

PARÂMETROS DE IMAGEM NA MEDIÇÃO DO CAMPO DE TEMPERATURA DE LÍQUIDOS POR FLUORESCÊNCIA INDUZIDA POR LASER

Arthur Vieira da Silva Oliveira, avs.oliveira@usp.br¹

Débora Carneiro Moreira, dcmoreira@usp.br¹

Alexandre Labergue, alexandre.labergue@univ-lorraine.fr²

Michel Gradeck, michel.gradeck@univ-lorraine.fr²

Luben Cabezas Gómez, lubencg@sc.usp.br¹

¹Heat Transfer Research Group – HTRG, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), Av. Trabalhador São-Carlense, 400, Parque Arnold Schmidt, CEP:13566-590, São Carlos, Brasil

²Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, Nancy F-54000, França

A medição de campos de temperatura em fluidos é fundamental para uma compreensão mais detalhada de processos de transferência de calor como convecção, ebulição ou impacto de gotas. Poucas técnicas não-intrusivas permitem tal medição e entre elas está a fluorescência induzida por laser (laser-induced fluorescence – LIF – em inglês). No caso da LIF de duas cores, utiliza-se duas imagens em diferentes bandas espectrais e calcula-se a razão de intensidades entre as imagens para estimar a temperatura do fluido em cada posição. Tal procedimento permite excluir efeitos indesejáveis de parâmetros como intensidade local do laser, concentração do corante e arranjo óptico. Neste artigo, analisamos através de simulação como alguns parâmetros de imagem podem afetar a qualidade e a precisão da medição do campo de temperatura por LIF em um volume líquido. Dentre os parâmetros analisados, estão a resolução das imagens, ruído de medição e alinhamento das imagens a diferentes bandas espectrais. Este estudo permitirá escolher as câmeras e splitters ópticos e conhecer as incertezas de medição da LIF para um projeto em andamento no qual quatro técnicas ópticas diferentes serão utilizadas simultaneamente para a caracterização completa do resfriamento de parede pelo impacto de gotas e sprays.

Palavras-chave: LIF, Imageamento, Spray, Gotas

1. INTRODUÇÃO

A medição de propriedades de fluidos e sólidos é fundamental para a caracterização de processos térmicos e hidrodinâmicos. No caso da medição de temperatura, o uso de sensores como termopares ou termoresistores é a solução mais comumente encontrada na literatura e na indústria. Os motivos são claros: fácil utilização, fácil instalação e baixo custo. Em contrapartida, a inserção de sensores no meio a ser medido pode afetar o fenômeno físico e perturbar a medição do ponto desejado (Attia *et al.*, 2000; Moffat, 1988). Ademais, estes sensores oferecem uma medição localizada da propriedade, o que dificulta a realização de análises espaciais e, portanto, mais completas do processo em estudo.

Neste caso, técnicas ópticas se sobressaem. Não somente tais técnicas são não-invasivas – ou, ao menos, pouco invasivas – mas também permitem medições médias ou espaciais da temperatura em fluidos. É o caso da Fluorescência Induzida por Laser (Lemoine and Castanet, 2013), também chamada de LIF (*Laser-Induced Fluorescence*), que tem sido aplicada na medição da temperatura média de gotas (Oliveira *et al.*, 2020; Labergue *et al.*, 2017) e no imageamento de campos de temperaturas (Voulgaropoulos *et al.*, 2022; Castanet *et al.*, 2020; Moussa *et al.*, 2020). Mesmo processos envolvendo mudança de fase dentro do volume de coleta podem ser caracterizados por LIF, como o trabalho feito por Stiti *et al.* (2020) durante a solidificação de uma gota d'água.

Para o imageamento do campos de temperatura em líquidos usando LIF, é importante escolher corretamente o arranjo e equipamentos ópticos a serem utilizados de forma a assegurar a obtenção de imagens bem resolvidas temporal e espacialmente, assim como conhecer a precisão das medidas uma vez dada a sensibilidade do sensor da câmera. Neste trabalho, foram realizadas simulações simplificadas do sinal de fluorescência vindo de um volume de fluido obtido pelo impacto de uma gota sobre outra com um campo de temperatura imposto. Parâmetros como resolução de imagem, ruído do pixel e desalinhamento entre imagens foram alterados para verificar seus efeitos sobre o campo de temperatura que seria obtido por LIF. A análise deste presente estudo encontra-se no escopo de um projeto com financiamento FAPESP sobre impacto

de gotas e sprays sobre paredes aquecidas, que inclui a construção de uma bancada experimental com diversas técnicas ópticas – LIF incluída – para a caracterização completa dos fenômenos térmicos e hidrodinâmicos antes, durante e após o impacto destas gotas.

