

AValiação DO PERFIL DE VELOCIDADE DURANTE CONVECÇÃO NATURAL ATRAVÉS DA TÉCNICA DE IMAGENS SCHLIEREN

Palavras-Chave: Schlieren, Convecção Natural, Campo de temperatura.

Autores(as):

Pedro Silva Tangerina, DE – UNICAMP

Prof. Dr. Fábio Toshio Kanizawa, DE - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

O estudo da convecção natural é crucial em diversas aplicações da engenharia, incluindo sistemas de refrigeração, climatização e análise de fenômenos naturais, porém, sua complexidade dificulta a compreensão e a modelagem precisa, mesmo em geometrias básicas como cilindros horizontais e placas planas verticais ou inclinadas. Nesse contexto, técnicas experimentais avançadas tornam-se essenciais para uma melhor visualização e caracterização desses fenômenos térmicos.

Este trabalho propõe a aplicação da técnica Background-Oriented Schlieren (BOS), uma ferramenta experimental que utiliza padrões ópticos para visualizar variações no índice de refração do fluido, diretamente relacionadas aos gradientes de densidade e temperatura e posteriormente velocidade. A técnica BOS destaca-se pela simplicidade operacional e alta precisão, empregando imagens digitais para determinar campos de densidade que permitem inferir velocidades e taxas de transferência de calor.

O objetivo principal deste projeto é avaliar experimentalmente perfis de velocidade durante a convecção natural, utilizando a técnica BOS em condições controladas e geometrias simples, com foco em regimes tanto laminares quanto turbulentos. Para isso, o trabalho foi estruturado em etapas que incluíram uma revisão bibliográfica sobre o uso do método Schlieren em convecção natural definição dos componentes ópticos adequados para capturar imagens com qualidade suficiente, montagem do aparato experimental e avaliação dos resultados obtidos.

METODOLOGIA:

Revisão Bibliográfica

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica detalhada sobre a técnica Background-Oriented Schlieren (BOS), com o objetivo de orientar a escolha dos métodos experimentais e assegurar uma seleção adequada dos componentes ópticos e procedimentos analíticos. Essa revisão indicou que a técnica BOS é uma abordagem atual e eficaz para visualizar variações de densidade em fluidos, baseada na relação direta entre o índice de refração e a densidade do gás, descrita pela equação de Gladstone-Dale.

Ao contrário das técnicas ópticas tradicionais, como fotografia Schlieren ou interferometria, o método BOS utiliza um fundo com padrões detalhados e uma análise digital para detectar variações de densidade ao longo do trajeto da luz (Raffel, 2015). Conforme descrito por L. Venkatakrishnan (2004), essa técnica combina facilidade experimental com métodos digitais robustos, resultando em alta precisão e utilidade para diversas aplicações,

incluindo estudos de plumas térmicas e ondas de choque. O princípio básico da técnica consiste em comparar uma imagem inicial de referência, obtida antes do aparecimento das variações de densidade, com uma imagem alterada obtida durante o experimento.

De acordo com Richard e Raffel (2001), os deslocamentos observados no padrão de fundo são analisados por algoritmos digitais específicos, permitindo determinar com precisão os gradientes de densidade no fluido estudado. Essa metodologia já foi empregada em diferentes contextos, como na análise de vórtices em rotores de helicópteros e fenômenos envolvendo fluidos compressíveis, como detalhado por Raffel (2007) e outros especialistas. O esquema da Figura 1 ilustra de forma simplificada como é o aparato experimental típico do método Schlieren.

