



Impressão 3D de um sensor fotoacústico para a detecção de metano em baixas concentrações

G. R. Lima^{1*}, E. I. Santana¹, L. Mota², M. G. da Silva², M. S. Sthel²

¹Universidade Federal do Espírito Santo – UFES/Alegre

²Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF

*guilherme.r.lima@ufes.br

Resumo

Neste trabalho, um sensor fotoacústico diferencial foi construído utilizando a impressão 3D em resina líquida fotossensível, e a sua *performance* foi comparada com um sensor similar de metal na medida de traços de CH₄ em N₂. Para o sensor impresso, foram obtidos uma sensibilidade de $S_{\text{impresso}} = 0,97 \pm 0,06 \mu\text{V/ppmv}$, uma precisão de $\sigma_{\text{impresso}} = \pm 0,541 \text{ ppmv}$ e um limite de detecção de $LD_{\text{impresso}} = 1,05 \text{ ppmv}$. Este trabalho mostrou que a simplicidade do processo de impressão 3D, comparado à usinagem de precisão em metais, é muito promissor na fabricação de sensores fotoacústicos sensíveis para aplicações que envolvem emissões de CH₄ em baixas concentrações, a partir de 1,05 ppmv.

Palavras-chave: Sensor Fotoacústico, Detecção de Metano, Espectroscopia Fotoacústica, Impressão 3D, Resina Fotossensível.

1. Introdução

O metano desempenha um papel fundamental em diversas áreas de pesquisa, desde o monitoramento da poluição ambiental ^[1] até os diagnósticos médicos a partir da respiração humana ^[2], entre outros.

Uma das técnicas utilizada na detecção de gases é a Espectroscopia Fotoacústica, cujo componente principal é o sensor fotoacústico. Neste dispositivo ocorrem processos físicos que se iniciam na interação da radiação com o gás e culminam na geração de ondas acústicas dentro do sensor, cuja amplitude é linearmente proporcional à concentração da molécula de interesse ^[3].

A geometria interna deste sensor é projetada com o objetivo de gerar o efeito de ressonância acústica em uma determinada frequência, um processo que favorece a amplificação do sinal fotoacústico ^[6].

O sensor fotoacústico diferencial possui uma configuração altamente simétrica com suporte para duas janelas ópticas, dispostas paralelamente. Essas janelas, com elevada transparência à radiação eletromagnética incidente, permitem que moléculas presentes no interior do sensor sejam excitadas pela radiação.

Basicamente, o sensor é composto por dois tubos ressonantes cilíndricos. Cada tubo é equipado com um microfone centralizado como ilustra a Fig. (1).

Através da diferença dos sinais dos microfones é possível otimizar a razão entre o sinal fotoacústico de origem molecular (amostra) e o sinal fotoacústico de fundo (*background*), um sinal que não tem origem molecular, como o gerado pelo aquecimento das janelas. Por conta deste princípio o sensor é denominado diferencial ^[4].

Os *buffers* acústicos, Fig. (1), são grandes volumes que atuam na atenuação de ruídos originados por fluxos turbulentos de gás, além de contribuir na redução do sinal fotoacústico provocado pelo aquecimento das janelas ópticas, o *background*^[4].

O filtro, cujo comprimento equivale à quarta parte do comprimento de onda acústico ($\lambda/4$), tem como função gerar interferências destrutivas entre as ondas acústicas fora do tubo ressonante e, por conservação de energia, intensificar o efeito ressonante nos tubos^[7].

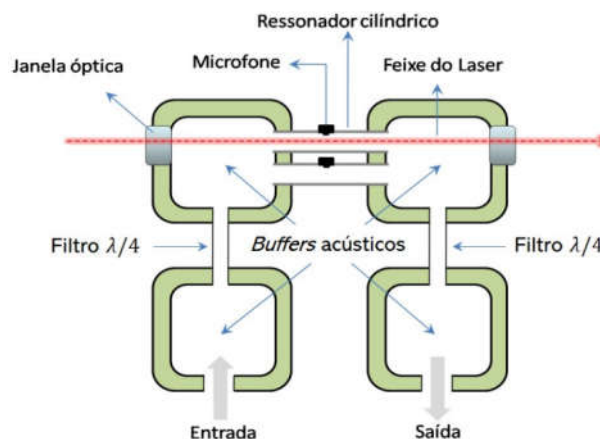


Figura 1. Diagrama esquemático do sensor fotoacústico diferencial.

Estes sensores, atualmente, são construídos usando usinagem de precisão em metal e são, geralmente, importados de institutos de pesquisa no exterior, como o Instituto *Fraunhofer*, o que justifica a proposta de construí-los em território nacional.

