ISSN:2594-6153

Projeto e Caracterização de um Sistema Óptico-Mecânico para Acoplamento e Monitoramento da Produção de Biodiesel em Sistema Fechado

Walter Pereira de Carvalho Filho, Marcos Tadeu Tavares Pacheco

Universidade Santa Cecília (UNISANTA), Santos-SP, Brasil

E-mail: wf111785@aluno.unisanta.br

Resumo: Este trabalho descreve o desenvolvimento e projeto de um sistema óptico-mecânico inovador para acoplamento e monitoramento em tempo real da produção de óleo diesel em sistema fechado, utilizando espectroscopia Raman. O objetivo foi criar um dispositivo de acoplamento para cateteres de fibra óptica que otimize a captação da dispersão de luz do espectrômetro Raman, garantindo a viabilidade da leitura e a qualidade do sinal em condições adversas, com foco na facilidade de limpeza e minimização de artefatos. A metodologia incluiu o projeto em AutoCAD, usando aço inoxidável e uma microcâmara de ar com água para mitigar a dispersão de luz, e uma lâmina de quartzo para otimização óptica. Foi utilizado um espectrômetro Raman portátil Anton Paar OptoTec CORA 5200 e uma sonda Raman com sete fibras ópticas de sílica. Os resultados mostraram o croqui do dispositivo guia em aço inox e uma tampa de vedação em latão. A discussão destacou a importância do quartzo para otimizar a captação do sinal e facilitar a limpeza.

Palavras-chave: Espectroscopia Raman; Fibra ótica; Acoplamento Ótico; Monitoramento de Processos.

Design and Characterization of an Optical-Mechanical System for Coupling and Monitoring Biodiesel Production in a Closed System

Abstract: This paper describes the development and design of an innovative optical-mechanical system for coupling and real-time monitoring of diesel oil production in a closed system, using Raman spectroscopy. The objective was to create a coupling device for fiber optic catheters that optimizes the capture of light scattering from the Raman spectrometer, ensuring readability and signal quality under adverse conditions, with a focus on ease of cleaning and minimization of artifacts. The methodology included design in AutoCAD, using stainless steel and a micro-air chamber with water to mitigate light scattering, and a quartz slide for optical optimization. An Anton Paar OptoTec CORA 5200 portable Raman spectrometer and a Raman probe with seven silica optical fibers were used. The results showed a sketch of the stainless steel guide device and a brass sealing cap. The discussion highlighted the importance of quartz for optimizing signal capture and facilitating cleaning.

Keywords: Raman Spectroscopy; Fiber Optics; Optical Coupling; Process Monitoring.

Introdução

A otimização e o controle de processos químicos são essenciais para a eficiência e segurança em setores que vão da produção de biocombustíveis à síntese de fármacos. O

monitoramento em tempo real garante qualidade, maximiza rendimentos, reduz custos e mitiga riscos. No entanto, as análises off-line, tradicionalmente utilizadas, são lentas, sujeitas a erros e não permitem intervenções imediatas. Assim, cresce a demanda por tecnologias analíticas capazes de fornecer informações contínuas e in-situ, diretamente no ambiente da reação. [1,2].

Técnicas como GC, HPLC, IR e MS têm sido usadas no monitoramento de reações, mas apresentam limitações para aplicações em linha, como preparo complexo de amostras e inadequação a processos contínuos. Nesse contexto, a espectroscopia Raman se destaca por ser não destrutiva, não invasiva e capaz de fornecer informações moleculares detalhadas em diferentes fases, inclusive em meios aquosos, com mínima interferência da água. [3, 4].

A espectroscopia Raman baseia-se no espalhamento inelástico da luz, no qual um feixe laser interage com as vibrações moleculares da amostra. O espectro resultante funciona como uma "impressão digital" única, permitindo identificar e quantificar compostos, além de acompanhar transformações estruturais e cinéticas em tempo real[5]. A versatilidade da espectroscopia Raman é evidenciada em diversas aplicações, desde o monitoramento da produção de biodiesel [6] até a análise de produtos farmacêuticos [7] e o controle de processos em polimerização [8]. Artigos como o de Li e Zhang (2022) [9] e Brunetti et al. (2012) [10] aprofundam a compreensão sobre os princípios e aplicações da espectroscopia Raman, incluindo seu uso em sensoriamento por fibra óptica. Para o monitoramento *in-situ* e em tempo real de reações químicas em ambientes industriais ou de laboratório, a integração da espectroscopia Raman com sondas de fibra óptica é de suma importância.