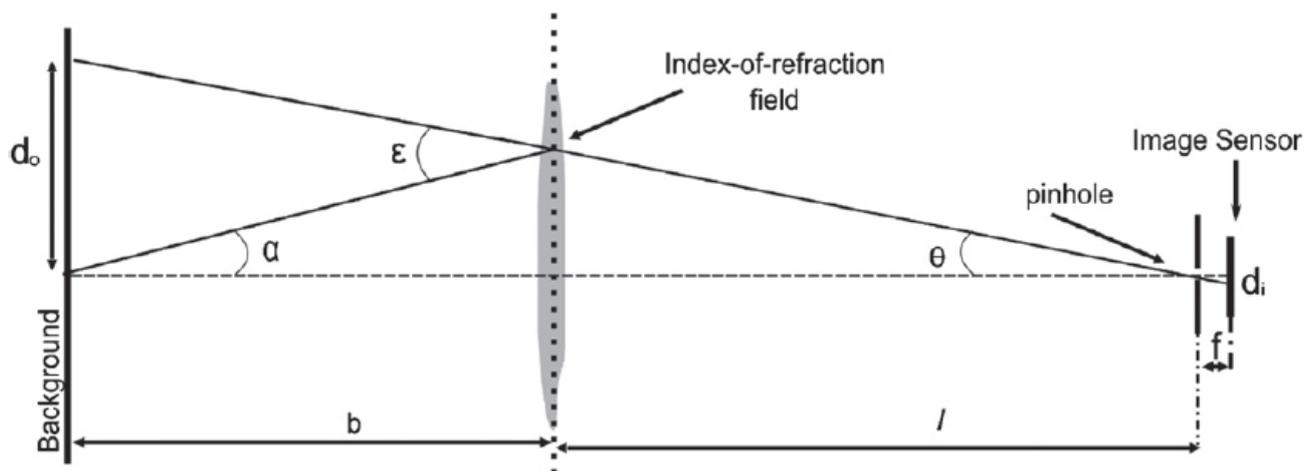


Figura 1 – Aparato Experimental típico utilizado para a técnica BOS

A Figura 1 mostra o caminho da luz que vem do plano de fundo “background” deve sofrer refração devido ao meio com gradientes de densidade, e posteriormente deve ser observada pelo sensor de imagem “image sensor”. Utilizando algoritmos computacionais podemos obter diversas conclusões sobre o de gradientes de densidade do fluido e conseqüentemente os campos de velocidade e temperatura.

Montagem do Aparato Experimental

Com base nesses estudos, foi definida a configuração experimental adotada neste projeto. O aparato experimental consiste em um bloco de alumínio com uma furação específica. Veja na Figura 2 abaixo.



Figura 2 - Bloco de Alumínio

Os 5 furos da lateral esquerda têm o objetivo de receberem os termopares que serão detalhados mais a frente, já os 3 furos na face da frente da imagem (no aparato montado será a face traseira) tem o objetivo de realizar a fixação do bloco no suporte. Finalmente os 2 furos com diâmetro maior na face superior do bloco tem o objetivo de receberem as resistências. Esses furos ficaram ligeiramente maiores do que o diâmetro das resistências, o que tornou necessária a aplicação de pasta térmica para reduzir a folga e otimizar a transferência de calor.

Como mencionado anteriormente o bloco será fixado sobre uma base também de alumínio, projetada para permitir ajustes no ângulo de posicionamento, possibilitando a simulação de diferentes configurações de placas planas (vertical, horizontal e inclinada). Para aquecer o bloco e gerar o gradiente térmico necessário ao estudo, serão utilizadas resistências elétricas conectadas a uma fonte elétrica.

Sobre os termopares mencionados anteriormente eles são termopares do tipo T que serão utilizados para medir a temperatura aproximada da sua superfície do bloco. No mesmo instante outro termopar posicionado externamente ao aparato é utilizado para medir a temperatura do ar não perturbado no ambiente experimental. O termopar é um sensor formado pela junção de dois metais diferentes que gera uma diferença de potencial (ddp) proporcional à temperatura no ponto de medição, de acordo com Incropera e DeWitt (2003). Essa ddp é então medida e convertida em valor de temperatura por meio da conexão do termopar a um microcontrolador Arduino, utilizando um código desenvolvido especificamente para realizar essa conversão (SparkFun, 2020).