2. FLUORESCÊNCIA INDUZIDA POR LASER

Fluorescência é um processo de emissão espontânea de um fóton (normalmente no espectro da luz visível) pela desexcitação de uma molécula que se encontrava em um estado eletrônico excitado. No caso da LIF, a excitação desta molécula se dá pela absorção de um fóton proveniente de um feixe laser. A emissão pela fluorescência normalmente ocorre desviada para o vermelho; isto é, os fótons emitidos por fluorescência possuem menor energia do que os fótons que promoveram a excitação da molécula. Isto ocorre pois há outras formas de dissipação da energia além da fluorescência durante a desexcitação, como conversões internas, *quenching* e fosforescência. A fluorescência é um fenômeno quase imediato após a absorção, pois sua duração é na ordem dos nanossegundos, enquanto a fosforescência pode durar microsegundos ou alguns minutos (Chaze, 2017). Alguns componentes específicos, muitos deles orgânicos, são fluorescentes no espectro visível, como a sulforodamina B e a fluoresceína dissódica. Assim, para medir a temperatura de um fluido de trabalho, digamos a água, é comum adicionar uma quantidade muito pequena de um corante fluorescente no fluido de trabalho, da ordem de concentração de 10^{-6} mol/l.

Podemos modelar, de modo muito simplificado, a intensidade de luz emitida durante a fluorescência I_λ a um determinado comprimento de onda λ como:

$$I_\lambda = KCIV_c \exp(s_\lambda T) \quad (1)$$

onde K é uma constante de depende do arranjo óptico, equipamentos e da natureza do fluido, C é a concentração do corante fluorescente no fluido de trabalho, I é a intensidade do laser, V_c é o volume de coleta do sinal fluorescente, s_λ é a sensibilidade com a temperatura do corante, e T a temperatura do fluido no volume de coleta. Para eliminar parâmetros difíceis de controlar ou de determinar experimentalmente no fluido (como I , C e V_c), faz-se uma razão entre intensidades de duas bandas experimentais (digamos $\Delta\lambda_1$ e $\Delta\lambda_2$, referenciadas daqui para frente simplesmente pelos sub-índices 1 e 2). Assim, temos que:

$$R_{12} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{K_1}{K_2} \exp[(s_1 - s_2) T], \quad (2)$$

recorrendo, finalmente, a uma última razão entre razões R_{12}/R_{120} , sendo $R_{120} = R_{12}(T_0)$, sendo T_0 uma temperatura de referência. Por fim, considerando $s_{12} = s_1 - s_2$ obtemos:

$$\ln\left(\frac{R_{12}}{R_{120}}\right) = s_{12} (T - T_0), \quad (3)$$

Os valores de s_{12} e R_{120} são determinados experimentalmente durante um ensaio de calibração em ambiente controlado. Rearranjando a Eq. 3, podemos obter a expressão para medir a temperatura do fluido a partir das razões de intensidade de fluorescência:

$$T = T_0 + \frac{1}{s_{12}} \ln\left(\frac{R_{12}}{R_{120}}\right), \quad (4)$$

tendo assim apresentada, de forma sucinta e simplificada, a técnica 2cLIF (LIF de duas cores, pois usa-se duas bandas espectrais para a medição).

Para imageamento por LIF, também chamada de PLIF (*Planar LIF*), é necessário utilizar altas concentrações de corante, como fizeram Moussa *et al.* (2020), ou laser pulsado, como fizeram Castanet *et al.* (2020) e Chaze (2017), induzindo maior intensidade de fluorescência, capaz de ser identificada com câmeras. Enquanto a primeira abordagem resulta no problema da reabsorção (fluorescência em um local excitado pela luz de fluorescência de outro local) ou alta absorção do laser no início do volume de coleta (conforme a Lei de Beer-Lambert), a segunda pode causar a saturação da fluorescência; isto é, perde-se a sensibilidade da intensidade da fluorescência com a temperatura ($s_{12} \approx 0$), impedindo a aplicação da LIF. Chaze (2017) encontrou uma mistura de dois corantes (fluoresceína dissódica com $s_1 = 3,17\%/^\circ\text{C}$ e sulforodamina 640 com $s_2 = 0,1\%/^\circ\text{C}$ usando as bandas espectrais propostas por Castanet *et al.* (2020), obtendo $s_{12} = 3.07\%/^\circ\text{C}$) que permite aplicar a LIF mesmo com lasers pulsados de altíssima energia de pulso.