As sondas de fibra óptica permitem o desacoplamento do espectrômetro Raman do ponto de medição, viabilizando a análise em locais de difícil acesso, em condições extremas de temperatura ou pressão, ou em ambientes perigosos [8]. Cateteres de fibra óptica, pela flexibilidade e tamanho reduzido, podem ser inseridos diretamente em reatores ou linhas de produção, garantindo contato direto com a amostra e fornecendo dados representativos para o controle preciso do processo [9]. A eficácia do monitoramento com cateteres de fibra óptica depende do design do acoplamento, que deve garantir limpeza fácil, evitar acúmulo de resíduos, preservar a qualidade espectral e maximizar a eficiência na coleta da luz Raman. Artigos como o de Okagbare e Morris (2012) [6] e Kobayashi-Kirschvink et al. (2024) [7] abordam a importância do design da sonda e a otimização da coleta de sinal em espectroscopia Raman baseada em fibra, destacando a necessidade de soluções inovadoras para superar esses desafios.

Objetivos

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de acoplamento para cateteres de fibra óptica que permita contato direto com a amostra, otimize a captação do sinal Raman e assegure leituras confiáveis em tempo real. O projeto prioriza facilidade de limpeza, redução de artefatos e robustez do monitoramento em ambientes industriais.

Material e Métodos

O sistema de acoplamento via cateter de fibra óptica foi projetado para monitorar a produção de biodiesel em bancada experimental no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília. O dispositivo, desenvolvido em AutoCAD e construído em aço inoxidável, possui uma microcâmara de ar com fina camada de água para reduzir reflexões e otimizar a captação do sinal Raman. Na extremidade, uma lâmina de quartzo (1 mm) foi fixada em ângulo, garantindo estabilidade e transparência óptica.

O monitoramento será realizado com espectrômetro Raman portátil CORA 5200 (Anton Paar OptoTec), equipado com laser de 785 nm, 450 mW. A sonda Raman foi confeccionada com sete fibras de sílica, inseridas em tubo de PTFE de 3 m, com preenchimento em resina epóxi e acabamento lapidado/polido. Essa configuração assegura alta eficiência na transmissão e coleta da luz, permitindo monitoramento preciso e em tempo real do processo.

Resultados

A (figura 1) traz o croqui do dispositivo a ser desenvolvido para fixar a sonda de fibra ótica servindo como guia na união sonda e o sistema onde ocorrerá a reação química, é composto por um corpo de aço inox escovado, com as seguintes especificações: Comprimento: 32 mm; Diâmetro externo: 25,5 mm; Acabamento sextavado para facilitar a soldagem na tubulação; Furo centralizado de 6,0 mm para acomodação da fibra óptica.

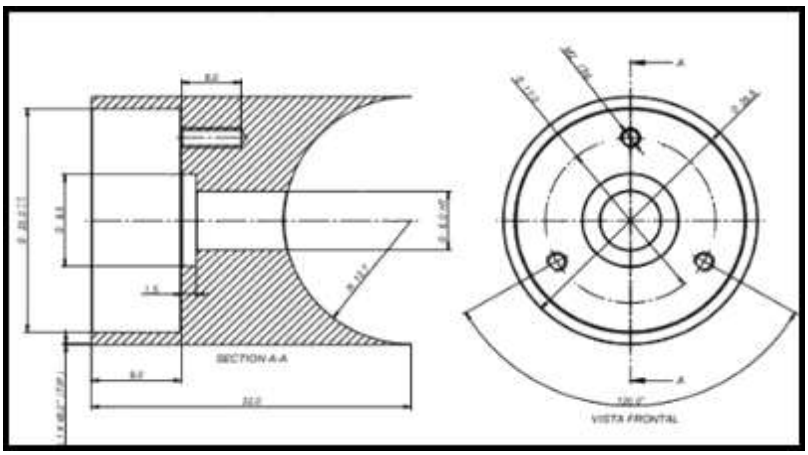

Figura 1. Croqui Dispositivo Guia.

A figura 2 mostra a imagem do acoplamento em corte, este que será inserido na extremidade da sonda que manterá contato com a reação química em processo. Seu corpo é de aço inox com uma película de quartzo em ângulo na ponta.

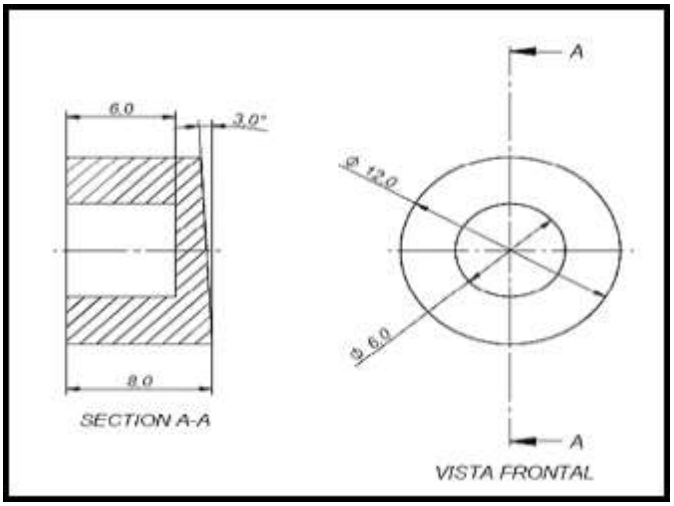

Figura 2. Acoplamento ponta da fibra.

