



## TÉCNICAS DE TERMOGRAFIA IR APLICADAS NA ANÁLISE DE FENÔMENOS RELACIONADOS À EBULIÇÃO CONVECTIVA

Victor Eduardo Corte Baptistella<sup>1</sup>, victor.baptistella@usp.br

Mauricio Mani Marinheiro<sup>1</sup>, mauricio.marinheiro@usp.br

Douglas Martins Rocha<sup>1</sup>, douglas.rocha@usp.br

Gherhardt Ribatski<sup>1</sup>, ribatski@sc.usp.br

<sup>1</sup>Dep. de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, Brasil.

**Resumo:** A utilização de microcanais em processos de ebulição convectiva constitui-se uma estratégia promissora para dissipar elevados fluxos de calor. Entretanto, tal aplicação ainda não é amplamente difundida dado ao limitado entendimento dos mecanismos de transferência de calor que ocorrem sob tais condições. Nesse sentido, a técnica de termografia por infravermelho (IR), por fornecer dados com elevada resolução espacial e temporal, mostra-se promissora para a caracterização dos fenômenos que ocorrem durante a ebulição convectiva sob condições confinadas. Neste trabalho, discute-se as categorias de aquecedores empregados em experimentos de ebulição convectiva auxiliados por câmeras IR. Por fim, realiza-se uma comparação por meio da análise de casos entre métodos de regressão de dados disponíveis na literatura que visam elevar a acurácia dos resultados de temperatura. Conclui-se que os aquecedores baseados em filme depositado em substrato semitransparente ao IR são os mais adequados, e que o método proposto por Bucci et al. (2016) é o mais adequado para a regressão de dados do campo de temperaturas com este tipo de aquecedor.

**Palavras-chave:** ebulição convectiva, termografia infravermelho, métodos de regressão.

### 1. INTRODUÇÃO

O contínuo incremento do desempenho de dispositivos eletrônicos e a miniaturização de seus componentes resultam na geração de fluxos de calor cada vez mais elevados em diferentes tipos de aplicações. Nesse sentido, a utilização de dissipadores de calor baseados em microcanais, além de permitir uma redução do inventário de fluido refrigerante, quando associada à ebulição convectiva, permite dissipar elevados fluxos de calor. No entanto, a ebulição convectiva em condições confinadas é caracterizada pelo rápido crescimento de bolhas que induzem instabilidades no escoamento e o decréscimo na capacidade de dissipação de calor. Desta forma, torna-se relevante um melhor entendimento do fenômeno e a caracterização dos mecanismos físicos associados. Nesse sentido, a utilização de técnicas experimentais avançadas com elevada resolução espacial e temporal, e.g. termografia IR, mostra-se fundamental para uma completa caracterização da transferência de calor na superfície de microcanais. Apesar de estudos neste tema disponível na literatura (Kim et al., 2012; Bucci et al., 2016; Kossolapov et al., 2020) visando principalmente a análise de fenômenos relacionados à ebulição convectiva por meio de termografia IR, ele é ainda relativamente pouco explorado devido, principalmente, aos desafios associados à aplicação de tal técnica. As maiores dificuldade encontradas em tais estudos estão associadas às limitações do aparato utilizado e aos desafios na elaboração de métodos de calibração e redução de dados eficientes que permitam estimar a distribuição de temperatura em diferentes cenários de forma precisa e com elevada resolução espacial e temporal.

Tendo em vista os desafios encontrados na aplicação de técnicas de termografia IR, especialmente para a análise de ebulição convectiva sob condições confinadas, neste estudo são apresentadas as principais estratégias experimentais e de regressão de dados adotadas na literatura aberta para a obtenção da distribuição de temperaturas por meio da aplicação de termografia IR. Atenção especial é dada à influência das características construtivas dos aquecedores, na estratégia de obtenção de resultados de temperatura de parede dos canais e da topologia do escoamento bifásico. Além disso, uma simulação é realizada baseada em um estudo de caso, considerando um aquecedor composto de safira recoberta com *Indium Tin Oxide* (ITO), com o intuito de se avaliar o desempenho dos principais métodos de regressão e verificar a influência de condições experimentais na precisão dos resultados.

