

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **INSTRUMENTAÇÃO ÓTICA MICROPROCESSADA DE ALTA VELOCIDADE PARA A DETECÇÃO E ANÁLISE DA CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA EM CONDUTOS FORÇADOS**

*Luís Gustavo Macêdo West<sup>1</sup>; André Jackson Ramos Simões<sup>2</sup>; Leandro do Rozário Teixeira<sup>3</sup>;  
Vitor Leão Filardi<sup>4</sup>; Vitor Pinheiro Ferreira<sup>5</sup>; Lucas Gomes Pereira<sup>6</sup>; Juliane Grasiela de  
Carvalho Gomes<sup>7</sup>; Igor Silva Moreira dos Anjos<sup>8</sup>; Leonardo Rafael Teixeira Cotrim Gomes<sup>9</sup>;  
Marcus Vinicius Santos da Silva<sup>10</sup>; Luiz Carlos Simões Soares Junior<sup>11</sup>; Geydison Gonzaga  
Demetino<sup>12</sup>; André Luiz Andrade Simões<sup>13\*</sup>; Luciano Matos Queiroz<sup>14</sup>; Iuri Muniz Pepe<sup>15</sup>*

**Abstract:** This study presents the development and validation of a high-speed optical data acquisition system based on photodetection and microprocessing for characterizing hydrodynamic cavitation downstream of a triangular nozzle produced via additive manufacturing. Evaluated using reference signals and spectral analysis, the system achieved an effective average rate of ~847,000 samples per second with stable temporal performance under USB-serial constraints. Statistical convergence analysis showed that 239,000 samples per flow rate suffice for reliable estimates of mean irradiance and standard deviation. Normalized irradiance distributions under nine flow conditions revealed an optically detectable transition in the biphasic regime, identified by inversion of the skewness coefficient. Fitted empirical models described the evolution of mean irradiance and standard deviation as functions of normalized flow rate, yielding coefficients of determination above 0.97 and strong agreement with experimental data. These results support the system's applicability for indirect analysis of biphasic flows.

**Resumo:** Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um sistema de aquisição ótica de dados em alta velocidade, baseado em fotodetecção e microprocessamento, voltado à caracterização da cavitação hidrodinâmica a jusante de um bocal triangular fabricado por manufatura aditiva. O sistema foi testado com sinais de referência e análise espectral, alcançando taxa média efetiva de aproximadamente 847 mil amostras por segundo, com estabilidade temporal sob restrições de transmissão USB-serial. A análise de convergência estatística indicou que 239 mil amostras são suficientes para estimativas confiáveis da irradiância média e do desvio padrão para os escoamentos estudados. Foram avaliadas distribuições estatísticas da irradiância normalizada em nove condições de vazão, sendo identificada a transição ótica modulada pelas bolhas do regime bifásico por meio da inversão do sinal do coeficiente de assimetria. Modelos ajustados descreveram a evolução da irradiância média e da variância em função da vazão adimensional, com coeficientes de determinação superiores a 0,97 e aderência aos dados experimentais, validando a aplicabilidade da instrumentação para análise indireta de escoamentos bifásicos.

**Palavras-Chave** – Cavitação; fotodetecção; microcontrolador; turbulência.

1,2,3,6,7,8,9,12,13,14,15) Universidade Federal da Bahia. \*Autor para contato: andre.simoes@ufba.br

4) Instituto Federal da Bahia

9,11,12) Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

## INTRODUÇÃO

Cavitação é o fenômeno físico associado à formação e ao colapso de bolhas preenchidas com gases ou vapor em um líquido, provocado pela redução da pressão local até níveis iguais ou inferiores à pressão de vapor do fluido ou à pressão de liberação de gases dissolvidos. Uma vez formadas, essas bolhas são transportadas para regiões de maior pressão, onde não conseguem subsistir, colapsando violentamente. O colapso pode ocorrer por implosão, gerando ondas de choque, ou por deformações topológicas que levam à formação de estruturas parecidas com toros que circundam um jato de alta velocidade, como pode ser visto nas fotografias de Tomita e Shima (1990).

A identificação empírica da cavitação em sistemas hidráulicos é, tradicionalmente, vinculada à geração de ruídos em altas frequências, perceptíveis por operadores de equipamentos como bombas e turbo máquinas. Contudo, essa forma de detecção sensorial não é aplicável a estruturas de grande escala, a exemplo dos vertedores utilizados em barragens, ou a máquinas e tubulações localizadas em posições de difícil acesso ou em situações com grande interferência acústica, onde os indícios da cavitação apenas se manifestam por meio de inspeções visuais que revelam os danos já ocasionados. Nesses contextos, o reconhecimento do fenômeno ocorre de forma tardia e reativa, geralmente motivado pelas consequências negativas associadas, como a redução da eficiência operacional ou, em situações extremas, a falha estrutural dos componentes afetados.

