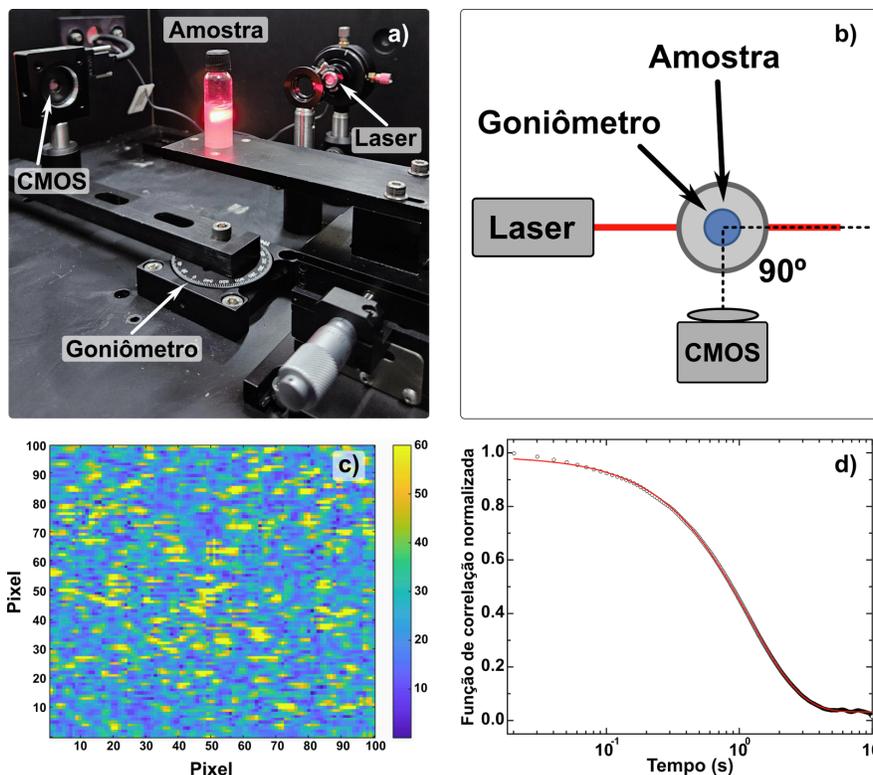


Figura 4. Montagem do espalhamento de luz dinâmico (DLS): a) Fotografia do setup óptico montado dentro de uma caixa para evitar interferência de luz externa; b) Esquema ilustrativo da montagem do setup óptico; c) Exemplo de uma imagem de espalhamento *Speckle* obtida pela câmera CMOS; d) Curva de autocorrelação temporal normalizada da intensidade da luz espalhada ajustada com uma função exponencial simples.

Contatos

Coordenador do Laboratório Multiusuário de Óptica e Fotônica (LaMOF):

jonas.osorio@ufla.br

Coordenador Adjunto do LaMOF:

flavio.marques@ufla.br

Coordenador do curso de Engenharia Física:

jefferson.tsuchida@ufla.br

Coordenador adjunto do curso de Engenharia Física:

julio.ugucioni@dfi.ufla.br

Chefe adjunto do Departamento de Física:

alexandre.cotta@ufla.br

Técnico em Mecatrônica:

diego.fuzatto@ufla.br

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG (APQ-01401-22, RED-00046-23), ao CNPq (305024/2023-0) e à UFLA pelo apoio financeiro.

Referências

[1] Instituto de Ciências Naturais (ICN), Universidade Federal de Lavras (UFLA). "Engenharia Física - Bacharelado." [Online]. Disponível em:

<https://icn.ufla.br/graduacao/engenharia-fisica-bacharelado>. Acesso em: 04/05/2024.

[2] B.E.A. Saleh *et al.*, "Fundamentals of photonics". 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2007. 1177 p. (Wiley series in pure and applied optics). ISBN 9780471358329.

[3] S.M. Rezende, "Materiais e dispositivos eletrônicos". 4. ed. São Paulo, SP: Liv. da Física, 2015. 440 p. ISBN 9788578613594.

[4] S.O. Kasap, "Optoelectronics and photonics: principles and practices". New York: Prentice Hall, c2001. 339 p. ISBN 0201610876.

[5] G.A Vanasse, (Ed.). "Spectrometric Techniques. Academic Press", 1977. ISBN 978-0-12-710401-0.

[6] C. Platt, Make: "Electronics: Learning Through Discovery". Maker Media, Inc., 2015. ISBN: 978-1680456875.

[7] M. Banzi *et al.*, "Getting Started with Arduino". Maker Media, Inc., 2014. ISBN: 978-1449363338.

[8] P.H. Jones, *et al.*, "Optical Tweezers: Principles and Applications". Cambridge University Press, 2015. ISBN: 978-1107051164.

[9] B.J Berne, *et al.*, "Dynamic light scattering: with applications to chemistry, biology, and physics". Dover ed. Mineola, N.Y: Dover Publications, 2000. 376 pp. ISBN: 978-0-486-41155-2.

[10] G.L Squires, "Introduction to the theory of thermal neutron scattering". Mineola, N.Y: Dover Publications, 1996. ISBN: 978-0-486-69447-4.