Discussão

O desenvolvimento do protótipo evidenciou dois principais desafios: a montagem da peça de quartzo na extremidade da sonda e o processo de higienização da fibra óptica para análises subsequentes. A fixação do quartzo demanda elevada precisão, visto que pequenos desalinhamentos podem comprometer a eficiência da coleta Raman, conforme já reportado por Utzinger & Richards-Kortum (2003) e Brunetti et al. (2012).

Outro ponto crítico refere-se ao acúmulo de resíduos na ponta da sonda, que pode gerar artefatos espectrais e reduzir a confiabilidade do monitoramento. Estudos anteriores destacam que a degradação do sinal por contaminação superficial é um dos principais limitadores para aplicações em linha [6,7].

A utilização do quartzo, devido à sua alta transmitância óptica e resistência química, representa uma solução favorável, facilitando a limpeza.

A durabilidade da vedação mecânica é crucial, pois ciclos de higienização podem comprometer sua integridade. Estudos destacam a necessidade de sistemas robustos e protocolos padronizados de limpeza, capazes de evitar contaminações e ampliar a reprodutibilidade e a vida útil do dispositivo. [8].

Em síntese, o protótipo mostrou-se funcional, mas a otimização do acoplamento da peça e o estabelecimento de estratégias de higienização permanecem como etapas essenciais para sua consolidação em aplicações industriais.

Conclusão

Em conclusão, o sistema óptico-mecânico desenvolvido para monitoramento da produção de óleo diesel por espectroscopia Raman representa um avanço no controle de processos químicos. O *design* do acoplamento, com uso de aço inoxidável, quartzo e microcâmara de ar, mostrou-se eficaz em superar desafios e garantir precisão nas leituras Raman em tempo real. Este trabalho valida a aplicabilidade da técnica para monitoramento in-situ e abre caminho para futuras otimizações em larga escala.

Referências

1. Zachary webb, José Romagnoli. **Real-Time Chemical Process Monitoring with UMAP**, Computer Aided Chemical Engineering, Elsevier,Volume 50,2021,Pages 2077-2082,ISSN 15707946, https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88506-5.50321-1

2. S. M. Angel, "**Fiber optic Raman spectroscopy**". Spectrochim. Acta A, vol.53, no.13, pp. 2155 –2166, 1997

3. R. L. McCreery, **Raman Spectroscopy for Chemical Analysis**. New York: Wiley, 2000.

4 Utzinger U, Richards-Kortum RR**. Fiber optic probes for biomedical optical spectroscopy**. J Biomed Opt. 2003 Jan;8(1):121-47. doi: 10.1117/1.1528207. PMID: 12542388.

5. Myrick ML, Angel SM. **Elimination of Background in Fiber-Optic Raman Measurements.** 1990;44(4):565-570. doi:10.1366/0003702904087235

6. Okagbare PI, Morris MD. **Fluorocarbon fiber-optic Raman probe for non-invasive Raman spectroscopy**. Appl Spectrosc. 2012 Jun;66(6):728-30. doi:10.1366/12-06592. PMID: 22732546.

7. Koseki J. Kobayashi-Kirschvink, Peter T. C. So, and Jeon Woong Kang., **High-Throughput Raman Spectroscopy by Horizontally Shifted Collection Fibers**.*AnalyticalChemistry* **2024** *96* (31),12598-12601DOI:10.1021/acs.analchem.3c05254

8. J. Li, J., Zhang, M. **Physics and applications of Raman distributed optical fiber sensing**. Light Sci Appl 11, 128 (2022). https://doi.org/10.1038/s41377-022-00811-x

9. Anna Chiara Brunetti, Walter Margulis, and Karsten Rottwitt, **Raman probes based on optically-poled double-clad fiber and coupler**, Opt. Express 20, 28563-28572 (2012). https://doi.org/10.1364/OE.20.028563

10. Keyvan Mollaeian, Suying Wei, Mohammad R. Islam, William E. Holmes, and Tracy J. Benson. **Development of an Online Raman Analysis Technique for Monitoring, Energy & Fuels** 2016 30 (5), 4112-4117 DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b00313