Em relação ao tratamento superficial do bloco, inicialmente foi realizado um lixamento para melhorar a aderência da tinta e realizada uma pintura com tinta preta em spray. Essa pintura visa reduzir os efeitos de irradiação e reflexão da superfície, garantindo resultados confiáveis para o experimento.

Procedimento Experimental e Obtenção das Imagens

Para obtenção das imagens experimentais, será utilizada uma câmera Canon R10. A câmera será posicionada de modo que a luz proveniente do plano de fundo atravesse o gradiente em estudo com seus raios ortogonais ao bloco, permitindo a visualização da camada limite. A figura abaixo ilustra o aparato experimental, onde pode ser visto o bloco de alumínio com as resistências instaladas, os termopares conectados ao Arduino, e a fonte para fornecer energia para as resistências.

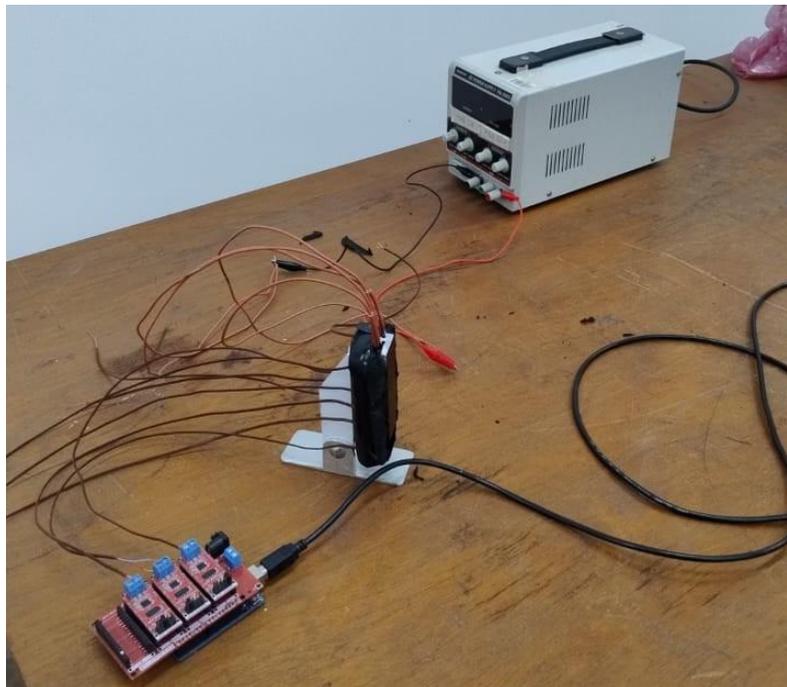


Figura 3 - Aparato Experimental Completo

Os dados obtidos por esses sensores serão utilizados juntamente com o aplicativo combOS para MATLAB, que processará as imagens e permitirá a análise quantitativa dos resultados experimentais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes da realização dos experimentos no laboratório, foi conduzida uma etapa preliminar em ambiente doméstico. Essa iniciativa visou validar na prática a simplicidade operacional do método, conforme destacado na literatura (Raffel, 2015), e construir uma base prática para os experimentos em condições controladas.

Para essa fase inicial, foram utilizados como referência um vídeo tutorial disponível no YouTube (*Background Oriented Schlieren with combOS*) e o aplicativo combOS para MATLAB. A partir dessas orientações, foi configurado um padrão de fundo apropriado e realizadas aquisições de imagens com uma vela de parafina

como fonte de calor. A captura e o processamento dessas imagens permitiram uma visualização preliminar dos gradientes de densidade e temperatura gerados pela convecção natural do ar ao redor da vela. Os resultados obtidos foram satisfatórios, comprovando a eficácia e viabilidade do método. As imagens 1, 2, 3 e 4 abaixo evidenciam isso.