### 2. CARACTERÍSTICAS DE AQUECEDORES PARA APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA IR

Os primeiros trabalhos que empregaram câmeras IR para a obtenção da distribuição de temperaturas foram publicados na década de 1960, com foco em aplicações aeroespaciais (Astarita et al., 2000). Thomann e Frisk (1967), por exemplo, obtiveram campos de temperatura na superfície de um paraboloide. No entanto, acredita-se que a primeira publicação de resultados de temperatura obtidos a partir de câmeras IR em processos de ebulição convectiva sob a condição de



microescala ocorreu no ano 2000, com o trabalho de Hapke et al. (2000). Desde então, dezenas de trabalhos referentes ao estudo de processos de ebulição convectiva auxiliados por termografia IR foram publicados, tanto em micro quanto em macrocanais.

Nestes estudos, quatro distintas configurações de aquecedores foram empregadas, sendo elas (ver Tab. (1)): (i) tubo metálico envolto por camada preta opaca ao IR; (ii) lâmina metálica fina; (iii) dissipador metálico e (iv) filme depositado em substrato semi-transparente ao IR. Em todas estas categorias uma fonte de alimentação externa promove a passagem de corrente elétrica pelo aquecedor, o qual dissipa calor por efeito Joule e induz a ebulição do fluido de trabalho.

Observa-se que materiais não metálicos foram empregados simultaneamente como elemento de aquecimento e substrato somente nos estudos que utilizaram filmes depositados em substratos semitransparentes ao IR. Nesta categoria de aquecedores, destaca-se o uso de materiais cerâmicos como substrato, tais como a safira e o vidro borossilicato, e ITO como elemento de aquecimento. Além disso, em apenas dois estudos apresentados na Tab. (1) a parede interna do aquecedor foi utilizada como alvo de medida. Essa configuração possibilita a obtenção de campos de temperatura transientes na superfície em ebulição. Assim, pode-se analisar a dinâmica do processo de ebulição com precisão. Destaca-se que em nenhum trabalho, cujo alvo de medição era a superfície em ebulição, foram empregados microcanais. Ademais, em nenhum trabalho mais de uma superfície de aquecimento interna foi empregada.

Tabela (1). Estudos de ebulição convectiva auxiliados por filmagens IR.

Arranjo do aquecedor	Autor	Canal utilizado	Dimensão do canal	Material do aquecedor/substrato	Alvo de medição	Filmagem no visível?*
Tubo metálico envolto por camada preta opaca ao IR	Hapke et al. (2000)	Microcanal circular	1.5 mm DI e 3 mm DE	Inconel 600 /-	Parede externa	Não
	Kim et al. (2012)	Macrocanal circular	6 mm DI e 8 mm DE	Silício/-	Paredes interna e externa	Não
Lâmina metálica fina	Schweizer et al. (2010)	Microcanal retangular	0.5 mm x 2 mm	Aço inoxidável/cobre	Parede externa	Sim
	Scheiff et al. (2021)	Macrocanal anular	8.1 mm DI e 34 mm DE	Aço inoxidável/-	Parede externa	Sim
Dissipadores metálicos	Hetsroni et al. (2002)	Microcanais triangulares	21 canais - 130 µm DH	-/Silício	Base do dissipador	Sim
	Szczukiewicz et al. (2013)	Microcanais retangulares	67 canais -100 µm x 100 µm	Alumínio/silício	Base do dissipador	Não
Filme depositado em substrato semi-transparente ao IR	Barber et al. (2009)	Microcanal retangular	0.4 mm x 4 mm	Tântalo/vidro borossilicato	Parede externa	Sim
	Korniliou et al. (2019)	Microcanal retangular	2.26 mm x 0.1 mm	ITO/vidro	Parede externa	Sim
	Kossolapov et al. (2020)	Macrocanal retangular	30 mm x 10 mm	ITO/safira	Parede interna	Sim

\*Indica se câmeras de vídeo foram utilizadas concomitantemente para adquirir imagens do escoamento na região do visível do espectro eletromagnético.