Para além da perspectiva tradicional centrada nos danos causados em sistemas hidráulicos, a cavitação tem sido estudada sob um enfoque funcional, no qual é utilizada como mecanismo de transformação físico-química. Nessa linha, o colapso das bolhas cavitantes é empregado em diversas aplicações, como a degradação de poluentes orgânicos recalcitrantes (Yeneneh *et al.*, 2024), a inativação de agentes microbiológicos (Mustapha *et al.*, 2024), a produção de biocombustíveis (Bharadwaj *et al.*, 2024), além da limpeza de superfícies internas de trocadores de calor (Banakar *et al.*, 2023) e de tubulações em ambientes industriais (Wood *et al.*, 2024). Em todos esses contextos, a capacidade de detectar a ocorrência do fenômeno e de quantificar sua intensidade com base em parâmetros físicos e estatísticos reproduzíveis é um requisito central para o controle e a otimização dos processos.

Métodos de visualização de alta velocidade, incluindo câmeras ultrarrápidas e técnicas ópticas como o sistema *schlieren*, possibilitam a observação direta das bolhas cavitantes e de seus colapsos, conforme demonstrado nas imagens de Tomita e Shima (1990). Apesar de proporcionarem descrições minuciosas da forma das bolhas e da estrutura do escoamento, tais abordagens envolvem custos elevados, elevada sensibilidade a perturbações ambientais e limitações significativas quanto à sua aplicabilidade em ambientes industriais com pouca acessibilidade ou transparência ótica.

Simultaneamente, abordagens acústicas que utilizam hidrofones ou abordagens com acelerômetros têm sido empregadas para identificar a ocorrência de cavitação, com ênfase na análise de componentes espectrais localizados no segundo harmônico da frequência fundamental ( $2,25f_0$ ), geralmente na faixa de 20 kHz a 150 kHz, bem como na extração de sinais em banda larga entre 10 kHz e 5 MHz. Tais métodos, discutidos por Wu *et al.* (2022) e normatizados por entidades como a *International Electrotechnical Commission* (IEC, 2022), são reconhecidos por sua capacidade de gerar dados reproduzíveis e comparáveis. No entanto, apresentam limitações decorrentes da dependência do acoplamento acústico ao fluido e da suscetibilidade a interferências provenientes de vibrações mecânicas no ambiente.

Como estratégia complementar, têm ganhado destaque os sistemas que utilizam fotodetecção da luz transmitida através de escoamentos sujeitos à cavitação, devido à sua característica não invasiva e à sensibilidade a variações provocadas por bolhas e por estruturas turbulentas presentes

no interior do fluxo. Essa abordagem tem demonstrado potencial, conforme evidenciado nos resultados apresentados por West *et al.* (2025), que comparou o comportamento do sinal ótico de um fototransistor com o das pressões médias e desvios padrão das pressões.

Este trabalho teve como objetivo geral desenvolver um sistema de aquisição óptica de dados baseado em fotodiodo e microprocessamento de alta velocidade, voltado à detecção, análise estatística e caracterização espectral da cavitação hidrodinâmica a jusante de um bocal com geometria triangular, fabricado por manufatura aditiva. Para tal, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: (1) determinar a quantidade de amostras necessária para estimar a irradiância média e seu desvio padrão e (2) analisar as distribuições estatísticas do sinal ótico e sua relação com o regime bifásico do escoamento.

## MATERIAL E MÉTODOS

### *Desenvolvimento da metodologia para aquisição de dados*

A aquisição dos sinais foi realizada por meio de um microcontrolador STM32F411, operando com conversor analógico-digital (ADC) de 12 bits, voltado ao monitoramento e análise de sinais de alta frequência. A configuração interna do dispositivo e a implementação do *firmware* em linguagem C foram realizadas com o uso da plataforma STM32CubeIDE, adotando-se um oscilador externo de cristal com frequência de 25 MHz como fonte de clock. Essa frequência, multiplicada por meio de um circuito *Phase-Locked Loop* (PLL), resultou em um clock do sistema ajustado para 96 MHz. Esse mesmo *clock* alimentou o barramento PCLK2, responsável por prover energia ao ADC, tendo sido ajustado para operar com uma frequência ( $f_{ADC}$ ) de 24 MHz, após aplicação de um *prescaler* com fator 4. A janela de amostragem foi definida como três ciclos de *clock* e o tempo de conversão como quinze ciclos, totalizando um tempo de conversão de 0,75  $\mu s$  e uma taxa de amostragem estimada em 1,333 MS/s.

Para viabilizar a aquisição contínua dos dados e minimizar a sobrecarga de processamento na unidade central, foi empregada a técnica de Acesso Direto à Memória (DMA), para que os dados convertidos pelo ADC sejam salvos diretamente na memória. A comunicação com o computador foi realizada por meio de uma interface USB-serial utilizando a classe CDC (*Communication Device Class*), com taxa de transmissão de 12 Mbit/s a 115200 bps (*bits per second*).