Recentemente, com o surgimento de impressoras 3D de resina fotossensível, com relativo baixo custo e simplicidade na operação, diversos pesquisadores começaram a construir e testar sensores fotoacústicos e alguns trabalhos bem recentes, com essa proposta podem ser encontrados na literatura^[5].

Um sensor fotoacústico diferencial foi construído utilizando a impressão 3D em resina líquida fotossensível, no próprio Laboratório de Física da UFES. O sensor impresso e um similar de metal foram submetidos a uma avaliação da *performance* comparativa na detecção de CH₄ que foi realizada no Laboratório de Ciências Físicas da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

Para a construção do sensor foram utilizados uma impressora 3D (Anycubic Photon), uma resina líquida fotossensível (Model Ortho) e dois tubos de aço inox. Já os materiais acessórios para montagem do sensor foram os conectores de gases, um circuito de alimentação e dois microfones de eletreto (*Knowles* EK-23024), janelas ópticas de Seleneto de Zinco (ZnSe) e anéis de vedação.

Para a avaliação de *performance* do sensor, foram utilizados: (1) um *Laser* de Cascata Quântica - QCL (*A. Lasers* - SBCW9449) com emissão no infravermelho médio (1354,9 cm⁻¹ a 1364,3 cm⁻¹); (2) um banho térmico (Microquímica - MQBMP-01); (3) um controlador de

temperatura (*A. Lasers* - TCU200); (4) uma fonte de corrente do *Laser* (*Lightwave* - LDX3232); (5) um amplificador Lock-in (*Stanford R. Systems* - SR830); (6) um medidor de potência (*Newport* - 1918R) e (7) dois controladores de fluxo (*Brooks* - SLA5850).

2.2. Metodologia

Inicialmente, as peças que compõem o sensor fotoacústico foram desenhadas e, com o auxílio do *software* Chitubox, foram adicionados os suportes responsáveis pela sustentação mecânica das peças durante a sua impressão. Após esta etapa, as peças foram fatiadas, em milhares de camadas com espessura de 25 μm e enviadas à impressora 3D.

O tempo de exposição à radiação ultravioleta (UV) para cada camada foi de 12 s. Nesta configuração, a peça de maior tamanho, levou cerca de 35 h para ser totalmente impressa. Com as peças finalizadas, teve início o processo de limpeza com álcool etílico 96%. Para finalizar o processo de cura, as peças foram expostas, por 30 min, a uma radiação UV de uma lâmpada.

Após a montagem dos componentes acessórios, foi realizada uma análise de *performance* comparativa dos sensores (impresso e de metal) na detecção de CH_4 em N_2 , comparando parâmetros como a sensibilidade, a precisão e o limite de detecção dos sensores.

3. Resultados e Discussão

Foi realizada uma varredura de frequências de modulação do *Laser*, na faixa de 2 kHz a 6 kHz, com o objetivo de identificar a frequência de ressonância acústica do sensor, Fig. (2).

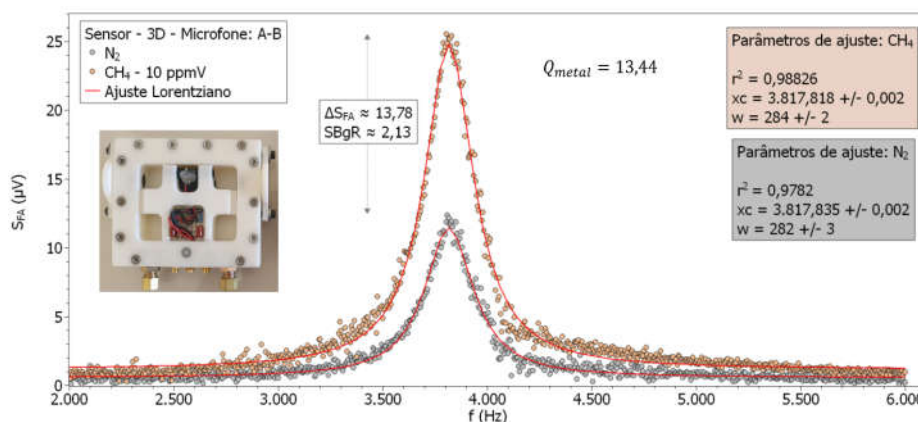


Figura 2. Curva de ressonância para o sensor impresso para a amostra e o *background*.

Os pontos na cor cinza se referem ao sinal fotoacústico de uma amostra inerte de N_2 , que não absorve radiação no infravermelho. Já os pontos laranjas representam a resposta do sensor para uma concentração de 10 ppmv de CH_4 em N_2 . É possível observar que o sensor construído possui ressonância em 3.817,8 Hz.