## 2.1. Tubo metálico envolto por camada preta opaca ao IR

Os aquecedores baseados em tubos metálicos envoltos por camada preta opaca ao infravermelho apresentam características construtivas simples. O aquecedor é composto apenas por um tubo metálico ao qual é depositada uma fina camada de tinta preta. Como os materiais metálicos são bons condutores elétricos, a conexão com a fonte de alimentação é feita diretamente na superfície externa do tubo, o qual dissipa calor por efeito Joule.

A deposição de tinta preta justifica-se, pois é uma maneira de caracterizar a emissividade superficial do aquecedor. Este parâmetro é fundamental na conversão de dados brutos oriundos de câmeras IR em resultados de temperatura. Ademais, este envoltório opaco bloqueia os sinais IR vindos de camadas internas do tubo metálico e do fluido de trabalho, o que simplifica a obtenção da distribuição de temperatura da superfície externa do tubo. Entretanto, uma das principais desvantagens dessa estratégia é a impossibilidade de se obter a distribuição de fases líquido-vapor com uma câmera de vídeo, já que a tinta é opaca também na região do visível do espectro eletromagnético. Além disso, há a dificuldade em medir diretamente perfis de temperatura da superfície em contato com o fluido, tendo em vista que o tubo metálico é envolto completamente pela tinta de alta emissividade, impedindo o acesso óptico à superfície interna do tubo. Com o intuito de se obter a distribuição de temperaturas da parede interna e externa, Kim et al. (2012) aplicaram uma tinta preta somente em regiões específicas das superfícies externas e internas do tubo.

## 2.2. Lâminas metálicas finas

Um segundo arranjo de aquecedor encontrado na literatura baseia-se no emprego de lâminas metálicas finas, cuja espessura é da ordem de dezenas de microns. Fontes de aquecimento externas induzem a passagem de corrente pelas



lâminas, que se aquecem e promovem a ebulição do fluido de trabalho em sua superfície. Em função da reduzida espessura e alta condutividade das lâminas metálicas utilizadas, esta configuração de aquecedor é adequada para capturar a temperatura transiente da superfície em contato com o fluido (Yoo et al., 2015), já que gradientes de temperatura ao longo da espessura da lâmina são desprezíveis (Schweizer et al., 2010, Scheiff et al., 2021). Assim, a temperatura da superfície em contato com o fluido é comumente assumida igual à temperatura externa, capturada pela câmera. Desta maneira, uma vantagem de aquecedores baseados em lâminas metálicas finas refere-se à simplicidade em se obter campos de temperatura que representam fielmente a temperatura da superfície interna do canal. Além disso, essa categoria de aquecedor permite a visualização da topologia do escoamento bifásico a partir de filmagens com câmeras de vídeo. Como a lâmina metálica compõe apenas uma parede do canal, pode-se filmar o escoamento, na região do visível do espectro eletromagnético, por meio das outras paredes.

Por apresentar resistência mecânica reduzida, alcançar extensas áreas de aquecimento pode não ser factível (Yoo et al., 2015) pela utilização de lâminas metálicas finas. Ademais, a pressão de operação deve ser limitada para evitar danos estruturais ao aquecedor. Além disso, lâminas metálicas delgadas apresentam capacidade de armazenamento de calor limitada. Assim, uma pequena quantidade de calor transferido é suficiente para variar significativamente a temperatura desse aquecedor, o que pode promover um processo de ebulição com características diferentes daquele que ocorreria caso um aquecedor de espessura convencional fosse empregado (Yoo et al., 2015). Assim, resultados obtidos a partir de aquecedores de lâminas finas representam apenas de maneira limitada os fenômenos de ebulição que ocorrem em aquecedores empregados em aplicações.

### 2.3. Dissipadores metálicos

Dissipadores baseados em multi-microcanais foram empregados nos estudos de Hetsroni et al. (2002) e Szczukiewicz et al. (2013), ao passo que Liu e Pan (2016) utilizaram um único canal. Os canais dos dissipadores foram gravados em um substrato de silício, sob o qual foi posicionada uma placa de vidro borossilicato para acesso visual. Metais foram depositados na base do substrato de silício para permitir o contato com a fonte de alimentação externa. Filmagens na região do visível foram feitas através da placa de vidro, enquanto a câmera IR foi direcionada para o depósito metálico.