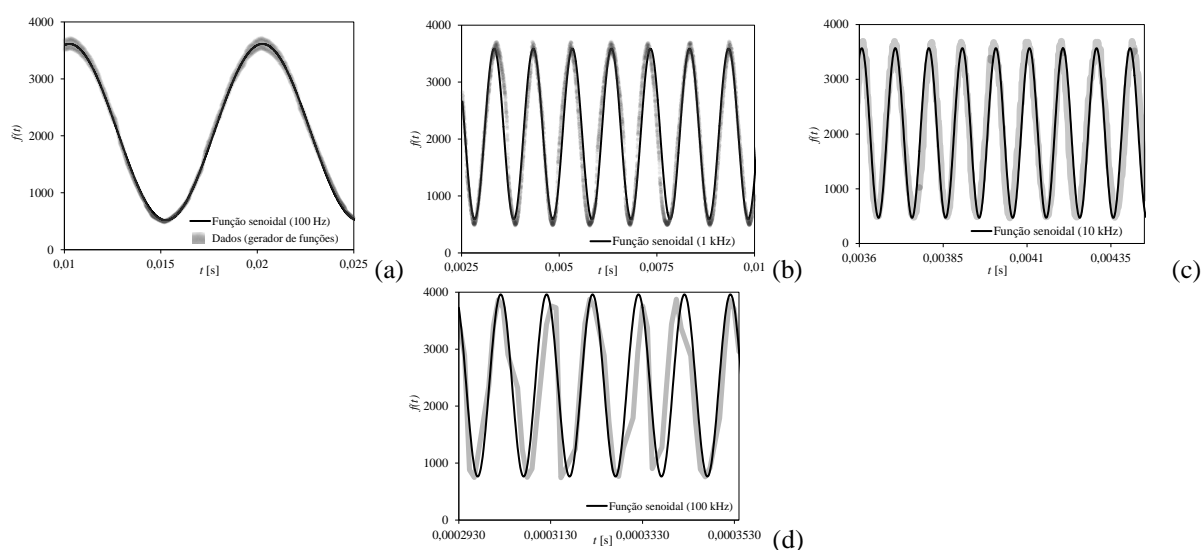
O software elaborado para a aquisição e análise dos dados foi escrito na linguagem Python, com o uso das bibliotecas NumPy, SciPy e Matplotlib. Essas bibliotecas, originalmente desenvolvidas por Travis Oliphant (NumPy), Eric Jones, Travis Oliphant e Pearu Peterson (SciPy) e John D. Hunter (Matplotlib), foram inicialmente divulgadas por meio de documentação técnica e repositórios de código aberto mantidos pela comunidade científica (NumPy, 2005; SciPy, 2001; Matplotlib, 2003). Tal arquitetura permite a leitura sequencial dos dados recebidos, a reconstrução temporal do sinal com base na taxa de amostragem efetiva e, na sequência, o processamento estatístico e espectral por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT).

A validação do sistema foi conduzida com o uso de um gerador de funções FG 100 (Digimess), configurado para emitir sinais senoidais com frequências controladas. Durante os ensaios, o gerador foi conectado em paralelo a um osciloscópio TDS 2014C (Tektronix), com largura de banda de 100 MHz e taxa de amostragem de 2 GS/s, o que possibilitou a verificação precisa das frequências geradas. Com essa configuração, a aquisição de sinais foi realizada simultaneamente pelo osciloscópio e pela interface de aquisição desenvolvida. Os testes iniciais abrangeram sinais variando de 100 Hz a 100 kHz, com o objetivo de avaliar a capacidade de amostragem do sistema e a fidelidade na reconstrução temporal dos sinais.

Para cada sessão de aquisição, foi definido um tempo de coleta de 60 segundos. Os dados foram armazenados em um buffer circular, gerenciado via DMA, com capacidade para 30.000 amostras. Após o término da aquisição, o conteúdo do buffer foi transferido para o computador por meio da interface USB-Serial. No computador, o software de aquisição, implementado em Python, executou a leitura dos dados, a reconstrução do eixo temporal com base na frequência do sinal injetado, e a identificação dos componentes dominantes por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Os resultados obtidos foram então comparados às leituras do osciloscópio e à frequência nominal fornecida pelo gerador de funções, com o intuito de validar a fidelidade do sistema. Em função das restrições associadas à taxa de transmissão via USB-Serial, o software não é capaz de receber todos os dados simultaneamente; os dados são transferidos apenas na ordem em que foram adquiridos. Assim, em testes com tempo de aquisição de 1 s, registra-se tipicamente cerca de 13.000 amostras. Apesar dessa limitação no volume de dados transferidos, a taxa real de aquisição obtida manteve-se em 847464 amostras por segundo, como evidenciado pela capacidade do sistema em reconstruir com precisão tanto a forma de onda quanto a frequência dos sinais testados. Para fins de correção temporal, os ensaios mostraram que o eixo do tempo pode ser reconstruído com base na expressão  $0 \leq (NS-1)\Delta T \leq NS$ , em que  $NS$  representa o número de amostras capturadas pelo software de aquisição e  $\Delta T = 1,18 \times 10^{-6}$  s, válida para testes conduzidos em computador com processador i7-1165G7 e memória RAM de 16 GB. Testes em uma máquina com um processador i7 de 13ª geração demonstraram maior capacidade de recepção de dados e testes realizados com um processador i5 indicaram haver maior perda de dados.

Os gráficos apresentados na Figura 1 comparam as funções senoidais de referência, nas frequências de 100 Hz a 100 kHz, com os sinais reconstruídos a partir dos dados adquiridos. Os resultados indicam uma boa concordância entre as curvas senoidais e as medições experimentais dos sinais injetados pelo gerador de funções, embora se observe uma redução na resolução para a senoidal com frequência de 100 kHz.

