Avaliação de perfil de velocidade durante processos de solidificação de PCM utilizando a técnica de velocimetria por filtros espaciais

Palavras-Chave: PCM, convecção natural, SFV, armazenamento térmico, solidificação

Autora: Júlia Jorge Ferrari – FEM – UNICAMP

Orientador: Prof. Dr. Fabio Toshio Kanizawa – FEM – UNICAMP

INTRODUÇÃO

A transição energética rumo a fontes sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas mais eficientes de armazenamento térmico, especialmente aqueles voltados à conversão de energia solar em eletricidade. Dentre as alternativas promissoras para esse cenário, destacam-se os sistemas que utilizam materiais de mudança de fase (Phase Change Materials – PCMs), [1]devido à sua elevada densidade energética e à capacidade de operar com reduzidas variações de temperatura durante os processos de carga e descarga térmica.

Dentre os diversos PCMs estudados, a parafina apresenta-se como uma escolha atrativa devido ao seu calor latente elevado, estabilidade química, baixo custo, baixa toxicidade e inflamabilidade controlada. No entanto, sua baixa condutividade térmica limita o desempenho térmico em aplicações de troca de calor. Durante os processos de solidificação, especialmente em geometrias reais como tubos horizontais, a convecção natural no interior do fluido líquido pode desempenhar papel crucial na evolução da frente de solidificação, impactando diretamente a taxa de troca térmica. Apesar disso, a compreensão desses fenômenos ainda é limitada, especialmente do ponto de vista experimental.

Grande parte dos trabalhos disponíveis na literatura concentram-se em modelagens numéricas ou em estudos simplificados. A ausência de dados experimentais confiáveis sobre o comportamento do escoamento interno durante a solidificação dificulta a validação de modelos e o dimensionamento otimizado de sistemas térmicos. Nesse contexto, técnicas ópticas não intrusivas de medição de velocidade vêm ganhando destaque, entre elas a *Spacial Filter Velocimetry (SFV)*[2], que oferece uma alternativa promissora por permitir a medição de campos de velocidade com boa resolução temporal e espacial, mesmo com concentrações baixas de partículas traçadoras.

A SFV tem se mostrado especialmente interessante por combinar a precisão de técnicas como a *Laser Doppler Anemometry (LDA)* com a flexibilidade de pós-processamento de imagens *do Particle Image Velocimetry (PIV)*. Além disso, sua implementação experimental demanda menor complexidade óptica, tornando-a uma técnica acessível e robusta para estudos laboratoriais[3]. Com base nesses pontos, o presente projeto tem como objetivo realizar a avaliação experimental do perfil de velocidades da parafina durante o processo de convecção natural ao redor de um tubo horizontal, utilizando a técnica de SFV como ferramenta central de investigação.

[1] Alva, Lin, Fang, 2018.
[2] Hosokawa e Tomiyama, 2012, Rocha et al., 2019, 2023
[3] Rocha, Kanizawa, Hayashi, Hosokawa, Tomiyama, Ribatski, 2019.

METODOLOGIA

MONTAGEM EXPERIMENTAL

O aparato experimental está sendo desenvolvido com base em estudos anteriores do grupo de pesquisa e será composto por uma seção de testes contendo um tubo horizontal de cobre com 22 mm de diâmetro externo, posicionado no interior de um tubo cilíndrico de acrílico. A região anular entre os tubos será preenchida com água líquida visando simular as condições de transferência de calor por convecção natural da parafina líquida em condições mais simplificadas. Para garantir melhor isolamento térmico e viabilidade óptica, será utilizado um segundo tubo externo de acrílico.

O tubo de cobre será conectado a um sistema hidráulico com controle de temperatura, capaz de alternar entre fluidos quentes e frios por meio de válvulas de três vias. Inicialmente, será imposta o escoamento de água no circuito para homogeneização da temperatura do sistema e estabelecimento da condição inicial do ensaio. Em seguida, o sistema trocará para fluxo de água a temperatura inferior, iniciando assim a solidificação da parafina a partir da interface com o tubo de cobre.