3. CRIAÇÃO DA IMAGEM LIF DE REFERÊNCIA

3.1 Impacto de uma gota sobre outra por Shadowgraphy

Como explicado na introdução deste trabalho, o foco do estudo está no impacto de gotas sobre paredes. Portanto, para a simulação dos sinais de fluorescência, utilizamos uma imagem real de uma gota impactando uma outra gota séssil. A Fig. 1 apresenta uma sequência de imagens deste processo obtida pela técnica de *Shadowgraphy*, que consiste simplesmente no imageamento do objeto utilizando uma iluminação difusa traseira. Neste ensaio, a gota impactante possui um diâmetro

de aproximadamente 3 mm e velocidade de impacto de aproximadamente 215 mm/s, encontrada rastreando a trajetória do centro da gota até o impacto, enquanto o diâmetro de calota da gota sésil é em torno de 1,9 mm. A imagem foi feita com uma câmera rápida (Phantom V2012, com lente Nikon AF-S VR Micro-Nikkor 105mm F/2.8G IF-ED, com uma distância de trabalho de 150 mm e tempo de integração de 50 μ s) com 1000 fps e resolução resultando em um tamanho de pixel de 29,6 μ m.

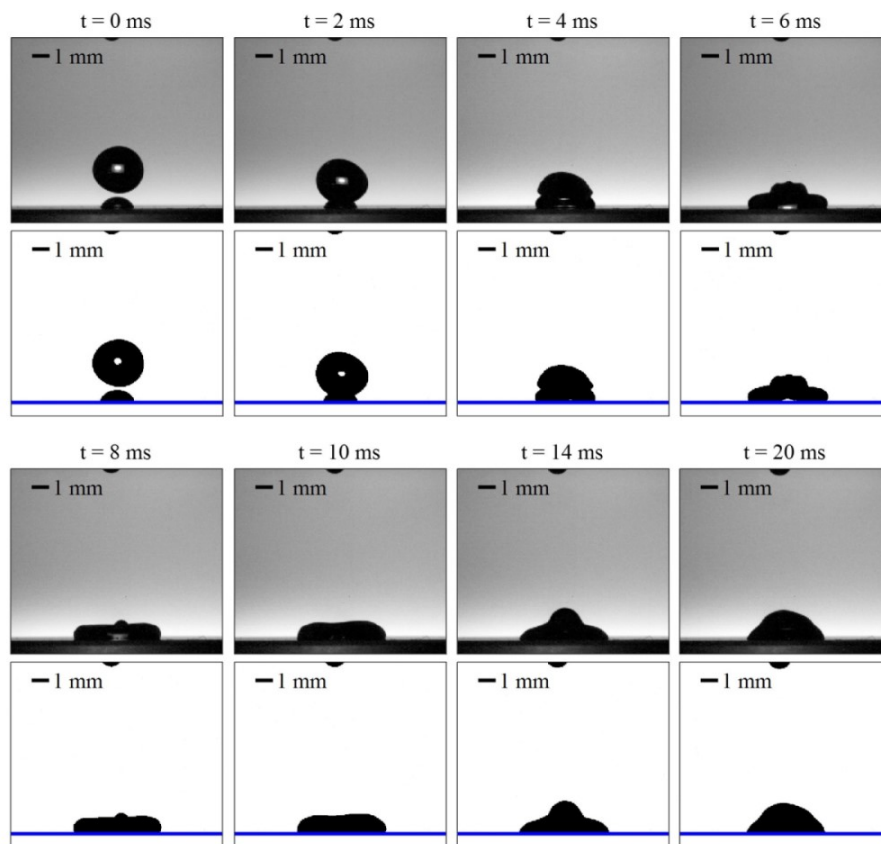


Figura 1: Imagens do impacto de uma gota sobre outra. Imagens sem tratamento são apresentadas na parte superior para cada instante e, logo abaixo, imagens pós-tratamento por binarização. A linha horizontal azul representa a superfície sólida.