Figura 1 - Sinais senoidais reconstruídos a partir dos dados adquiridos, em comparação com as formas de onda geradas pelo gerador de funções: (a) 100 Hz; (b) 1 kHz; (c) 10 kHz; (d) 100 kHz.

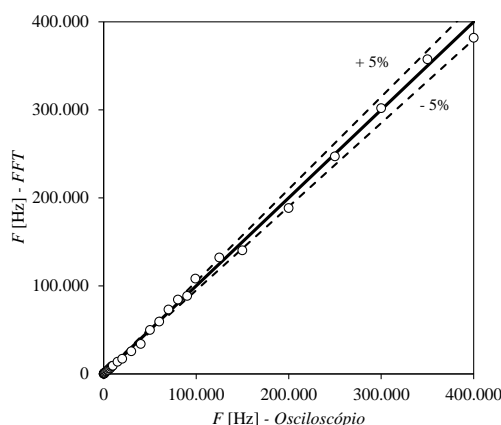


O ajuste da base de tempo empregando os sinais senoidais gerados demonstrou que a quantidade de amostras adquiridas em função do tempo de execução do software ( $t$ ) seguiu uma



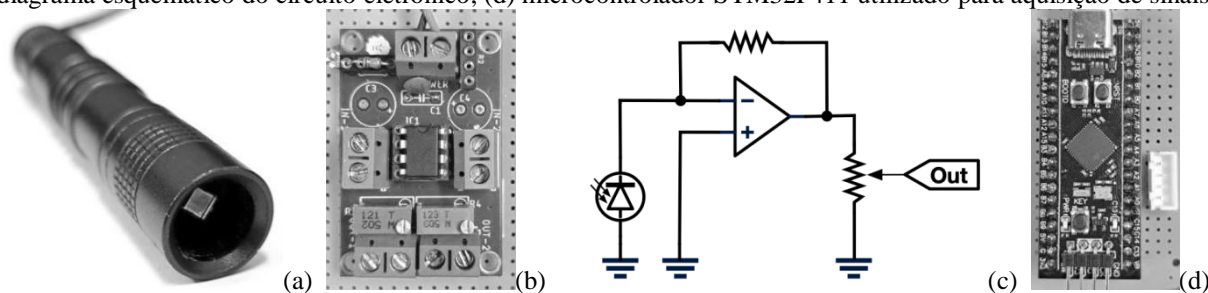
relação linear expressa por  $n \approx 12051t + 451$ . Essa relação empírica permite estimar o número de amostras coletadas com base no tempo disponível para processamento e transferência em um sistema computacional dotado de processador i7-1165G7 e memória RAM de 16 GB. Em termos de frequência, o sistema é capaz de capturar frequências de até  $\sim 400$  kHz a partir da análise espectral do sinal, com como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 - Análise comparativa entre as frequências medidas por meio do osciloscópio e aquelas estimadas a partir da análise espectral dos dados adquiridos como sistema proposto.



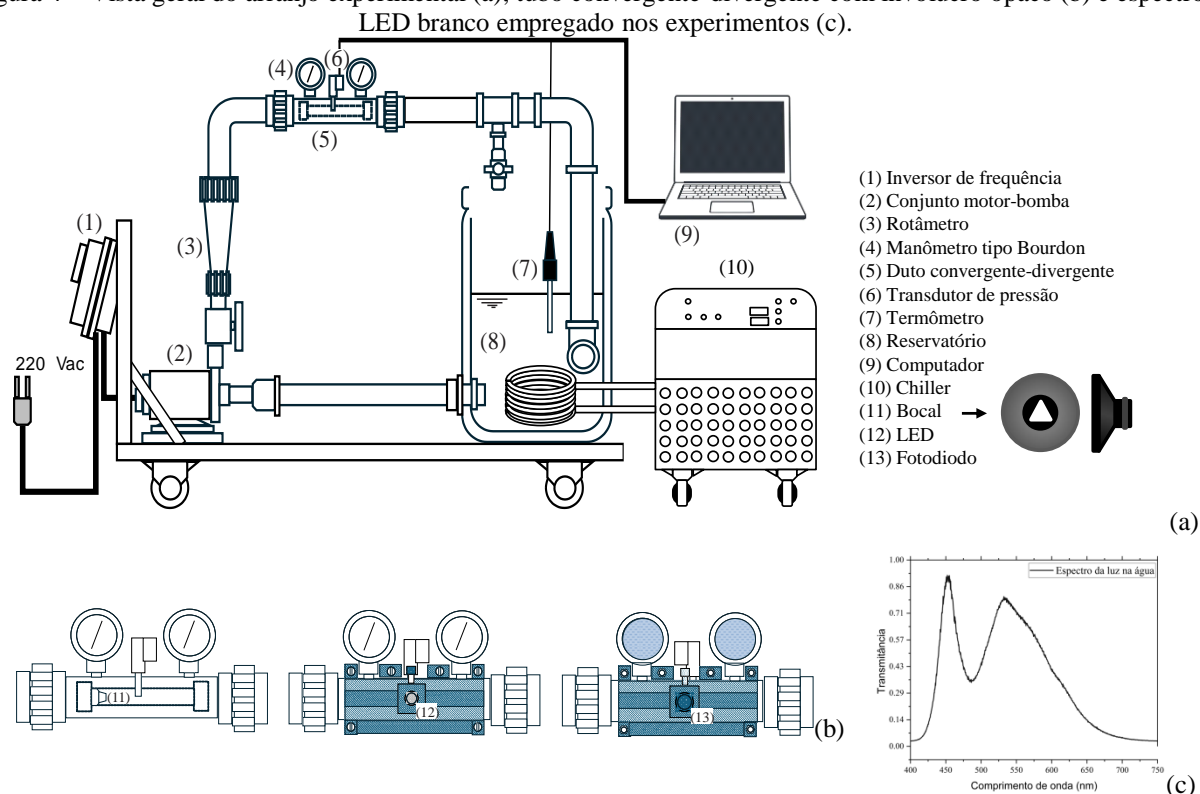
Neste estudo, foi empregado um fotodiodo PIN (modelo BPW34), encapsulado em resina epóxi e com área sensível de  $7,5 \text{ mm}^2$ , capaz de operar na faixa espectral de 430 a 1100 nm e em temperaturas entre  $-40^\circ\text{C}$  e  $100^\circ\text{C}$ , adequado para fontes de luz visível e infravermelha próxima (Figura 3a). O componente foi instalado em suporte de alumínio anodizado para garantir isolamento elétrico e estabilidade térmica e conectado diretamente a um amplificador de transimpedância, montado com um amplificador operacional LM358 alimentado com 5 V (Figura 3b,c). Um resistor de realimentação de  $120 \text{ k}\Omega$  realiza a conversão da fotocorrente (dezenas de  $\mu\text{A}$ ) em sinais de tensão da ordem de centenas de milivolts, com ganho aproximado de  $150 \text{ kV/A}$ . O sinal resultante é digitalizado pelo microcontrolador STM32F411 (Figura 3d), responsável pela aquisição e processamento dos dados. A montagem eletrônica foi acondicionada em caixa blindada de alumínio (marca Hammond,  $11,7 \times 9,0 \times 3,3 \text{ cm}$ ), a fim de reduzir interferências eletromagnéticas e garantir a integridade do sinal.