Para a calibração do sensor na faixa espectral de absorção do CH_4 (1360 cm^{-1}), foram inseridas diferentes concentrações de CH_4 para avaliação de *performance*. Os resultados obtidos são mostrados na Fig. (3).

A sensibilidade do sensor de metal foi ligeiramente superior $S_{\text{metal}} = 1,07 \pm 0,02 \text{ } \mu\text{V/ppmv}$ e $S_{\text{impresso}} = 0,97 \pm 0,06 \text{ } \mu\text{V/ppmv}$. A precisão foi avaliada pelo inverso da dispersão das

medidas de concentração $\sigma_{\text{metal}} = \pm 0,160$ ppmv e $\sigma_{\text{impresso}} = \pm 0,541$ ppmv, sendo menor para o sensor impresso. O limite de detecção do sensor de metal foi cerca de 3 vezes inferior ao sensor impresso $LD_{\text{metal}} = 0,358$ ppmv e $LD_{\text{impresso}} = 1,05$ ppmv.

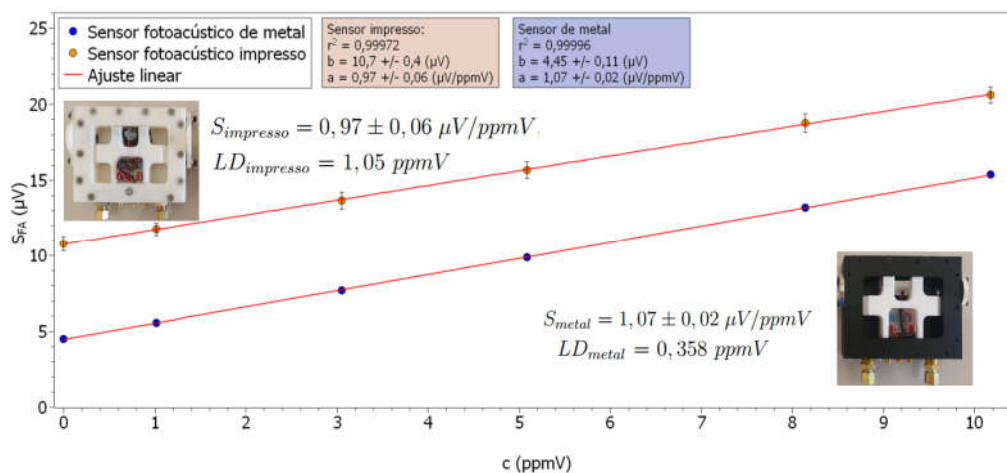


Figura 3. Calibração dos sensores impresso e de metal para a detecção de CH₄ em N₂.

Apesar da melhor *performance* do sensor de metal, ambos os sensores apresentaram resultados que habilitam a sua utilização em diversas aplicações que envolvem a detecção de CH₄ em concentrações acima dos limites de detecção mencionados.

4. Conclusões

Um sensor fotoacústico diferencial foi construído por impressão 3D em resina líquida fotossensível. Os resultados experimentais mostraram um bom desempenho do sensor impresso, embora ligeiramente inferior ao de metal, validando a metodologia de impressão desenvolvida neste trabalho. A simplicidade do processo de impressão 3D em resina fotossensível, quando comparado à usinagem de precisão em metais, constitui uma metodologia muito promissora na fabricação de sensores fotoacústicos altamente sensíveis para aplicações que envolve emissões de CH₄ em baixas concentrações como ppmv.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo e Pesquisa do Espírito Santo (FAPES), no âmbito do Programa Primeiros Projetos – PPP, que financiou este trabalho em sua totalidade.

Referências

- [1] NISBET, Euan G.; DLUGOKENCKY, Edward J.; BOUSQUET, Philippe. Methane on the rise again. *Science*, v. 343, n. 6170, p. 493-495, 2014.
- [2] MAO, Xuefeng et al. Breath methane detection based on all-optical photoacoustic spectrometer. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 239, p. 1257-1260, 2017.
- [3] SIGRIST, M. Air monitoring by laser photoacoustic spectroscopy. *Air monitoring by spectroscopic techniques*, Wiley New York, v. 127, p. 163–238, 1994.
- [4] MIKLÓS, A. et al. Improved photoacoustic detector for monitoring polar molecules such as ammonia with a 1.53 μm DFB diode laser. In: *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 1999. p. 126-128.
- [5] PAN, Yufeng et al. Compact and highly sensitive NO₂ photoacoustic sensor for environmental monitoring. *Molecules*, v. 25, n. 5, p. 1201, 2020.