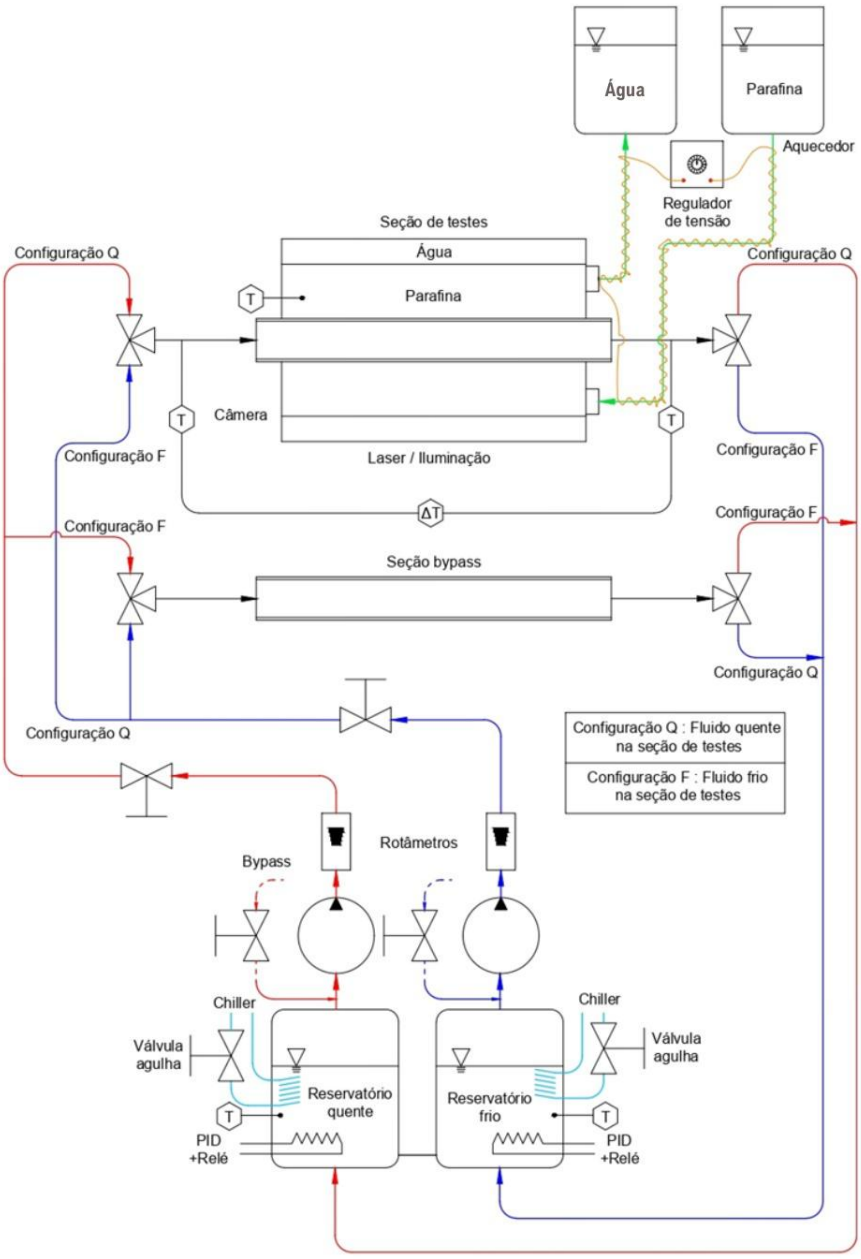

Imagem 1: circuito de teste

Fonte: César Bezerra Diniz Filho

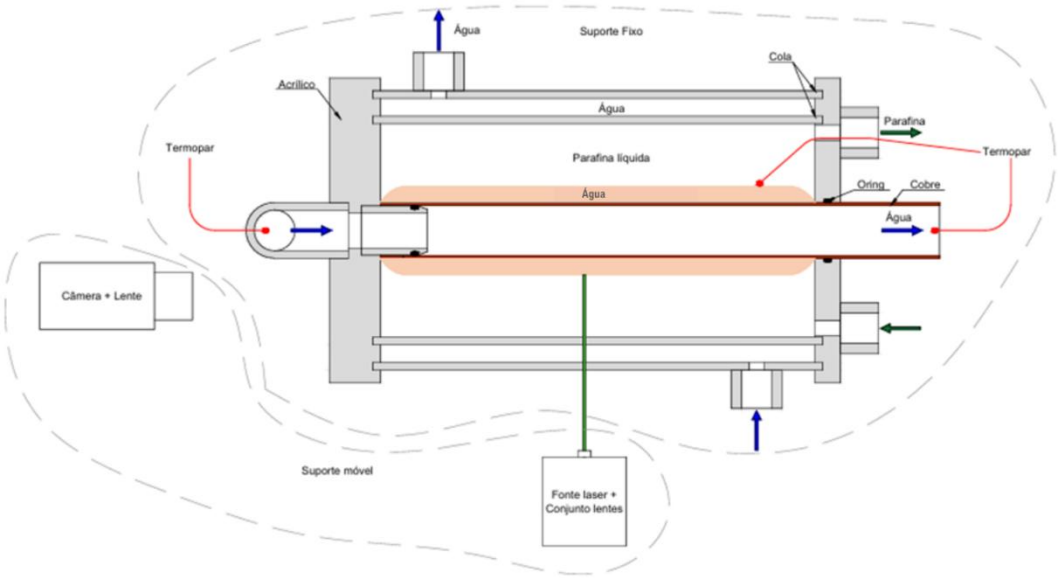

Imagem 2: seção de testes

Fonte: César Bezerra Diniz Filho

AQUISIÇÃO DE DADOS

Durante os ensaios, partículas traçadoras (diâmetro médio de 12 μm, densidade de ~900 kg/m³) serão homogeneamente dispersas na parafina líquida. A iluminação será feita por um laser de 532 nm com potência nominal de 200 mW, acoplado a uma lente Powell de 15°, formando uma lâmina de luz que atravessa o domínio de observação. A captura das imagens será realizada por uma câmera digital Canon EOS R10 equipada com lente macro.

ANÁLISE POR SFV

O pós-processamento das imagens obtidas durante o experimento será por meio da técnica de velocimetria por filtros espaciais (SFV) implementada em linguagem C, utilizando a biblioteca openCV. O método consiste em aplicar filtros espaciais sobre sequências de imagens em regiões discretizadas, extraindo-se frequência dominante da oscilação de intensidade de pixels. Essa frequência, associada ao deslocamento das partículas traçadoras, é convertida em componente de velocidade local.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a aplicação da técnica de Velocimetria por Filtros Espaciais (SFV), espera-se obter perfis de velocidade detalhados que representem o escoamento gerado por convecção natural no interior de um reservatório térmico ao redor de um tubo horizontal de cobre. A imposição de um gradiente térmico a partir da superfície do tubo deve induzir movimentos convectivos do fluido de trabalho.