Figure 3 - (a) Suporte de alumínio contendo o fotodiodo BPW34; (b) imagem do amplificador transimpedância; (c) diagrama esquemático do circuito eletrônico; (d) microcontrolador STM32F411 utilizado para aquisição de sinais.



O sistema experimental foi configurado como um circuito hidráulico fechado (Figura 4), com um tubo de acrílico transparente na parte superior, de geometria convergente-divergente e diâmetros internos de 0,04144 m e 0,0183 m, permitindo a visualização direta do escoamento. Um LED branco, cujo espectro de emissão é apresentado na Figura 4c, foi instalado em uma das laterais do tubo, com um fotodiodo posicionado de forma diametralmente oposta, possibilitando a passagem da luz através do escoamento, seja ele monofásico (água) ou bifásico (água e vapor), conforme as condições de operação. A intensidade da luz transmitida varia em função das flutuações ópticas provocadas pela presença de bolhas e por alterações na densidade do meio. O escoamento foi gerado por um bocal com geometria triangular (lado de 10,67 mm, área de 49,3 mm<sup>2</sup> e diâmetro hidráulico de 6,16 mm), submetido a nove vazões distintas entre  $3,89 \times 10^{-4}$  e  $9,17 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s, o que resultou em números de Reynolds de  $4,86 \times 10^4$  a  $1,15 \times 10^5$  e velocidades médias entre 7,9 e 18,6 m/s. A temperatura da água foi mantida em  $21 \pm 1$  °C por meio de um chiller de água. A vazão foi controlada por um inversor de frequência com incrementos de 5 Hz e monitorada por rotâmetro calibrado, com incerteza de  $1,0 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s, de tal maneira que as vazões corresponderam a frequências do motor entre 20 Hz e 60 Hz.

Figura 4 – Vista geral do arranjo experimental (a), tubo convergente-divergente com invólucro opaco (b) e espectro do LED branco empregado nos experimentos (c).



Fonte: adaptado de West *et al.* (2025).