Laboratório Integrador do Sisfóton e seu Papel no Ecossistema de Fotônica no Brasil

João B. Rosolem, Tiago Sutili, Rivaél S. Penze, Rodney Nascimento, Maurício Casotti, Fabrício L. Figueiredo e Rafael C. Figueiredo
CPQD, Campinas, SP, Brasil

A Fotônica é um campo da ciência estratégico que tem aplicações em muitos setores da economia, entre os quais, destacam-se as telecomunicações, saúde, informática, indústria de transformação e de monitoração, energia e agronegócio. Visando explorar essa área de crescente interesse acadêmico e industrial, muitos grupos nacionais vêm desenvolvendo pesquisas e desenvolvimento em Fotônica desde a década de 1970 [1]. Contexto no qual, em 2021 o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) estabeleceu o Sisfóton/MCTI (Sistema Nacional de Laboratórios de Fotônica) [2], seguindo o Plano de Ação em Ciência, Tecnologia e Inovação para Tecnologias Convergentes e Habilitadoras, Volume III – Fotônica. Este plano de ação continha um conjunto de desafios, metas, ações e estratégias de implementação para o período compreendido entre os anos de 2016 a 2022.

Seguindo a estrutura proposta pelo MCTI, o Sisfóton-MCTI [3] é constituído por um conjunto de onze laboratórios, como apresentado na Figura 1, dentre os quais dez são de caráter multiusuário, de acesso aberto a usuários públicos e privados, e direcionados à pesquisa, ao desenvolvimento e à prestação de serviços tecnológicos, ao empreendedorismo e à inovação em Fotônica, tendo atuação destacada em diferentes áreas de mercado. Estes laboratórios são: Empresa

Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a Universidade de São Paulo (USP), o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), a Universidade Federal do Goiás (UFG), a Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS), a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), a Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) e a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). A eles se soma o CPQD (nomeado Laboratório Integrador dentro da iniciativa), o qual tem como função promover ações de inteligência estratégica do Sistema, em conjunto com o MCTI, bem como a integração digital dos laboratórios e articulação de agendas de interação; contribuir na integração dos laboratórios do Sisfóton, visando o senso de unicidade do Sistema; divulgar as atividades científica, tecnológica, de inovação e de empreendedorismo realizadas pelos demais laboratórios pertencentes ao Sisfóton.

Em particular, mesmo antes da iniciativa Sisfóton, o CPQD vem realizando este papel de integrador na área de Fotônica desde que foi fundado na década de 1970. Em 1982, articulado com várias universidades, centros de pesquisa e empresas, o CPQD desenvolveu e transferiu tecnologia do primeiro sistema de comunicações ópticas do país [4]. Já na década de 2000, o CPQD coordenou o projeto GIGA [5],

rede Experimental de Alta Velocidade, em conjunto com várias universidades nacionais, para evolução das tecnologias ópticas. Desde então, continuou a atuar em diversas iniciativas como uma ponte para a transferência tecnológica da academia para a indústria nacional.

Em tal contexto, este artigo descreve as atividades do CPQD como Laboratório Integrador do Sisfóton, visando, especialmente, apresentar as dificuldades encontradas e sucessos obtidos no papel de fomentar o desenvolvimento da Fotônica no país, buscando, dessa forma, contribuir para discussões acerca do tema e para iniciativas futuras com objetivos semelhantes.

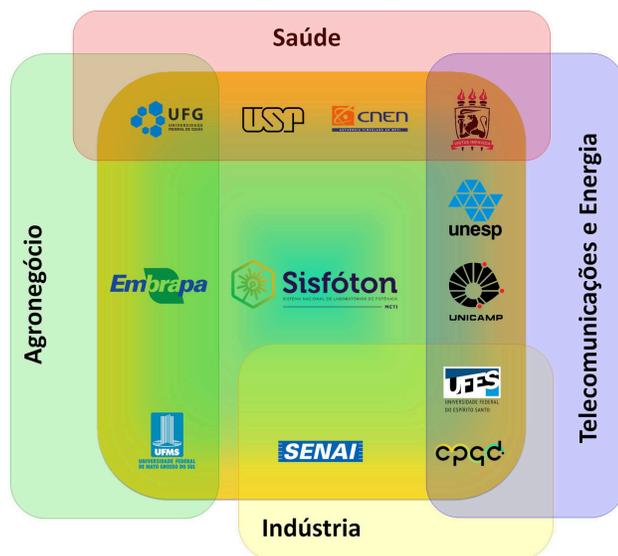


Figura 1 - Os onze laboratórios do Sisfóton e as áreas de mercado as quais estes laboratórios têm mais contribuído com inovações tecnológicas em Fotônica.

Iniciativas e Ações

Como evidenciado pela própria estrutura estabelecida pelo Sisfóton, um dos papéis centrais do Laboratório Integrador é fomentar a integração e colaboração entre os Laboratórios Gerais. Neste sentido, dentre as principais ações organizadas, destaca-se a realização de reuniões bimestrais e *workshops* (ou *webinários*) com

periodicidade semestral, nos quais os representantes dos laboratórios Sisfóton, somados a outros membros da comunidade de Fotônica, se encontram para discutir os recentes desenvolvimentos tecnológicos em cada entidade, a possibilidade de colaboração entre laboratórios e a potencial aplicação das soluções tecnológicas desenvolvidas no mercado. Exemplificando tal dinâmica, um dos *workshops* bem sucedidos foi o 4º *Webinário* Sisfóton, realizado no CPQD em março de 2023, como mostra a foto na Figura 2. Neste evento, os laboratórios, empresas e startups puderam discutir em detalhes a inovação e empreendedorismo na área de Fotônica no Brasil, sendo que os principais tópicos abordados foram organizados no documento “Mineração de informações do 4º *Webinário* do Sisfóton: Empreendedorismo em Fotônica” [3].