Para cada instante na Fig. 1, é apresentada a imagem "crua", logo sem nenhum tipo de tratamento, e, abaixo dela, a imagem tratada. Mais precisamente, o tratamento de imagem consistiu em: 1) normalizar a intensidade luminosa; 2) eliminação do fundo retirando a intensidade luminosa sem nenhuma gota presente; 3) detecção do plano contendo a superfície sólida; 4) eliminação do ruído de cada imagem; e 5) binarização da imagem. A imagem tratada permite ver nitidamente o processo de impacto, coalescência, espalhamento, contração, e oscilação após deposição. Para a análise das imagens por PLIF, foi escolhido o quadro pós-tratamento obtido a 14 ms (Fig. 1).

3.2 Criação do campo de temperatura e imagens de bandas

Uma vez determinada a imagem a ser utilizada para o estudo (Fig. 2a), a mesma passou por algumas modificações antes de criar um campo de temperatura hipotético no volume líquido, que seria o valor real a ser medido com a PLIF. Primeiro, fizemos um corte na imagem selecionando a região da gota (Fig. 2b), de forma a descartar pixels de fundo desnecessários. Em seguida, aumentamos a resolução da imagem por repetição de intensidade do pixel dividido em 64 partes, passamos um filtro convolutivo uniforme de tamanho 5x5 pixels por vinte vezes e binarizamos novamente a imagem. Este procedimento permitiu suavizar as bordas da gota e aumentar efetivamente a resolução da imagem, apesar de ter afetado discretamente a forma da gota medida experimentalmente (Fig. 2c). Após, um campo de temperatura foi aplicado nesta imagem de gota em alta resolução onde o centro da calota esférica da gota em contato com a parede está a 80 °C e a temperatura decresce radialmente com um gradiente de 20 °C/mm (Fig. 2d). Enfim, as intensidades de fluorescência de cada corante foi estimada (Fig. 2e para a fluoresceína dissódica e Fig. 2f para a sulforodamina 640) usando a expressão abaixo para cada corante i :

$$I_i = I_{0,i} \exp [s_i (T - T_0)] \quad (5)$$

onde I_0 é a intensidade da fluorescência na temperatura de referência $T_0 = 20$ °C (valor arbitrariamente escolhido para este estudo). Por simplicidade, adotou-se $I_0 = 1$ para ambos os corantes. Note que esta expressão teoricamente permite medir a temperatura do fluido com apenas um corante; entretanto, a condição dos experimentos pode ser significativamente

diferente da de referência (por exemplo, intensidade do laser ou concentração local do corante no fluido de trabalho). Por este motivo, usa-se a 2cLIF (Eq. 4).

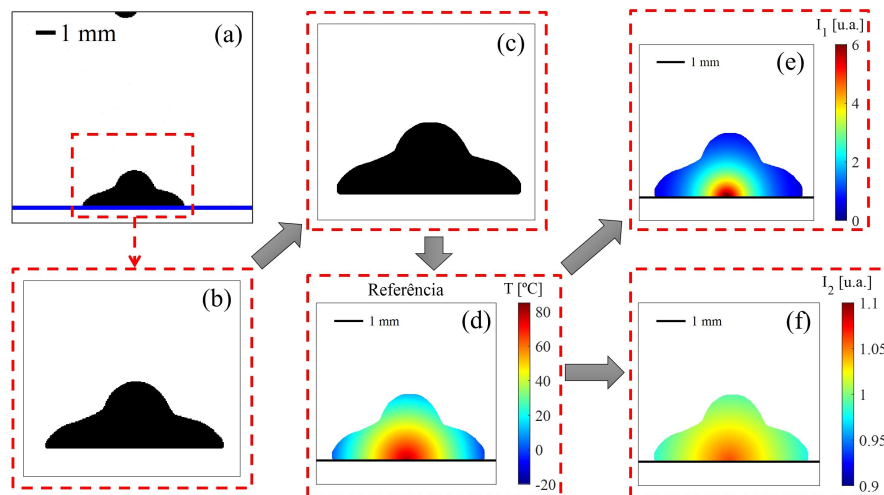


Figura 2: **Processo de preparação da imagem de referência LIF para o presente estudo:** a) imagem obtida experimentalmente; b) zoom próximo à gota; c) aumento da resolução (8x) e suavização das bordas; d) imposição de um campo de temperatura; e) simulação da imagem de intensidade de fluorescência obtida com a fluoresceína dissódica; f) simulação da imagem de intensidade de fluorescência obtida com a sulforodamina 640.