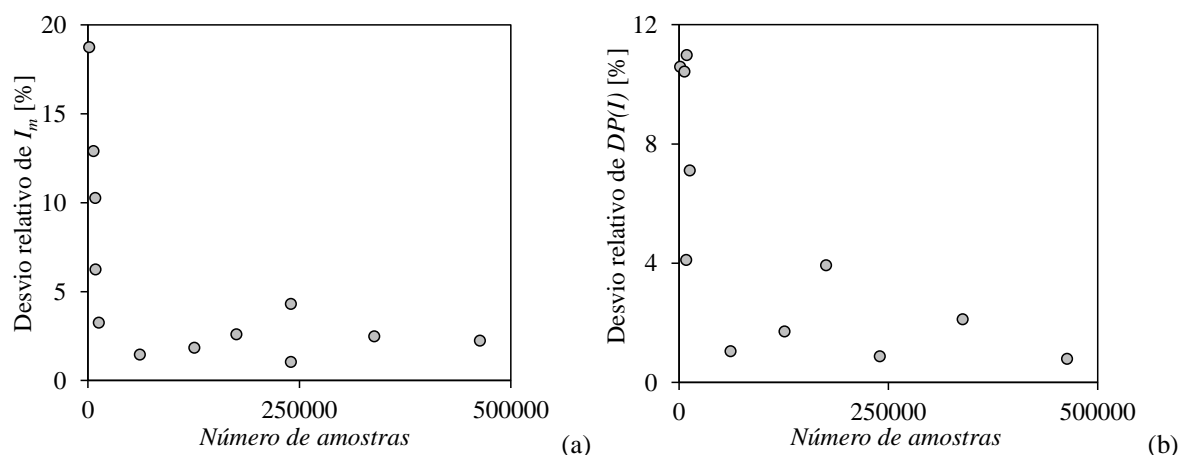
O fotodiodo utilizado opera com base em uma estrutura do tipo PIN, composta por três camadas principais: uma região de silício tipo p ( $Si_p$ ), uma região intrínseca ( $Si_{int}$ ), correspondente à zona de depleção, e uma região tipo n ( $Si_n$ ). A radiação incidente penetra pela superfície superior, atravessa a camada tipo p e atinge predominantemente a região intrínseca, onde ocorre a geração de pares elétron-lacuna. Em razão do campo elétrico interno da estrutura, essas cargas são rapidamente separadas, originando uma corrente elétrica mensurável, proporcional à intensidade da radiação

incidente. A corrente total gerada, denotada por  $I_{pE}$ , é composta pela soma da corrente de elétrons ( $I_e$ ) e da corrente de buracos ( $I_h$ ), de modo que  $I_{pE} = I_e + I_h$ .

## RESULTADOS

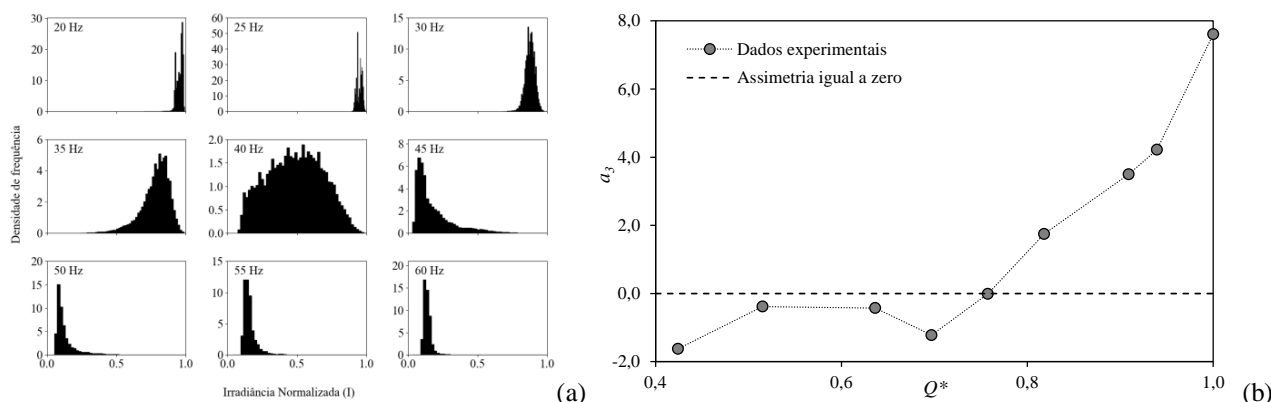
Para determinar o número mínimo de amostras, os ensaios tiveram início com repetições experimentais independentes, conduzidas à vazão de  $6,944 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ , com tempos de aquisição controlados para gerar séries contendo entre 1.410 e 463.401 amostras. Para cada série, calcularam-se os valores médios,  $I_m$ , e desvios padrão,  $DP(I)$ , da irradiância normalizada,  $I = I_{pE}/I_{pE\max}$ , os quais foram comparados a um conjunto de referência com 759.547 amostras, obtido sob as mesmas condições. Os desvios relativos dessas estimativas diminuíram progressivamente com o aumento do número de amostras, conforme ilustrado na Figura 5. Após aproximadamente 61.430 amostras, os desvios ficaram abaixo de 5%, atingindo estabilidade em torno de 239.000 amostras. A partir desses resultados, adotou-se o valor de 239.000 amostras como referência padrão para cada condição de escoamento nas etapas subsequentes da análise.

Figura 5 – Decaimento dos desvios relativos da irradiância média (a) e do desvio padrão da irradiância (b).