Imagem 1 - Imagem de Referência

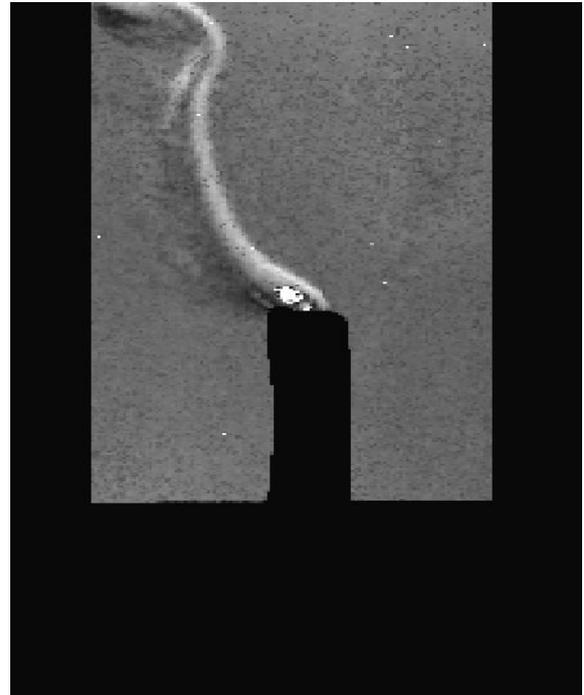


Imagem 2 - Imagem Tratada Sinuosa

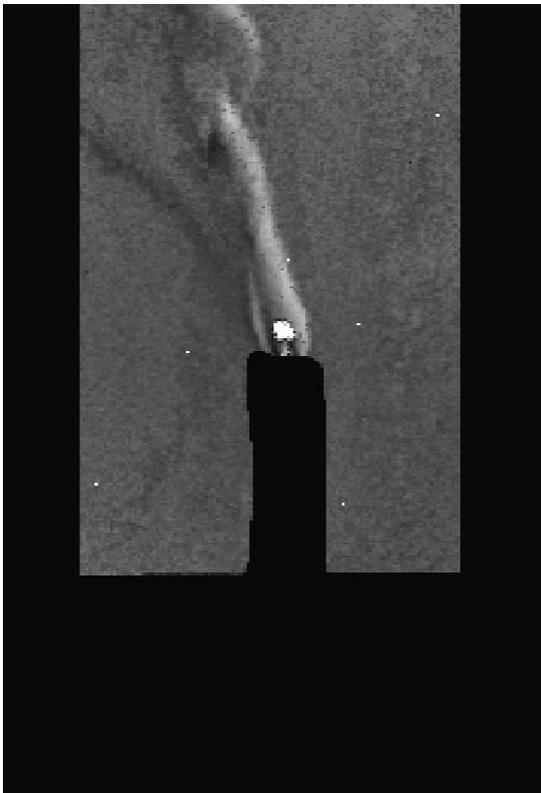


Imagem 3 - Imagem Tratada Comportada

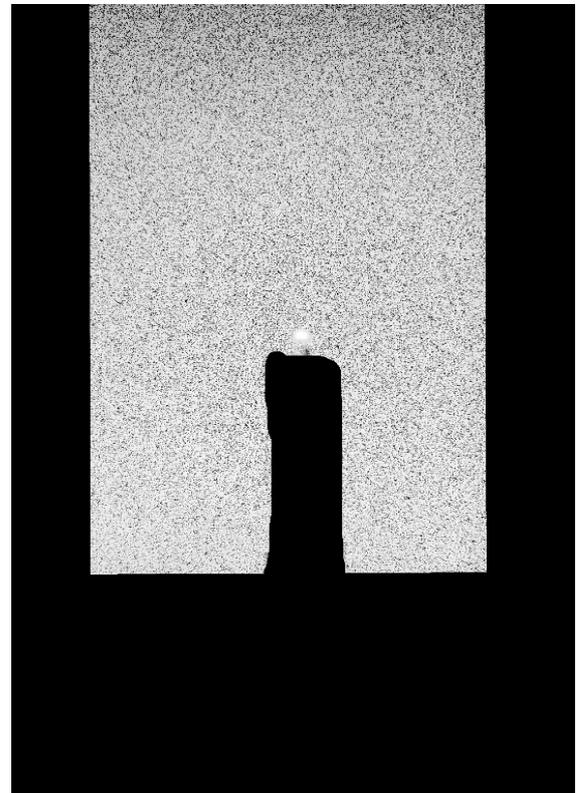


Imagem 4 - Máscara de Filmagem

As imagens obtidas evidenciaram padrões claros de contraste associados às variações do índice de refração no fluido. A imagem de referência capturou a configuração inicial sem perturbações térmicas, enquanto

as imagens tratadas revelaram os gradientes térmicos e os padrões de convecção ascendente gerados pela chama. Na imagem 2 é possível perceber instabilidades, que podem ser naturais, resultantes do próprio mecanismo convectivo e da transição do regime laminar para turbulento, ou induzidas por perturbações externas, como correntes de ar no ambiente, vibrações mecânicas ou pequenas variações na fonte térmica. Tais fenômenos geram padrões oscilatórios e vórtices que tornam o fluxo visivelmente irregular, como evidenciado pelas distorções no campo óptico capturado na técnica Schlieren. Já a imagem 3 mostra padrões mais lineares e estáveis, sugerindo a transição para um regime de convecção mais laminar.

A aplicação de uma máscara de filmagem contribuiu para otimizar o processamento das imagens, ao restringir a área de interesse e reduzir o tempo computacional necessário. Mesmo com um aparato rudimentar, os resultados preliminares obtidos em ambiente doméstico reforçam a eficácia e acessibilidade do método BOS, demonstrando seu potencial para estudos de convecção natural e incentivando sua aplicação em diferentes contextos experimentais.

Com a viabilidade do método confirmada pelos ensaios preliminares, a etapa atual da pesquisa concentra-se na execução dos experimentos formais em laboratório. Neste momento, os ensaios com o aparato instrumental descrito estão em andamento e os dados coletados passam por análise para a caracterização quantitativa dos perfis de velocidade e temperatura.