Somente a distribuição de temperatura da base do dissipador foi obtida por câmeras IR nos estudos de Hetsroni et al. (2002) e Szczukiewicz et al. (2013). Para obter campos de temperatura na base dos canais com elevada precisão a partir das imagens capturadas pelas câmeras IR, um problema de condução transiente foi solucionado no dissipador, já que o processo de ebulição é transiente. Entretanto, a condição de contorno de convecção na base dos canais não era conhecida, o que aumentava o nível de incerteza das estimativas das temperaturas. Ademais, os inúmeros canais presentes em dissipadores de calor promovem instabilidades nas regiões de entrada e saída e má distribuição de fluido. Isso dificulta a obtenção de resultados que auxiliam no melhor entendimento dos mecanismos de transferência de calor que ocorrem durante a ebulição.

### 2.4. Filme depositado em substrato semitransparente ao IR

Esta classe de aquecedores apresenta um filme, não necessariamente metálico, depositado em um substrato não-metálico. Os filmes depositados possuem elevada condutividade elétrica, enquanto os substratos são isolantes. De maneira geral, os filmes e substratos apresentam elevada transparência no espectro de luz visível. Na região do infravermelho, são opacos e semitransparentes, respectivamente. Essa combinação de propriedades traz inúmeras vantagens a esta categoria de aquecedores.

Diferentemente dos aquecedores tubulares envoltos por tinta preta opaca ao IR, os aquecedores baseados na deposição de filme em substrato semitransparente possibilitam acesso óptico ao escoamento na região do visível. Assim, é possível obter concomitantemente campos de temperatura, por termografia IR, e a topologia do escoamento bifásico, por filmagens com câmeras de vídeo. Além disso, os aquecedores baseados na deposição de filme em substrato semitransparente ao IR possuem substratos cuja espessura é da ordem de milímetros. Isso é suficiente para garantir que os fenômenos de ebulição que ocorrem ao utilizar-se esse grupo de aquecedor sejam representativos daqueles que acontecem em aplicações práticas.

Em Barber et al. (2009) e Korniliou et al. (2019), vidro foi empregado como substrato, enquanto filmes de tântalo e ITO, respectivamente, foram depositados na parede externa do canal. Desse modo, a técnica de termografia por infravermelho capturou a distribuição de temperatura da parede externa. A variação de temperatura ao longo da espessura do aquecedor foi desprezada, e a temperatura na interface parede-fluido foi considerada igual a temperatura na superfície externa, medida pela câmera IR. No entanto, essa aproximação impossibilita a captura de campos de temperatura precisos da parede interna do canal durante a nucleação e crescimento de bolhas. Isso ocorre em função do amortecimento de efeitos transientes ao longo da espessura do canal.



Em Kossolapov et al. (2020), o alvo de medição de temperatura foi a parede interna do canal. A ebulição ocorreu na superfície de um filme de ITO, o qual foi depositado em um substrato de safira, como mostra a Fig. (1). Um substrato de safira foi empregado pois este é um material atóxico, transparente na região do visível do espectro eletromagnético, que não reage com a água e que suporta as tensões térmicas e mecânicas referentes à condição de fluxo crítico de calor, sendo o material mais utilizado em experimentos de ebulição auxiliados por termografia IR (Bucci et al., 2016). No entanto, a safira emite radiação na região do infravermelho, absorve parte da radiação emitida pelo ITO e reflete radiação do ambiente em direção à câmera IR.

Sendo assim, a radiação capturada pela câmera não depende somente da temperatura do ITO, mas também da distribuição de temperatura transiente no interior do substrato. Portanto, para obter o campo de temperatura da parede interna do canal com precisão, deve-se empregar um método de calibração que leve em consideração a contaminação do sinal principal, emitido pelo ITO, dada a presença do substrato de safira.