Esta iniciativa é complementada pela organização de eventos específicos para a troca de experiências e interação entre bolsistas e startups apoiadas pelo Sisfóton, permitindo que o conhecimento tecnológico e empreendedor, fomentado ao longo dos projetos executados, seja compartilhado entre todos os integrantes da iniciativa. Adicionalmente, todos os entes envolvidos na iniciativa Sisfóton também trabalham colaborativamente para a organização e realização de iniciativas que permitam a divulgação da Fotônica e de seus desdobramentos para atores da sociedade civil e do governo nacional, popularizando o impacto e a importância da área para o desenvolvimento tecnológico e econômico da nação. De modo geral, os resultados obtidos ao longo da execução do Sisfóton permitem validar a relevância dos objetivos originalmente estabelecidos pelo MCTI ao criar a iniciativa, evidenciando a importância de estabelecimento de um ecossistema com maior integração entre entidades de pesqui-

sa e desenvolvimento, industriais e o Estado brasileiro para fomento de uma área de vital importância para o futuro da sociedade. Neste contexto o Laboratório Integrador tem se posicionado também como um elemento de ligação entre os laboratórios do Sisfóton e o MCTI, aumentando desta forma a sinergia institucional dentro do Sisfóton.

Também com destacada relevância, uma importante missão atribuída ao Laboratório Integrador é a de conectar os laboratórios do Sisfóton com iniciativas de empreendedorismo e fomentar a criação e crescimento de startups. Em particular, aproveitando os incentivos de inovação promovidos pelo MCTI, o Laboratório Integrador tem fomentado seus próprios parceiros, bem como colaborado tecnologicamente com estes e com outros laboratórios no desenvolvimento de novos produtos de Fotônica a serem comercialmente explorados.

Por fim, destaca-se como iniciativas complementares do Laboratório Integrador a realização de visitas técnicas para conhecer os demais laboratórios presencialmente, a promoção de interações entre os laboratórios e o mercado, o incentivo à participação em editais de fomento e a divulgação das atividades e resultados dos laboratórios para a comunidade.

Desafios e Passos Futuros

Todavia, apesar dos esforços dispensados por todos os atores envolvidos na iniciativa, ainda existem desafios significativos a serem superados para que o ecossistema integrado idealizado seja de fato estabelecido. Fundamentalmente, constata-se, como uma dificuldade central para aumentar a convergência dos diversos atores envolvidos, a falta de um conhecimento detalhado dos diferentes representantes do ecossistema nacional de Fotônica, além da própria neces-

sidade do reconhecimento efetivo de sinergias e desafios comuns entre os envolvidos, problema este que acaba sendo trespassado para todos os desdobramentos da iniciativa. Adicionalmente, o alinhamento de interesses entre as entidades nem sempre é uma tarefa de fácil resolução, usualmente demandando o comprometimento de interesses tecnológicos e econômicos para que um compromisso de interesse comum seja alcançado.

Dentro do contexto exposto, a definição de políticas orientadas por missão [6] deve incluir o estabelecimento de desafios e prazos bem definidos, permitindo que a colaboração entre os entes envolvidos ocorra de forma transparente e eficiente. Adicionalmente, a busca por recursos financeiros para a execução de projetos colaborativos na área deve buscar equalizar os interesses de todos os atores, permitindo que o somatório de esforços seja construtivo para todos os envolvidos. Em tal cenário, é também crucial que os centros acadêmicos e de pesquisa e desenvolvimento busquem entender e se aproximar das necessidades do mercado e da sociedade, aumentando a percepção de valor originado como resultado do fomento financeiro obtido.



Figura 2 - 4º Workshop do Sisfóton realizado no CPQD em março de 2023.

Conclusão

A criação de um ecossistema colaborativo e construtivo para o desenvolvimento tecnológico e empreendedor em Fotônica é um desafio de grandes proporções dados os desafios técnicos e estruturais encontrados para tal fim. De modo geral, a avaliação do ciclo de execução da iniciativa Sisfóton resultou em avanços sensíveis em tal direção, fomentando a aproximação e diálogo entre entes do setor nos seus mais diversos cenários de aplicação. Entretanto, como todo desafio de grandes proporções ainda restam dificuldades a serem superadas em um trabalho contínuo de aperfeiçoamento para que os objetivos originalmente traçados pela iniciativa sejam plenamente alcançados. Fundamentalmente, o estabelecimento de objetivos comuns bem estabelecidos com prazos factíveis para a sua realização é crucial para a busca de fontes de fomento comuns e para a geração de resultados adequados para transferência tecnológica para a indústria nacional e com valor perceptível para a sociedade.