As distribuições de  $I$  são apresentadas na Figura 6a, correspondentes às nove vazões testadas, também expressas de forma adimensional como  $Q^* = Q/Q_{\max}$ . Os valores das vazões são (em  $\text{m}^3/\text{s}$ ):  $3,89 \cdot 10^{-4}$ ;  $4,72 \cdot 10^{-4}$ ;  $5,83 \cdot 10^{-4}$ ;  $6,39 \cdot 10^{-4}$ ;  $6,94 \cdot 10^{-4}$ ;  $7,50 \cdot 10^{-4}$ ;  $8,33 \cdot 10^{-4}$ ;  $8,61 \cdot 10^{-4}$ ;  $9,17 \cdot 10^{-4}$ . Para as duas menores vazões, observou-se forte concentração de valores de  $I$  acima de 0,9, com média aproximada de 0,98. Na terceira condição, associada à frequência do motor de 30 Hz, verificou-se um aumento na amplitude das flutuações do sinal e uma redução da média para 0,83. Com o aumento da população de bolhas para a vazão seguinte, a distribuição de  $I$  passou a apresentar assimetria negativa mais acentuada, com aumento adicional da amplitude e queda da média para cerca de 0,62. A condição de 40 Hz marca um ponto de transição no qual a distribuição torna-se aproximadamente simétrica, como pode ser visto na Figura 6b. A partir de 45 Hz, observa-se uma inversão no sinal do coeficiente de assimetria, indicando uma mudança no comportamento estatístico da irradiância. Esse padrão torna-se progressivamente mais acentuado, resultando em valores médios decrescentes, atingindo um mínimo de 0,0032 na condição de 60 Hz.

Figura 6 – Distribuições de densidade de frequência para a irradiância normalizada (a) e coeficiente de assimetria para as distribuições das irradiâncias normalizadas (b).



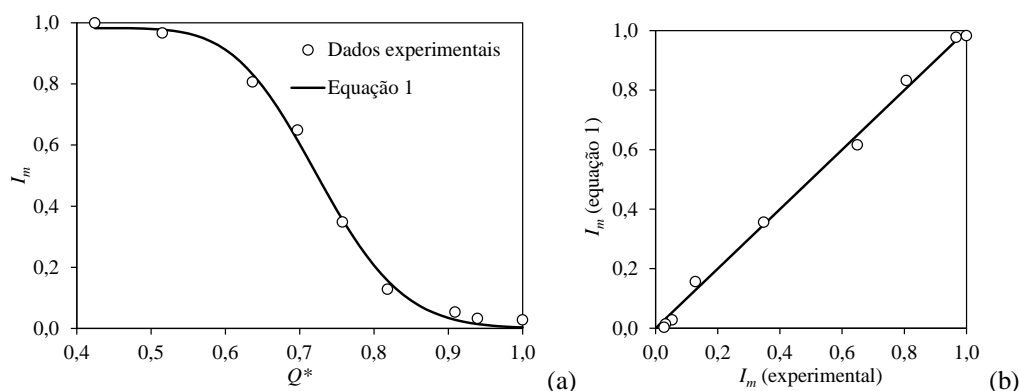
Os valores médios de irradiância, denotados por  $I_m$ , apresentaram uma tendência decrescente em função da vazão adimensionalizada  $Q^*$ , conforme ilustrado na Figura 7a. Esse comportamento pôde ser representado com a equação 1, proposta por West *et al.* (2025) para modelar a irradiância média em função da vazão, cujo ajuste aos dados resultou em um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,997$ . A Figura 7b compara os valores experimentais com aqueles calculados por meio da equação 1, incluindo a linha de ajuste ideal, evidenciando aderência entre a predição e as medições.

O desvio padrão da irradiância, interpretado como uma medida indireta da intensidade turbulenta com base nos sinais obtidos por um transdutor de pressão utilizado por West *et al.* (2025), foi descrito pela Equação 2, uma função adaptada do modelo Gaussiano. As Figuras 7c e 7d mostram que os dados experimentais ajustam-se ao modelo, com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,970$ . Observa-se que o desvio padrão atinge seu valor máximo em  $Q^* = 0,76$ , correspondente ao regime no qual a distribuição de  $I$  apresenta coeficiente de assimetria próximo de zero, caracterizando uma transição entre padrões estatísticos com assimetria negativa e positiva, conforme ilustrado na Figura 6.

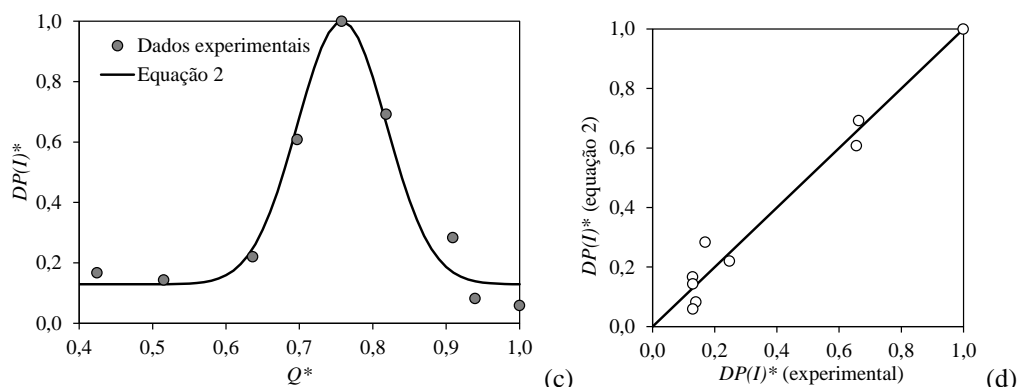
$$I_m = [-9,11 \times 10^{-4} + \tanh(0,946Q^{*-2,33})]^{18,8}, \quad (1)$$

$$DP(I) = 0.87 \exp\left[-\frac{(Q^*-0.758)^2}{0.00742}\right] + 0.129. \quad (2)$$

Figura 7 - Irradiância média normalizada (a e b) e desvio padrão normalizado (c e d) em função de  $Q^*$ .