BIBLIOGRAFIA

1. INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
 2. SPARKFUN. Thermocouple tutorial. 2020. Disponível em: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/thermocouple>. Acesso em: 18 jun. 2025.
 3. RAFFEL, M. Background-oriented schlieren (BOS) techniques. *Experiments in Fluids*, v. 56, n. 60, p. 1–17, 2015.
 4. PROJECT SPINEL. *Background Oriented Schlieren with comBOS*. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=um57oXjzwUA>. Acesso em: 14 jan. 2025.
 5. VENKATAKRISHNAN, L.; MEIER, G. E. A. Density measurements using the background oriented schlieren technique. *Experiments in Fluids*, v. 37, n. 2, p. 237–247, 2004. DOI: 10.1007/s00348-004-0807-4.
 6. RICHARD, H.; RAFFEL, M. Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method. *Measurement Science and Technology*, v. 12, p. 1576–1585, 2001. DOI: 10.1088/0957-0233/12/9/325.
 7. MEIER, G. E. A. Computerized background-oriented schlieren. *Experiments in Fluids*, v. 33, n. 1, p. 181–187, 2002. DOI: 10.1007/s00348-002-0450-7
 8. BICHAL, A.; THUROW, B. S. On the application of background-oriented schlieren for wavefront sensing. *Measurement Science and Technology*, v. 25, n. 1, p. 015001, 2014. DOI: 10.1088/0957-0233/25/1/015001.
 9. INDLER, K.; GOLDHAHN, E.; LEOPOLD, F.; RAFFEL, M. Recent developments in background oriented schlieren methods for rotor blade tip vortex measurements. *Experiments in Fluids*, v. 43, n. 2, p. 233–240, 2007. DOI: 10.1007/s00348-007-0328-9
- Bertrand Mercier (2025). comBOS (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/111430-combos>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved January 14, 2025.