Referências

- [1] J. Franco, "A fibra que mudou as comunicações no país", disponível em: <https://www.jornal.unicamp.br/noticias/2024/01/15/a-fibra-que-mudou-as-comunicacoes-no-pais/#gsc.tab=0>
- [2] MCTI, "Fotônica", disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/tecnologia/tecnologias_convergentes/fotonica.html
- [3] Sistema Nacional de Laboratórios de Fotônica, (Sisfóton), disponível em: <https://www.cpqd.com.br/inovacao/sisfoton/>
- [4] F.M. Smolka, "Histórias da fibra óptica do Brasil (1978-1986): como lembrada e contada", Editora Telha, ISBN 9786554121866 (2023).
- [5] R.R. Scarabucci et al., "Project GIGA-high-speed experimental IP/WDM network", First International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the DEvelopment of NeTworks and COMmunities (2005), 242, doi: 10.1109/TRIDNT.2005.29.
- [6] P. Larrue, (2021), "The design and implementation of mission-oriented innovation policies: A new systemic policy approach to address societal challenges", OECD Science, Technology and Industry Policy Papers, No. 100, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/3f6c76a4-en>.

Redefinição do Segundo e Disseminação de Relógios Ópticos

Mauro Vieira de Lima

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro)

A definição da unidade de tempo do SI (Sistema Internacional de Unidades) foi baseada em fenômenos astronômicos até 1967. Nesta data, a definição que, tradicionalmente, era realizada pelo campo da astronomia mudou para o campo da física quântica. A definição atual é baseada em medições de frequência com a premissa do Modelo Padrão da física de que as frequências de ressonância atômica são universais e constantes.

A definição da unidade segundo do SI é a duração de 9 192 631 770 períodos de radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133 [1]. Tal definição tornou o césio o elemento universal para utilização como padrão de frequência primária. Atualmente, tais padrões primários realizam a unidade de tempo com incerteza relativa de 10^{-16} através da tecnologia do chafariz de átomos frios de césio.

O desenvolvimento da tecnologia de padrões de frequência óptica (OFS – *optical frequency standards*), nas últimas duas décadas, permitiu ultrapassar em duas ordens de grandeza a exatidão dos padrões primários como demonstra a evolução na Figura 1. Considerando essa evolução, o CCTF (Comitê Consultivo para Tempo e Frequência) emitiu em 2016 a primeira versão de um *roadmap* para redefinição da unidade segundo do SI.

Impacto da redefinição

A revisão do sistema de unidades do SI em 2018 pelo CGPM (Conferência Geral de Pesos e Medidas) efetuou a redefinição de quatro

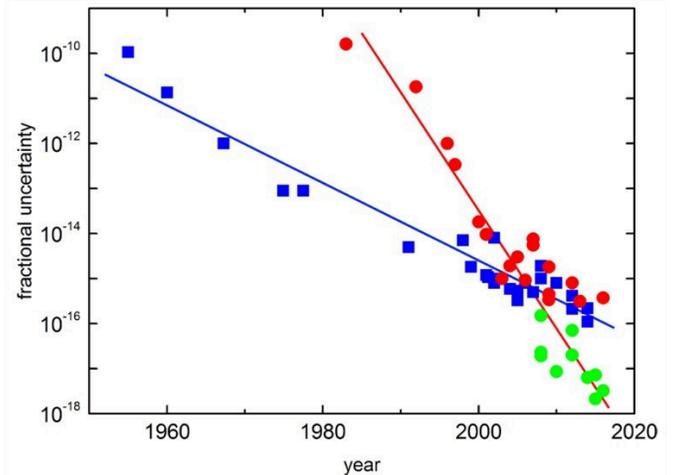


Figura 1. Evolução da incerteza fracionária. Quadrados azuis representam padrões primários de césio. Círculos vermelhos representam padrões de frequência óptica comparados diretamente com relógios atômicos de césio. Círculos verdes representam incertezas estimadas publicadas de relógios ópticos. Linhas azul e vermelha mostram tendência dos padrões primários e ópticos, respectivamente. Adaptado de [2].

unidades do SI, fixando os valores de suas constantes fundamentais: quilograma (constante de Planck h), Ampere (carga elementar e), Kelvin (constante de Boltzmann k_B) e mol (constante de Avogadro N_A). A unidade de tempo do SI foi colocada em uma posição central após a revisão de 2018, pois a fixação das constantes fundamentais na definição das unidades trouxe uma dependência, de todas as unidades do SI, para a definição da unidade segundo, com exceção do mol. Essa dependência das outras unidades do SI ao segundo impacta diversas áreas e entidades, entre elas os institutos nacionais de metrologia (NMI – *national metrology institutes*).

Os NMI desenvolvem as melhores realizações das unidades SI e constroem padrões primários da mais alta exatidão. Considerando a dependência das unidades do SI à unidade segundo, os NMI necessitam de sinais de tempo e frequência com alta exatidão para fornecer serviços de disseminação do SI dentro dos seus países. Os atuais padrões de frequência primária foram superados em estabilidade e incerteza pelos relógios ópticos. Logo, os NMI devem impulsionar a transição para a nova definição da unidade segundo do SI.

A capacidade de sincronização, com tempo inferior a μs é uma característica essencial para grande parte da infraestrutura crítica de um país, tais como as áreas de telecomunicações, energia, finanças, transportes, espacial, defesa, entre outras. Apesar de desconhecida pela maioria da população, padrões e sinais de tempo e frequência são a infraestrutura de base que suporta essa infraestrutura crítica.