Ou seja, as Fig. 2e e f representam o resultado experimental por 2cLIF que poderíamos considerar como "ideal": altíssima resolução de imagem, sem ruídos de medição, e com alinhamento perfeito entre as imagens das duas bandas espectrais para cálculo da razão R_{12}/R_{120} . Porém, nenhuma destas características citadas é facilmente obtida experimentalmente, podendo mesmo ser impossível de se conseguir (por exemplo, medição isenta de ruídos). Por este motivo, analisamos neste artigo como cada um destes efeitos afeta a medição do campo de temperatura no líquido pela técnica de 2cLIF.

4. EFEITOS DOS PARÂMETROS DE IMAGEAMENTO SOBRE A LIF

O primeiro parâmetro avaliado foi o efeito da resolução da imagem ou, dito de outro modo, do tamanho do pixel. A imagem de referência de altíssima resolução tem pixels cujo tamanho é $3,7 \mu\text{m}$, o que resulta em uma razão de $D/Px = 810$ entre o diâmetro da gota impactante D e o tamanho do pixel Px . A Fig. 3 mostra como a redução da resolução da imagem (ou o aumento do tamanho do pixel) afeta a qualidade da medição do campo de temperatura. Podemos notar que mesmo para um tamanho de pixel significativamente maior, como no caso com $59,1 \mu\text{m}$ ($D/Px = 51$), a qualidade da imagem ainda é satisfatória, apesar de perda de qualidade da imagem nas bordas começar a ser notável. Entretanto, a análise quantitativa do campo de temperatura não aparenta ser degradada. Este não é o caso quando o tamanho de pixel é muito maior ($Px = 236,6 \mu\text{m}$, resultando numa razão $D/Px = 13$), no qual a qualidade da imagem é bastante inferior, já que a resolução afeta até mesmo a definição da interface líquido/ar. Por este motivo, considerando uma câmera com uma dada resolução, é essencial otimizar o campo de visão da imagem de forma a ter o menor tamanho de pixel possível sem perder partes da visualização do fenômeno nas bordas. Na bancada experimental que será construída, foi escolhida uma câmera rápida para a PLIF e campos de visão que permitirão ter tamanhos de pixel entre 12 e $25 \mu\text{m}$, o que permitirá medir campos de temperatura com ótima resolução para gotas com 1 mm de diâmetro ou mesmo $500 \mu\text{m}$ no caso da melhor resolução.

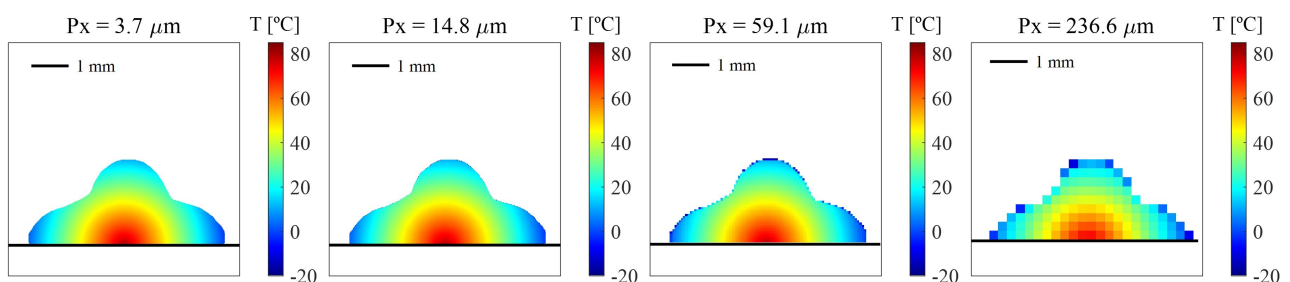


Figura 3: **Efeito da resolução da imagem sobre a medição do campo de temperatura.**

Como é de se esperar de qualquer instrumento ou técnica de medição, ruídos estarão presentes na captação da intensidade luminosa de fluorescência. Nesta análise, usamos como referência a imagem obtida com tamanho de pixel de $14,8$