Até o momento da submissão deste resumo, os experimentos ainda não foram iniciados, em função da necessidade de substituição do tubo de acrílico da seção de testes, que sofreu fratura durante a fase de limpeza. Esse contratempo resultou em um atraso no cronograma experimental. No entanto, os ensaios estão previstos para serem executados dentro do período de vigência da bolsa, com o aparato já em fase final de preparação.

BIBLIOGRAFIA

ALVA, Guruprasad; LIN, Yaxue; FANG, Guiyin. **An overview of thermal energy storage systems**. Energy, v. 144, p. 341-378, 2018.

HOSOKAWA, Shigeo; TOMIYAMA, Akio. **Spatial filter velocimetry based on time-series particle images**. Experiments in Fluids, v. 52, p. 1361-1372, 2012.

ROCHA, Douglas Martins; KANIZAWA, Fabio Toshio; HAYASHI, Kosuke; HOSOKAWA, Shigeo; TOMIYAMA, Akio; RIBATSKI, Gherhardt. **Characterization of velocity field external to tube bundle using spatial filter velocimetry based on variable meshing scheme.** International Journal of Multiphase Flow, 2019.

ROCHA, Douglas Martins; KANIZAWA, Fabio Toshio; TOMIYAMA, Akio; RIBATSKI, Gherhardt. **Velocity field characterization of single-phase flows across a tube bundle through spatial filter velocimetry.** International Journal of Multiphase Flow, 2023.

DINIZ FILHO, Cesar Bezerra**. Imagem 1: circuito de teste.** 2024. Esquema.

DINIZ FILHO, Cesar Bezerra**. Imagem 2: seção de testes.** 2024. Esquema.