A redefinição do segundo, inicialmente, será utilizada em aplicações científicas, mas surgirão aplicações industriais à medida que a tecnologia se tornar disponível. Comunicações quânticas, por exemplo, necessitam de estabilidade e incertezas na ordem de femtossegundos, algo dificilmente alcançável com as tecnologias atuais.

Entre as aplicações científicas existentes, os experimentos de física fundamental são os que mais se beneficiarão com a melhoria da infraestrutura de tempo e frequência obtida pela redefinição do segundo. Assim, relógios ópticos podem dar suporte aos experimentos para investigação da física que se estende além do modelo padrão, bem como variação temporal das constantes fundamentais, busca por matéria escura, detecção de ondas gravitacionais entre outras [3]. Os OFS podem dar suporte a espectroscopia molecular, *arrays* de telescópios de alta resolução, novas gerações de VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), monitoração de geopotencial com resolução de centímetros, entre outros. A Tabela 1 mostra os níveis de exatidão e as respectivas oportunidades de aplicação na área informados pelas respectivas comunidades científicas.

Estado da arte dos padrões de frequência óptica

A redefinição do segundo do SI está programada para ocorrer conforme o atendimento de critérios e condições que visam medir o nível de maturidade dos diversos aspectos da tecnologia dos relógios ópticos e da sua disseminação. O critério de maior relevância já foi alcançado pelos

Tabela 1. Nível de exatidão e oportunidade de aplicação.

Incerteza	Oportunidade de aplicação
1×10^{-15}	Espectroscopia / matéria escura / comunicações seguras
1×10^{-16}	Cosmologia
1×10^{-17}	Matéria escura / Interferometria
1×10^{-18}	Localização por satélite / Geodesia em Tempo Real / Nova geração de Relógios
1×10^{-19}	Geodinâmica
1×10^{-20}	Geodesia Relativística / Teorias alternativas da gravitação

OFS que é oferecer uma melhoria de 10 a 100 vezes a incerteza da melhor realização dos padrões de frequência primária, alcançando de 10^{-17} a 10^{-18} de incerteza da frequência relativa. Além disso o novo padrão deve oferecer potencial melhoria a longo prazo. Um segundo critério mandatório é a disponibilidade de técnicas sustentáveis para comparação entre os OFS [4].

As pesquisas atuais direcionadas à investigação de transições ópticas para servir como padrões de frequência, se diferenciam, basicamente, por buscar padrões de frequência definidos pelo estado de carga do átomo ou pelo método usado para armadilhamento. Este último tem como exemplo os relógios ópticos *trapped ions* e *lattice* com átomos neutros. Atualmente, dez transições ópticas e uma transição de micro-

ondas (^{87}Rb) são recomendadas como representação secundária do segundo (SRS - *secondary representations of the SI second*), entre elas estão algumas que já contribuem para a escala de tempo atômica internacional (TAI - *Temps Atomique International*), conforme listadas na Tabela 2 [1].

A maioria das transições ópticas propostas pode atingir um nível de incerteza abaixo de 10^{-18} . O recorde atual de incerteza foi obtido pelo relógio de lógica quântica $^{27}\text{Al}^+$ com uma incerteza sistemática da frequência fracionária de 9.4×10^{-19} . Relógios ópticos *lattice* de Yb e Sr estão próximos desse valor com 1.4×10^{-18} e 2×10^{-18} , respectivamente. O desenvolvimento de pentes de frequência óptica (OFC *optical frequency combs*) permitiram comparar frequências ópticas diretamente com frequências de micro-ondas

Tabela 2. Transições ópticas recomendadas para SRS pelo CCTF.

Transição Óptica	Comprimento de onda [nm]	Frequência [Hz]	Número de NMI que contribuem para TAI
^{199}Hg	265	1128 575 290 808 154.32	
$^{27}\text{Al}^+$	267	1121 015 393 207 859.16	
$^{199}\text{Hg}^+$	282	1064 721 609 899 146.96	
$^{171}\text{Yb}^+(\text{E}2)$	436	688 358 979 309 308.24	
$^{171}\text{Yb}^+(\text{E}3)$	467	642 121 496 772 645.12	
^{171}Yb	578	518 295 836 590 863.63	4
$^{88}\text{Sr}^+$	674	444 779 044 095 486.3	
^{88}Sr	698	429 228 066 418 007.01	
^{87}Sr	698	429 228 004 229 872.99	3
$^{40}\text{Ca}^+$	729	411 042 129 776 400.4	
^{87}Rb		6834 682 610.904 3126	1

com medidas de alta exatidão.

Medições simultâneas da mesma relação de frequência óptica com dois OFC independentes mostraram concordância no nível de 10^{-21} , demonstrando a capacidade de suportar medições com razão de frequência óptica no limite das incertezas dos OFS.

A comparação de diferentes relógios ópticos permite validar suas incertezas. Comparações realizadas dentro do mesmo instituto alcançaram uma incerteza melhor que 5×10^{-18} . Enquanto, as realizadas entre diferentes institutos estão no nível de 5×10^{-17} . Observa-se que comparações entre relógios em diferentes locais são desafiadoras porque envolvem instabilidades devido à transferência de tempo e frequência de longa distância cujos níveis de desempenho são mais baixos do que as que são realizadas em laboratório.

Opções para redefinição do segundo

Um conjunto de sete constantes com valores numéricos fixos define as unidades do SI, sendo que entre elas está a constante que define a unidade de tempo, $\Delta\nu_{Cs}$, que decorre da propriedade do átomo de césio.