μm , pois esta se aproxima do caso experimental esperado. Para simular tais ruídos, aplicamos um ruído branco (i.i.d. – independente e identicamente distribuído) em cada pixel de intensidade de fluorescência. Isto é feito escolhendo aleatoriamente um valor ϵ para o ruído adicionado à intensidade do pixel a partir de uma distribuição Gaussiana com média nula e desvio padrão σ_r . Ou seja, o ruído aumentará ou diminuirá a intensidade da fluorescência de referência no pixel de forma aleatória mas mais próxima ao valor real repetindo uma distribuição normal. Para o presente estudo, testamos casos de ruídos cujo desvio padrão da distribuição era 2%, 5% e 10% da intensidade I_0 de fluorescência na temperatura de referência. Nota-se o efeito do ruído na qualidade da imagem na Fig. 4, principalmente no caso com $\sigma_r = 10\%I_0$. Apesar dos outros resultados com ruídos menores parecerem ser bastante satisfatórios, os erros locais de medição de temperatura podem ser significativos, como mostra a Fig. 5. Para o ruído a 2% de I_0 , os erros de medição são de $\pm 1,5^\circ\text{C}$; para $\sigma_r = 5\%I_0$ temos erros de $\pm 4^\circ\text{C}$; e para $\sigma_r = 10\%I_0$ os erros podem chegar a $\pm 9^\circ\text{C}$. Isto demonstra a importância absoluta da sensibilidade do sensor da câmera, de forma a converter o máximo possível de fótons em sinal digital e aumentar a razão sinal-ruído, aumentando, assim, a precisão da PLIF na medição do campo de temperatura. Por outro lado, utilizar um filtro convolutivo na imagem pode ajudar bastante a reduzir o ruído de medição do campo de temperatura. Porém, o uso de filtro pode sempre esconder transientes e gradientes significativos; logo, deve-se ter cautela no seu uso.

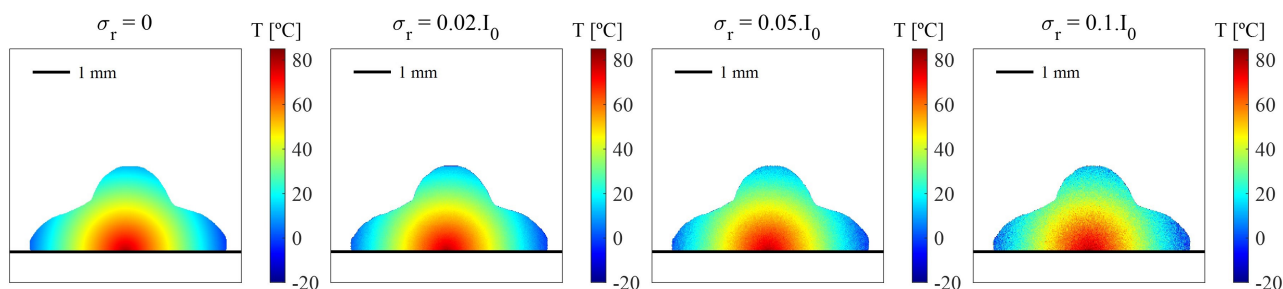


Figura 4: Efeito do ruído de medição sobre a medição do campo de temperatura.

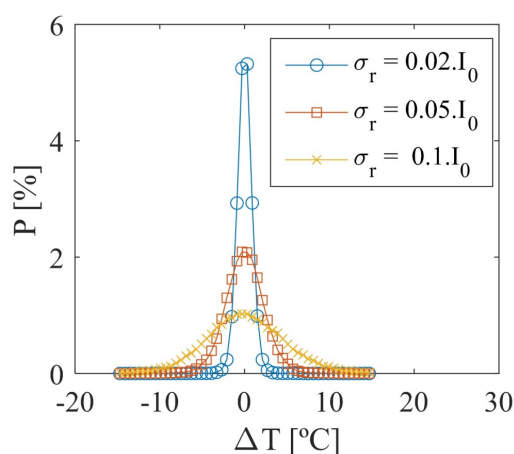


Figura 5: Distribuição do erro da medição de temperatura para cada nível de ruído de medição.

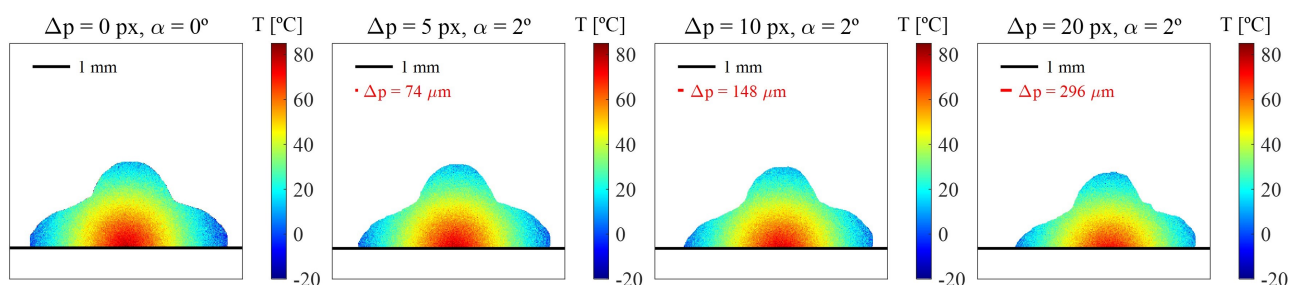


Figura 6: Efeito do desalinhamento das imagens das duas bandas espectrais sobre a medição do campo de temperatura.