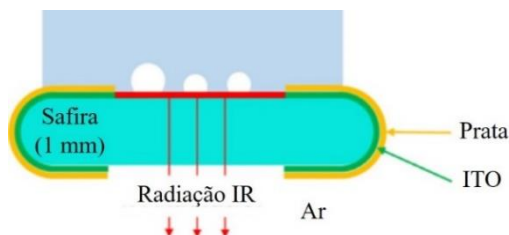


Figura 1. Aquecedor utilizado no trabalho de Kossolapov et al. (2020). Adaptado de Su et al. (2020).

### 3. METODOLOGIAS DE REGRESSÃO DE DADOS DE TERMOGRAFIA IR

A técnicas mais simples de regressão consiste na obtenção de uma relação funcional entre a temperatura da superfície aquecida e o sinal avaliado pela câmera IR. Esta técnica, denominada regressão por ajuste de curvas polinomiais, é amplamente empregada em aquecedores do tipo lâminas metálicas finas, porém há autores que a empregaram em substratos semitransparentes de safira recobertos por filme de ITO (Jung et al. (2016) e Castanet et al. (2020)).

Alternativamente ao método de regressão por curvas polinomiais, existem os métodos propostos por Kim et al. (2012) e Bucci et al. (2016), os quais foram desenvolvidos especificamente para o tratamento de dados obtidos por câmeras IR em seções compostas por materiais semitransparentes e consideram modelos de condução de calor e radiação. O modelo de condução consiste na equação da difusão de calor transiente, com as condições de contorno apropriadas, e o modelo de radiação considera as contribuições de cada componente separadamente (aquecedor, substrato e ambiente) para obter uma estimativa da irradiação incidente na câmera. A principal diferença entre os métodos está na adoção de propriedades ópticas uniformes por Kim et al. (2012) e propriedades espectralmente dependentes por Bucci et al. (2016). Ressalta-se que Kim e colaboradores utilizaram um substrato composto de silício, cuja absorvidade é independente do comprimento de onda na faixa detectada pela câmera IR e, portanto, a adoção de propriedades uniformes é justificada. Já no caso de Bucci et al. (2016), em que o substrato era de safira, deve-se levar em consideração a variação nas propriedades ópticas com o comprimento de onda da radiação. As equações pertinentes a cada modelo são encontradas nas respectivas publicações.

De maneira geral os métodos consistem em: (i) a partir da temperatura na superfície aquecida, solucionar a equação de difusão de calor transiente, para a obter o perfil de temperaturas no substrato ao longo do tempo, e; (ii) obter a contribuição de cada componente na irradiação incidente na câmera, considerando as emissões de cada componente, a absorção no substrato e múltiplas reflexões nas interfaces. A solução caracteriza um problema inverso de transferência de calor, pois avalia-se a irradiação incidente na câmera, mas a distribuição de temperaturas no aquecedor que resultou nesta irradiação é desconhecida.

### 4. ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE TERMOGRAFIA IR

No presente estudo, o banco de dados utilizado para a análise dos métodos de calibração foi gerado numericamente, com o intuito de se avaliar o desempenho de cada método a variações abruptas de temperatura. Impôs-se a temperatura na superfície aquecida de ITO, dependente do tempo, e solucionou-se a equação da difusão de calor considerando como condição de contorno transferência de calor por convecção com o ambiente, com coeficiente de transferência de calor,  $h$ , de  $10\text{W/m}^2\text{K}$  e temperatura ambiente de  $24^\circ\text{C}$ . A Figura 2 ilustra, esquematicamente, a simulação realizada para um caso unidimensional. Com o campo de temperaturas em todo o substrato, o modelo de radiação proposto por Bucci et al. (2016) foi utilizado para a obtenção da irradiação da seção de testes ( $E_{\text{tot}} = E_{\text{ito}} + E_{\text{amb}} + E_{\text{saf}}$ ), obtendo, portanto, uma termografia simulada para cada instante de tempo. Optou-se pelo modelo de Bucci et al. (2016) ao invés do modelo de Kim et al. (2012), pelo fato de o primeiro considerar propriedades ópticas espectralmente dependentes.