Uma das opções para a redefinição do segundo, já utilizada em algumas unidades do SI, seria a definição de uma constante fundamental da física. As constantes mais estudadas para esse fim são m_e (massa do elétron); ν_e (frequência Compton) e R_∞ (frequência de Rydberg). Entretanto, as experiências em CODATA 2018 [5] obtiveram incertezas de várias ordens de grandeza superior à atual incerteza obtida pelo padrão primário de 10^{-16} , excluindo assim essa opção devido ao atual estado da arte.

Duas opções são aplicáveis para a redefinição do segundo do SI. A primeira consiste em escolher uma única transição e fixar o valor numérico da frequência desta

transição, conforme foi realizado para o Cs. A segunda consiste em criar uma constante baseada em um conjunto de transições, sendo seu valor definido como uma média geométrica ponderada das frequências dessas transições, assim:

$$\prod_j v_j^{w_j} = N(\text{Hz})$$

v_j é a frequência da transição; w_j o peso atribuído à transição j , sendo seu somatório igual a 1, e N a constante usada para a definição do segundo.

A primeira opção não descartaria outras transições de participarem como SRS na geração do segundo através da escala atômica TAI, como já ocorre atualmente. A discussão para essa opção se concentra nos critérios para atualização periódica da transição adotada.

Por outro lado, a segunda opção não descartaria a utilização de um único padrão de frequência óptica baseado em qualquer uma das transições escolhidas. Note que a definição da unidade de tempo usando várias transições oferece uma abordagem dinâmica para lidar com o atual cenário onde várias transições atômicas diferentes fornecem OFS com incertezas próximas de 10^{-18} .

Estado da arte da transferência de tempo e frequência para comparações dos OFS

Um dos desafios para adoção de OFS na definição da unidade de tempo do SI está nas comparações remotas, uma vez que essas comparações são de extrema importância para validar as incertezas dos padrões de frequência e para disseminar a realização local do padrão de tempo com toda sua exatidão.

Os sistemas mais difundidos de transferência de sinais de tempo e frequência são os que utilizam enlaces de micro-ondas por satélite, tais como GNSS e TWSTFT (*Two-way Satellite Time and Frequency Transfer*). Entretanto sua estabilidade e incerteza ainda se encontram abaixo dos atuais OFS. As técnicas ópticas que utilizam links de fibra óptica oferecem estabilidade e incerteza melhoradas, entretanto a longa distância para utilização entre NMI de países diferentes reduz sua capacidade de expansão para uma cobertura geográfica global. Os OFS transportáveis ou Relógios Ópticos Transportáveis (TOC - *Transportable Optical Clocks*) podem obter comparações com um nível de precisão de 10^{-18} . Neste caso a utilização em uma cobertura geográfica global demanda alto custo operacional e tempo de medição longo.

O serviço *one-way* oferecido pelo GNSS é utilizado há muitas décadas para a realização do UTC (*Coordinated Universal Time*). O IGS (*International GNSS Service*) possibilitou o aumento da exatidão através da técnica PPP (*Precise Point Positioning*). Atualmente, a técnica IPPP (*integer ambiguity PPP*) é a que oferece a melhor estabilidade de longo prazo, fornecendo transferência de tempo com um desvio de Allan modificado de $7.10^{-16}/\tau$, onde τ é o tempo médio em dias das medições de fase. O desenvolvimento de técnicas usando todos os GNSS, ao invés de apenas o GPS (*Global Positioning System*), tem a expectativa de melhorar essa exatidão [6].

O serviço *two-way* fornecido pelo TWSTFT emprega, originalmente, a técnica *Code Phase* que realiza a troca de sinais de tempo modulados por um código pseudoaleatório entre duas estações conectadas através de um enlace de satélite geostacionário. O desenvolvimento da técnica *Two-Way Carrier Phase* (TWCP) que utiliza medições

de fase da portadora permitiu obter estabilidade comparável a técnica IPPP como mostra a Figura 2. O desenvolvimento de um receptor definido por software (SDR - *software defined radio*) reduziu instabilidades e permitiu a implementação de um modem TWSTFT com tecnologia SDR. A expectativa é que a utilização dessa tecnologia permita desenvolver, por *software*, novas técnicas para melhorar a exatidão e estabilidade do enlace TWSTFT. Para obtenção de estabilidade com valores abaixo de 10^{-17} é essencial melhorar a modelagem de todas as fontes de erro não recíprocas, como efeitos da propagação do sinal, turbulência atmosférica e efeitos relativísticos.

O VLBI utiliza a recepção de sinais de rádio de fontes extragalácticas, sendo a diferença de tempo entre esses sinais de rádio medidos em duas antenas equipadas com relógios atômicos. Usando VLBI, a frequência de um padrão óptico Yb e Sr foi comparada com uma incerteza estatística do enlace VLBI de 9×10^{-17} ao longo de 300 horas de medições.