Por fim, analisamos o impacto do desalinhamento entre as duas imagens de fluorescência na medição do campo de temperatura (Fig. 6). Para isto, fixamos a imagem obtida com o sinal da fluoresceína sódica enquanto rotacionamos a imagem da sulforodamina 640 em 2° e a deslocamos para a direita a diferentes quantidades de pixels (5, 10 e 20). Valores do deslocamento em micrômetros (74, 148 e $296\ \mu\text{m}$, respectivamente) com escala também são apresentados nas figuras

para melhor comparação. Nesta análise, usamos novamente a imagem com tamanho de pixel de $14,8 \mu\text{m}$, mas com ruído de 2% da intensidade de referência – novamente buscando se aproximar de um caso experimental real. Apesar do campo de temperatura medido ser visivelmente afetado apenas no caso de maior desalinhamento (vide o caso com $\Delta p = 20$ px), há uma deformação da imagem final da gota devido à pixels com intensidade de luz medidos com um corante mas ausentes na imagem do outro corante, o que força a desprezar tais pixels no tratamento final. É importante ressaltar que tal afirmação é válida para as condições simuladas neste estudo, pois, por exemplo, uma imagem de menor resolução ou com maior ruído poderia ser afetada pelo desalinhamento de forma mais significativa do que o aqui exposto. Por este motivo, usar unicamente da LIF para a forma da gota pode ser um fator limitante – mesmo usando apenas uma banda, pois sua intensidade de luz pode ser bastante fraca. Tal cuidado será necessário durante os experimentos, mas o uso de uma outra técnica de imageamento (como o Shadowgraphy) pode auxiliar a verificar o alinhamento das imagens da PLIF e não comprometer a medição do campo de temperatura no líquido. Além disto, é possível melhorar substancialmente o alinhamento das imagens utilizando placas de pontos para calibração ótica, como fez Chaze (2017).

5. CONCLUSÕES

Apesar da técnica de PLIF ser amplamente conhecida e utilizada para a medição de campos de temperatura de fluidos, é necessário realizar um estudo paramétrico da imagem de forma a otimizar os resultados experimentais esperados. Neste trabalho, foi avaliado como a resolução da imagem, ruído de medição e alinhamento das imagens das diferentes bandas espectrais afetam a qualidade dos resultados da PLIF. Quanto à resolução, não há muita perda quantitativa ou qualitativa da medição do campo de temperatura a não ser quando a resolução é bastante grosseira a ponto de não poder nem definir o contorno da interface líquido-ar. Uma resolução mediana pode, no máximo, afetar a qualidade da medição da temperatura do fluido próxima às bordas. O ruído de medição, por sua vez, pode aparentar não afetar significativamente a análise quantitativa do campo de temperatura. Entretanto, ruídos relativamente baixos, na ordem de 2% da intensidade de referência, podem acarretar erros locais maiores do que 1°C . Ruídos maiores, como 10% da intensidade de referência, podem gerar erros de até 9°C , o que seria inaceitável para muitas investigações experimentais. Por fim, o desalinhamento entre as imagens pode comprometer um pouco a medição do campo de temperatura e, mais importante, afeta a definição da forma da gota impactando a superfície. Os problemas apresentados podem ser resolvidos: otimizando o arranjo óptico para diminuir ao máximo o tamanho do pixel; usando câmeras mais sensíveis e aplicando filtros convolutivos; utilizando uma outra técnica óptica para a definição da forma da gota, como o *Shadowgraphy*, ou placas ópticas de alinhamento de imagens.