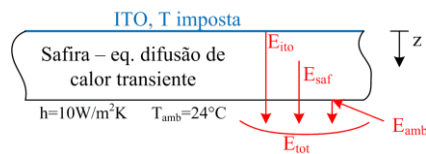


Figura 2. Ilustração esquemática do modelo solucionado numericamente para obtenção do banco de dados numérico.

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos aplicando as três metodologias discutidas anteriormente, a curva polinomial de regressão, o método de Kim et al. (2012) e o método de Bucci et al. (2016), em um caso unidimensional. A influência da taxa de captura das imagens pela câmera IR foi investigada para o método de Bucci et al. (2016), a partir da variação deste parâmetro de 250 a 4000Hz. A elevação abrupta da temperatura, em um cenário simulado de ocorrência de secagem de parede, foi representada por um degrau de 30°C ( $\Delta T=30^\circ\text{C}$ ). A Figura 3 indica que os métodos de Kim et al. (2012) e de Bucci et al. (2016) são capazes de capturar a variação abrupta na temperatura, porém os erros do segundo são significativamente inferiores aos do primeiro. Na região dos patamares (em 165 e 195°C), o método de Kim et al. (2012) apresenta erros de cerca de 0,2°C, enquanto o método de Bucci et al. (2016) é capaz de praticamente recuperar a temperatura exata. Ademais, nota-se que conforme a taxa de aquisição é reduzida, os erros obtidos com o método de Bucci et al. (2016) se elevam.

Dentre as causas para os desvios encontrados, destaca-se: (i) a curva de regressão, por ser obtida considerando temperaturas uniformes no substrato, falha quando o perfil de temperaturas não é uniforme, pois a contribuição da safira se torna distinta da contribuição durante a calibração (Bucci et al. (2016)); (ii) o modelo de Kim, por empregar propriedades ópticas uniformes, prevê contribuições de cada componente diferente das contribuições previstas pelo modelo de Bucci et al. (2016). Em particular, a contribuição do ITO prevista pelo modelo de Kim et al. (2012) é inferior, sendo este o motivo deste modelo estimar temperaturas superiores para este componente, e; (iii) a redução na taxa de aquisição implica na redução da quantidade de informação disponível para a solução do problema e em passos no tempo elevados na solução numérica da equação da difusão de calor, por estes motivos, o erro se eleva.

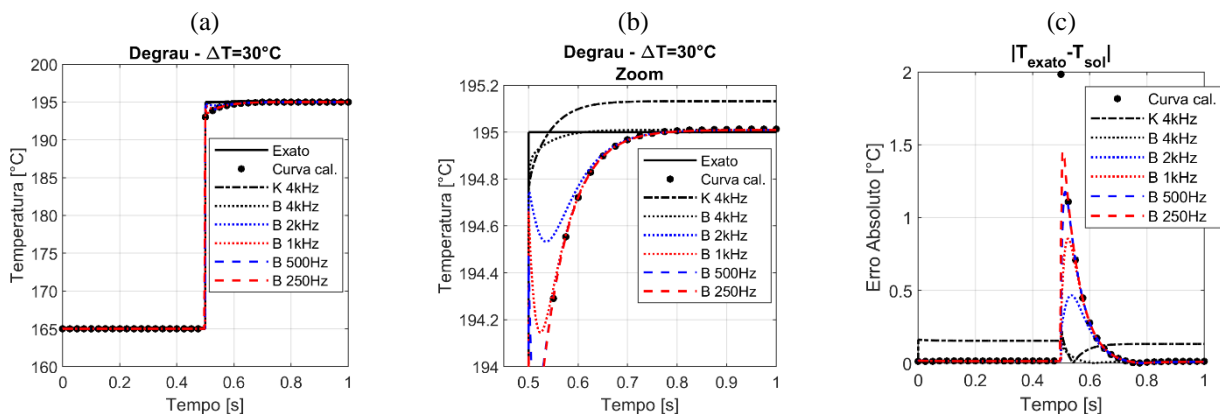


Figura 3. Resultados obtidos por cada metodologia, considerando uma elevação abrupta da temperatura da superfície aquecida, K indica o método de Kim et al. (2012) e B, o de Bucci et al. (2016). (a) Intervalo total de tempo simulado; (b) Detalhe na região da descontinuidade; (c) Erros absolutos.