A comunicação óptica por *two-way* para transferência de tempo através de satélite foi demonstrada pela técnica T2L2 (*Time Transfer by Laser Link*) utilizando o satélite Jason-2. A técnica é baseada nas tecnologias

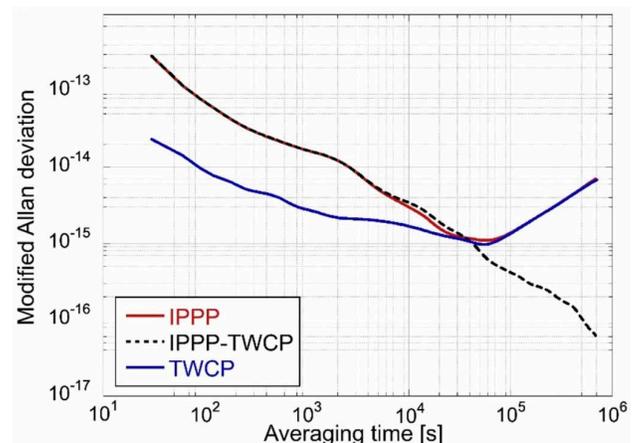


Figura 2. Desvio de Allan modificado entre UTC(NICT) e UTC(KRIS) nas técnicas IPPP e TWCP. Adaptado de [7].

de *laser ranging* que utilizam pulsos curtos de laser emitidos por estações terrestres para um satélite que possui retrorrefletores. Enlaces T2L2 foram comparados com enlaces IPPP obtendo desvio padrão da diferença de tempo abaixo de 100 ps [8].

A transferência de tempo e frequência por enlaces FSO (*free space optical*) no espaço livre terrestre foram realizadas em distâncias de dezenas de quilômetros com incertezas próximas a 10^{-16} em apenas alguns minutos.

Uma comparação de 113 km com desvio de Allan modificado de 10^{-19} em 10^4 s também foi realizada [9]. Tais experimentos evidenciam a compatibilidade dos métodos para uso com satélites em órbitas LEO (*Low Earth Orbit*).

As fibras ópticas possuem vantagens em comparação com técnicas de espaço livre, tais como isolamento de interferências externas; largura de banda e baixas perdas de propagação. O melhor desempenho para comparação de frequência é obtido através de enlaces bidirecionais que possuem desvio de Allan típico inferior a 10^{-18} para um tempo de medição superior a 100 s utilizando enlaces de 100 a 1000 km de comprimento. A transferência de tempo através de fibra exige uma modulação (amplitude, fase ou frequência) vinculada a uma escala de tempo, sendo a incerteza de tempo inferior a 1 ns (dezenas de ps) em particular com o protocolo *White Rabbit* (WR) PTP (*Precise Time Protocol*).

O relógio óptico transportável, TOC, é a opção de comparação que atende de forma imediata os critérios para a redefinição do segundo SI, tanto na exatidão exigida quanto na cobertura geográfica que pode alcançar. É importante notar que as técnicas de micro-ondas, utilizando satélites, precisam melhorar significativamente o nível de incerteza; as técnicas de fibra óptica atendem à incerteza exigida, mas uma cobertura global exige um grande esforço e investimentos e comparações ópticas através de satélite ainda não foram demonstradas de forma metrológica e operacional.

Os TOC já demonstraram desempenho que atende aos requisitos da redefinição. Vários TOC apresentam exatidão variando entre 10^{-17} e 10^{-18} . Por exemplo, um TOC baseado em íons como Ca^+ demonstrou incerteza sistemática de $1,3 \times 10^{-17}$, enquanto um padrão Al^+ chegou ao nível de 10^{-18} . Além de seu papel na redefinição, os TOC são essenciais para medições geodésicas relativísticas como de geopotencial entre outras.

De acordo com a teoria da relatividade geral de Einstein, um relógio em uma altitude mais baixa funciona mais devagar do que em uma altitude mais alta na superfície da Terra devido à diferença do campo gravitacional, é o chamado efeito gravitacional *red shift*. Medindo com exatidão a diferença de frequência de dois relógios ópticos em locais separados através de uma fibra óptica, a diferença de altitude pode ser obtida. Este efeito corresponde a uma mudança de frequência fracionária de cerca de $1,1 \times 10^{-18}$ por centímetro de mudança de altitude na superfície da Terra [10]. Tal resolução define um papel central dos relógios ópticos para essas medições.

A transferência de tempo e frequência com as técnicas atuais permite comparar escalas de tempo para uma cobertura global, sendo possível, também, comparar os intervalos das escalas. Para isso é necessário conhecer o geopotencial na localização dos relógios, uma vez que relógios atômicos geram seu próprio tempo que é afetado pela mudança da frequência relativística. A escala TAI é definida como uma realização do Tempo Terrestre com um geopotencial de referência W_0 . Assim, o geopotencial local precisa ser obtido em relação a W_0 para uma calibração do intervalo da escala TAI. Os modelos de geopotencial utilizados com dados de satélite fornecem informação com resolução espacial de 200 km ou pior [1].

Critérios para redefinição do segundo

O UTC é uma escala de tempo pós-processada determinada pelo BIPM gerada utilizando a escala de tempo TAI. Os NMI geram e fornecem sinais de tempo e frequência equivalentes ao UTC, tais sinais são realizações físicas chamadas de UTC(k), sendo 'k' o identificador do laboratório. Um dado UTC(k) é, geralmente, utilizado para hora civil nacional com a adição do respectivo fuso horário.