## CONCLUSÕES

A instrumentação ótica proposta demonstrou elevada capacidade para identificar a ocorrência e caracterizar a cavitação hidrodinâmica em escoamentos bifásicos, por meio da análise estatística de sinais adquiridos com fotodiodo e microprocessamento em alta velocidade. O sistema apresentou taxa efetiva de aquisição próxima de 847 mil amostras por segundo, com estabilidade temporal adequada e fidelidade espectral em frequência até a faixa de 400 kHz, mesmo sob limitações de transmissão via USB-Serial. A análise de convergência estatística indicou que a coleta de aproximadamente 239 mil amostras por condição experimental é suficiente para garantir a estimativa confiável da irradiância média e de seu desvio padrão. As distribuições de irradiância evidenciaram alterações significativas no comportamento estatístico do escoamento para as diferentes vazões testadas, com transição entre assimetrias negativa e positiva identificada a partir da inversão do sinal do coeficiente de assimetria. Esse ponto de inflexão está associado a  $Q^* = 0,76$ , a partir da qual o desvio padrão atinge seu valor máximo e a distribuição tende à simetria. Modelos empíricos ajustados aos dados experimentais permitiram descrever a evolução tanto da irradiância média quanto do desvio padrão em função da vazão adimensional, com coeficiente de determinação  $R^2 > 0,97$ . Os resultados confirmam que a instrumentação óptica desenvolvida é eficaz para detecção indireta da cavitação e para o monitoramento de mudanças no regime do escoamento bifásico por meio da análise de distribuição da irradiância.

## REFERÊNCIAS

- BANAKAR, V.V.; GOGATE, P.R.; RAHA, A.; SAURABH. (2023). “Application of ultrasound in heat exchanger handling supersaturated  $\text{CaSO}_4$  solution for reduction of scaling by induced precipitation and in-situ cleaning”. Chemical Engineering Science, 276, pp. 118814.
- BHARADWAJ, A.V.S.L.; CHINNAM, S.; PHILLIPS, J.J.; JANANI, V.; GAJENDRA, K.S.; ARCHANA, V.; CHAUHAN, A.S.; GUPTA, N.K. (2024). “Cavitation-assisted synthesis and characterization of a novel catalyst from waste coconut trunk biomass for biodiesel production”. Bioresource Technology, 412, pp. 131397.
- MATPLOTLIB (2003). Matplotlib – Visualization with Python. Disponível em: <https://matplotlib.org>. Acesso em: maio de 2025.
- MUSTAPHA, A.T.; WAHIA, H.; JI, Q.; FAKAYODE, O.A.; ZHANG, L.; ZHOU, C. (2024). “Multiple-frequency ultrasound for the inactivation of microorganisms on food: A review”. Journal of Food Process Engineering, 47, e14587.

NUMPY (2005). NumPy – Numerical Python. Disponível em: <https://numpy.org>. Acesso em: maio de 2025.

SCIPY (2001). SciPy – Scientific computing tools for Python. Disponível em: <https://scipy.org>. Acesso em: maio de 2025.

TOMITA, Y.; SHIMA, A. (1990). “*High-speed photographic observations of laser-induced cavitation bubbles in water*”. *Acustica*, 71(3), pp. 161–171.

WEST, L.G.M.; SIMÕES, A.J.R.; TEIXEIRA, L.R.; SANTOS, C.A.; OLIVEIRA, L.R.; PEREIRA, L.G.; FERREIRA, V.P.; SIMÕES, A.L.A.; QUEIROZ, L.M.; PEPE, I.M. (2025). “*Hydrodynamic cavitation induced by different nozzle shapes in pressurized conduits, instrumented by optical detection, searching for pressure correlation*”. *Flow Measurement and Instrumentation*, 102, 102797.

WOOD, R.J.; HAMIDI, H.; FAR, A.J. (2024). “*Ultrasound based technology for removal of scale from downhole production tubing, an experimental verification*”. *Geoenergy Science and Engineering*, 237, 212783.

YENENEH, A.M.; AL BALUSHI, K.; JAFARY, T.; AL MARSHUDI, A.S. (2024). “*Hydrodynamic cavitation and advanced oxidation for enhanced degradation of persistent organic pollutants: A review*”. *Sustainability*, 16, 4601.

## AGRADECIMENTOS

Este estudo foi apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001 e número do processo 88881.708215/2022-01 – PDPG Emergencial para Consolidação Estratégica de Programas de Pós-Graduação (PPGs) stricto sensu acadêmicos com conceitos 3 e 4; 88881.691452/2022-01 - PDPGPOSDOC/Programa de Pós-Doutorado Estratégico do Programa de Desenvolvimento da Pós-Graduação (PDPG), ambos do Mestrado em Meio Ambiente, Água e Saneamento – MAASA – UFBA. Esta pesquisa foi apoiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) por meio do Programa de Pós-Graduação em Energia e Meio Ambiente (PGENAM) sob o número do processo 88887.959392/2024-00.