## 5. CONCLUSÕES

Baseado nas análises conduzidas, conclui-se que o modelo de Bucci et al. (2016) apresenta os melhores resultados na obtenção da temperatura da superfície aquecida de um aquecedor de ITO/safira. Foi demonstrado que é necessário o conhecimento das propriedades ópticas espectrais dos materiais utilizados na construção da seção de testes para obtenção de maior precisão das estimativas da temperatura. Além disso, o modelo de Bucci et al. (2016) apresentou maior nível de precisão para dados com taxa de aquisição elevada. Observou-se que a taxa de aquisição é inversamente proporcional à escala de tempo do fenômeno investigado, sendo que fenômenos com curta escala de tempo requerem taxas de aquisição elevadas. No caso avaliado no presente estudo, o método de Bucci et al. (2016) apresentou o melhor desempenho dentre os modelos analisados, mesmo para a taxa de aquisição de 250Hz. Porém, observa-se que o resultado tende ao valor estimado pela curva de calibração conforme a taxa de aquisição é reduzida.



## 6. REFERÊNCIAS

- Astarita, T., et al. A survey on infrared thermography for convective heat transfer measurements. *Optics & Laser Technology* 32.7-8 (2000): 593-610. [https://doi.org/10.1016/S0030-3992\(00\)00086-4](https://doi.org/10.1016/S0030-3992(00)00086-4)
- Barber, J., et al. Hydrodynamics and heat transfer during flow boiling instabilities in a single microchannel. *Applied Thermal Engineering* 29.7 (2009): 1299-1308. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.07.004>
- Bucci, M., et al. A mechanistic IR calibration technique for boiling heat transfer investigations. *International Journal of Multiphase Flow* 83 (2016): 115-127. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.03.007>
- Hapke, I., et al. Onset of nucleate boiling in minichannels. *International journal of thermal sciences* 39.4 (2000): 505-513. [https://doi.org/10.1016/S1290-0729\(00\)00206-4](https://doi.org/10.1016/S1290-0729(00)00206-4)
- Hetsroni, G., et al. A uniform temperature heat sink for cooling of electronic devices. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45.16 (2002): 3275-3286. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00048-0](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00048-0)
- Kim, T., et al. Measurement of two-phase flow and heat transfer parameters using infrared thermometry. *International Journal of Multiphase Flow* 40 (2012): 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.11.012>
- Korniliou, S., et al. Local wall temperature mapping during flow boiling in a transparent microchannel. *International Journal of Thermal Sciences* 135 (2019): 344-361. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.09.028>
- Kossolapov, A., et al. The boiling crisis of water under exponentially escalating heat inputs in subcooled flow boiling at atmospheric pressure. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 160 (2020): 120137. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120137>
- Scheiff, V., et al. Experimental study of steady and transient subcooled flow boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 164 (2021): 120548. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120548>
- Schweizer, N., et al. High-resolution measurement of wall temperature distribution during forced convective boiling in a single minichannel. *International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*. Vol. 54501. 2010. <https://doi.org/10.1115/FEDSM-ICNMM2010-30273>
- Szczukiewicz, S., et al. Fine-resolution two-phase flow heat transfer coefficient measurements of refrigerants in multi-microchannel evaporators. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 67 (2013): 913-929. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.08.078>
- Thomann, H., and Frisk, B. Measurement of heat transfer with an infrared camera. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 11.5 (1968): 819-826. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(68\)90126-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(68)90126-9)
- Yoo, J., et al. An accurate wall temperature measurement using infrared thermometry with enhanced two-phase flow visualization in a convective boiling system. *International Journal of Thermal Sciences* 90 (2015): 248-266. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.12.007>

## 7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) na modalidade Projeto Temático, processo 2016/09509-1. O primeiro, segundo e terceiro autor gostariam de agradecer pelo financiamento concedido pela FAPESP, processos 2020/10923-2, 2020/02062-7 e 2020/10867-5, respectivamente. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## 8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.