Para a redefinição do segundo, o UTC(k) deverá ser gerado ou pelo menos orientado, *steering*, por um relógio óptico. As escalas de tempo UTC(k) devem ser contínuas, entretanto os relógios ópticos ainda operam com *dead time*. A operação de vários relógios ópticos para redundância também ainda não é realizada, devido a difícil manutenção e falta de estudos sobre alternância entre relógios ópticos. Apesar disso, é viável usar a operação intermitente de um relógio óptico para geração em tempo real de uma escala de tempo através do *steering*. Neste caso, um oscilador de micro-ondas, por exemplo um

maser de hidrogênio, é utilizado como fonte, mas o intervalo da escala é ajustado em relação a um relógio óptico. Essa implementação já é realizada em alguns NMI para geração do UTC(k). No futuro, uma escala de tempo totalmente óptica deve ser desenvolvida, possivelmente, um laser CW (*Continuous Wave*), estabilizado em uma cavidade óptica estável, poderia ser o oscilador fonte.

A redefinição do segundo do SI é planejada por cenários que dependem das OFS e sua evolução, seu desempenho, sua condição de fazer contribuições sustentáveis para a realização da escala de tempo TAI, seu potencial para disponibilidade comercial. O *roadmap* deve considerar, também, as técnicas de transferência de tempo e frequência para comparação dos relógios, para contribuição nas escalas de tempo internacionais e para disseminação de sinais de referência com um nível de incerteza adequado.

Três eixos foram definidos para os critérios: I-OFS, II-transferência de tempo e frequência e III-aceitação da nova definição. Para cada eixo foram definidos critérios

Tabela 3. Critérios obrigatórios para redefinição do segundo do SI

Item	Critério	Observação
I.1	Incerteza das OFS	$u \leq 2 \cdot 10^{-18}$
I.2	Validação da incerteza das OFS - razão de frequência	$\Delta\nu/\nu \leq 5 \cdot 10^{-18}$
I.3	Continuidade com a definição baseada no céσιο	manutenção da comparação das OFS com padrões de Céσιο
I.4	Contribuições regulares dos OFS para a TAI	OFS como SRS (representações secundárias do segundo)
II.1	Disponibilidade de técnicas sustentáveis para comparações de padrões de frequência óptica	TOC ou enlaces de Tempo e Freq. com incerteza $\leq 5 \cdot 10^{-18}$
II.2	Conhecimento do geopotencial local com nível de incerteza adequado	Consistência e obrigatoriedade para contribuição para a TAI
III.1	Definição que permita realizações futuras com maior exatidão	A longo prazo a definição deve ser capaz de reduzir a incerteza
III.2	Acesso à realização da nova definição	Acesso para NMI e usuários de alta exatidão

obrigatórios e condições auxiliares. O objetivo é obter um progresso igual ou maior que 90% em todos os critérios obrigatórios antes da redefinição. Os critérios obrigatórios são listados na Tabela 3.

Perspectivas para redefinição

A reunião de 2026 da CGPM (*General Conference on Weights and Measures*) não possui expectativa para a redefinição do segundo do SI, uma vez que não há consenso sobre a opção a ser escolhida e o nível de progresso de 90% não foi alcançado para todos os critérios obrigatórios. Existe a expectativa que um *roadmap* seja traçado na CGPM de 2026 e que a redefinição seja aprovada na CGPM de 2030, dependendo do progresso dos critérios obrigatórios. Assim, espera-se que a manutenção da operação dos padrões de frequência primária de Cs seja mantida até o final da década de 2030.

Existe ainda um trabalho considerável para cumprir todos os critérios obrigatórios e alcançar os limiares mínimos para todas as OFS e para sua transferência de tempo e frequência. A convergência de esforços para uma nova definição do segundo do SI deverá alavancar um salto científico e tecnológico que servirá não só as necessidades da metrologia mas de diversas áreas, além de promover novas aplicações científicas e tecnológicas.

Referências

- [1] N. Dimarcq *et al.*, “Roadmap towards the redefinition of the second”, *Metrologia* **61**, 012001 (2024).
- [2] F. Riehle *et al.*, “The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures”, *Metrologia* **55**, 188 (2018)
- [3] M.S. Safronova, “Atomic clocks: the search for variation of fundamental constants with clocks” *Ann. Phys.* **531** 1800364 (2019).
- [4] Resolution 1 of the 26th CGPM 2018 “On the revision of the International System of Units (SI)”, (www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/26-2018/resolution-1).
- [5] E. Tiesinga *et al.*, “CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2018” *Rev. Mod. Phys.* **93**, 025010 (2021).
- [6] G. Petit, “Sub-10–16 accuracy GNSS frequency transfer with IPPP”, *GPS Solut.* **25**, 22 (2021).
- [7] M. Fujieda *et al.*, “Advanced satellite-based frequency transfer at the 10–16 level”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **65**, 973 (2018)
- [8] E. Samain *et al.*, “Time transfer by laser link: a complete analysis of the uncertainty budget”, *Metrologia* **52**, 423 (2015).
- [9] Q. Shen *et al.*, “Free-space dissemination of time and frequency with 10–19 instability over 113 km”, *Nature* **610**, 661 (2022).
- [10] Dao-Xin Liu *et al.*, “Laboratory demonstration of geopotential measurement using transportable optical clocks”, *Chinese Phys. B* **32**, 010601 (2023).



REVISTA DA

sbfoton

Vol. 4 - Jun/2024

sbfoton.org.br