6. FINANCIAMENTO

Este trabalho contou com o financiamento do processo nº 2021/01897-0 da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

7. REFERÊNCIAS

- Attia, M.H., Cameron, A. and Kops, L., 2000. “Distortion in Thermal Field Around Inserted Thermocouples in Experimental Interfacial Studies, Part 4: End Effect”. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, No. 1, pp. 135–145. doi:<https://doi.org/10.1115/1.1419199>.
- Castanet, G., Caballina, O., Chaze, W., Collignon, R. and Lemoine, F., 2020. “The leidenfrost transition of water droplets impinging onto a superheated surface”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 160, p. 120126. ISSN 0017-9310. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120126>.
- Chaze, W., 2017. *Transferts de chaleur et de masse lors de l'impact d'une goutte sur une paroi chaude en régime d'ébullition en film : application de diagnostics optiques et modélisation*. Ph.D. thesis. URL <http://www.theses.fr/2017L0RR0290>. Thèse de doctorat dirigée par Lemoine, Fabrice Mécanique et énergétique Université de Lorraine 2017.
- Labergue, A., Pena-Carillo, J.D., Gradeck, M. and Lemoine, F., 2017. “Combined three-color lif-pda measurements and infrared thermography applied to the study of the spray impingement on a heated surface above the leidenfrost regime”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 104, pp. 1008–1021. ISSN 0017-9310. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.029>.
- Lemoine, F. and Castanet, G., 2013. “Temperature and chemical composition of droplets by optical measurement techniques: a state-of-the-art review”. *Experiments in Fluids*, Vol. 54, p. 1572. ISSN 1432-1114. doi: <https://doi.org/10.1007/s00348-013-1572-9>.
- Moffat, R.J., 1988. “Describing the uncertainties in experimental results”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 1, No. 1, pp. 3–17. ISSN 0894-1777. doi:[https://doi.org/10.1016/0894-1777\(88\)90043-X](https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90043-X).
- Moussa, O., Tarlet, D., Massoli, P. and Bellettre, J., 2020. “Investigation on the conditions leading to the micro-explosion of emulsified fuel droplet using two colors lif method”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 116, p. 110106. ISSN 0894-1777. doi:<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110106>.
- Oliveira, A.V.S., Peña Carrillo, J.D., Labergue, A., Glantz, T. and Gradeck, M., 2020. “Experimental study of dispersed flow film boiling at sub-channel scale in LOCA conditions: Influence of the steam flow

rate and residual power”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 172, p. 115143. ISSN 1359-4311. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115143>.

Stiti, M., Castanet, G., Labergue, A. and Lemoine, F., 2020. “Icing of a droplet deposited onto a subcooled surface”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 159, p. 120116. ISSN 0017-9310. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120116>.

Voulgaropoulos, V., Aguiar, G., Markides, C. and Bucci, M., 2022. “Simultaneous laser-induced fluorescence, particle image velocimetry and infrared thermography for the investigation of the flow and heat transfer characteristics of nucleating vapour bubbles”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 187, p. 122525. ISSN 0017-9310. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122525>.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

IMAGE PARAMETERS ON THE MEASUREMENT OF THE TEMPERATURE FIELD IN LIQUIDS BY LASER-INDUCED FLUORESCENCE

Arthur Vieira da Silva Oliveira, avs.oliveira@usp.br¹

Débora Carneiro Moreira, dcmoreira@usp.br¹

Alexandre Labergue, alexandre.labergue@univ-lorraine.fr²

Michel Gradeck, michel.gradeck@univ-lorraine.fr²

Luben Cabezas Gómez, lubencg@sc.usp.br¹

¹Heat Transfer Research Group – HTRG, São Carlos School of Engineering (EESC), University of São Paulo (USP), Av.Trabalhador São-Carlense, 400, Parque Arnold Schmidt, CEP:13566-590, São Carlos, Brazil

²Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, Nancy F-54000, France

Resumo: Measuring temperature fields in fluids is critical for a more detailed understanding of heat transfer processes such as convection, boiling or droplet impact. Few non-intrusive techniques allow such measurement and, among them, is laser-induced fluorescence (LIF). In the case of two-color LIF, two images are used in different spectral bands and the ratio of intensities between the images is calculated to estimate the fluid temperature at each position. Such a procedure allows to exclude undesirable effects of parameters such as local laser intensity, dye concentration and optical arrangement. In this article, we analyze using simulation of the experiments how some imaging parameters can affect the quality and accuracy of LIF temperature field measurement in a liquid volume. Among the parameters analyzed are image resolution, measurement noise and image alignment for the different spectral bands. This study will allow choosing the cameras and optical setup, but also knowing the measurement uncertainties of the LIF for an ongoing project in which four different optical techniques will be used simultaneously for the complete characterization of wall cooling by the droplet impact and sprays.

Palavras-chave: LIF, Imaging, Spray, Droplets