

## ANÁLISE DA DINÂMICA DE CRESCIMENTO DE BOLHAS DE VAPOR EM CAVIDADE ARTIFICIAL POR MEIO DE SENSOR ÓPTICO

**Bruno Alves de Andrade**<sup>1</sup>, bbrunno0302.andrade@gmail.com

**Anderson Giacomeli Fortes**<sup>1</sup>, anderson.fortes@hotmail.com

<sup>1</sup>UNESP – São Paulo State University, Post-Graduation Program in Mechanical Engineering, Av. Brasil, 56, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brazil

**Jeferson Diehl de Oliveira**<sup>2</sup>, jeferson.oliveira@fsg.edu.com

<sup>2</sup>Centro Universitário da Serra Gaúcha, Câmpus Sede, Av. Rua Os Dezoito do Forte, 2366, 95020-472, Caxias do Sul, RS, Brasil

**Elaine Maria Cardoso**<sup>1,3</sup>, elaine.cardoso@unesp.br

<sup>1</sup>UNESP – São Paulo State University, Post-Graduation Program in Mechanical Engineering, Av. Brasil, 56, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brazil

<sup>3</sup>UNESP - São Paulo State University, Câmpus of São João da Boa Vista, São João da Boa Vista, SP, Brazil

**Resumo.** O crescente desenvolvimento tecnológico na parte de processadores eletrônicos e microeletrônicos, bem como uma série de setores industriais aumenta cada vez mais a demanda por técnicas eficientes para o gerenciamento térmico de tais dispositivos. Assim, é de interesse do meio científico o entendimento de fenômenos como os envolvidos no processo de ebulição, que possui expansiva capacidade de atuar como elemento base na implementação de sistemas capazes de realizar trocas térmicas com alta eficiência. Dessa forma, o presente trabalho foi realizado sobre metodologias experimentais direcionadas ao estudo do fenômeno de ebulição nucleada a partir de uma análise de frequências e diâmetro de partida de bolhas de vapor em cavidade artificial, sendo destaque o projeto, a fabricação e implementação de um sensor óptico de resistência variável (LDR) capaz de, a partir de uma mudança de tensão, gerar um sinal analógico que fornece os valores de frequência de nucleação com uma precisão bastante satisfatória.

**Palavras chave:** *dinâmica da bolha de vapor, sítio único de nucleação, sensor óptico.*

**Abstract.** The growing technological development in the area of electronic and microelectronic processors, as well as a series of industrial sectors, increases the demand for efficient techniques for the thermal management of such devices. Therefore, it is of interest to the scientific community to understand the phenomena involved in the boiling process, which has an expansive capacity to act as a base element in the implementation of systems capable of performing thermal exchanges with high efficiency. In this way, the present work was carried out on experimental methodologies aimed at studying the nucleate boiling phenomenon from an analysis of frequencies and departure diameter of vapor bubbles in an artificial cavity, highlighting the design, manufacture and implementation of an optical sensor of variable resistance (LDR) capable of generating an analog signal from a voltage change that provides the nucleation frequency values with very satisfactory precision.

**Keywords:** Vapor bubble dynamics, single nucleation site, optical sensor.

### 1. INTRODUÇÃO

Estudos sobre técnicas que aperfeiçoem trocas térmicas vêm sendo amplamente realizados (Liang e Mudawar, 2019; Kiyomura et al., 2020; Manetti et al., 2020; Liang e Mudawar, 2020); dessa forma processos envolvendo ebulição e o estudo da dinâmica de bolhas de vapor torna-se fundamental para que se obtenha ainda mais resultados significativos nesta área. O desenvolvimento de tais estudos é de importância para a indústria, podendo servir de base para criação de dispositivos mais eficientes na realização de trocas térmicas, como aqueles usados em microprocessadores eletrônicos, resfriamento de células fotovoltaicas e até mesmo em grandes usinas de geração de energia (Sarker et al., 2017; Sadaghiani et al., 2019).

Os mecanismos que regem o fenômeno de ebulição dependem da dinâmica de crescimento e partida das bolhas de vapor e, esta por sua vez, depende de fatores como: configurações geométricas da superfície (como por exemplo, material, espessura, diâmetro e rugosidade da superfície), propriedades termofísicas do fluido de trabalho, dentre outros (Kim, 2009; McHale e Garimella, 2010). Assim, entender o comportamento térmico e hidrodinâmico de uma bolha de

vapor durante seu ciclo de vida (nucleação - crescimento - partida) é primordial para o estudo da ebulição nucleada e sua consequente aplicação no desenvolvimento de novas tecnologias para melhorar a eficiência de sistemas térmicos.

O presente trabalho visa o estudo do regime de ebulição nucleada, tendo como superfície de aquecimento uma superfície de cobre plana com a adição de um único sítio de nucleação; o fluido de trabalho utilizado é o HFE-7100 (3M Company®), em condições de saturação para a pressão local ( $p_{atm} = 98kPa$ ). Para a análise da dinâmica de crescimento e partida das bolhas de vapor, um sensor óptico de resistência variável foi desenvolvido; este é capaz de converter um sinal elétrico em valores de frequência, para análise de parâmetros como, frequência e diâmetro de partida de bolhas de vapor. Os dados obtidos por meio do sensor são comparados àqueles obtidos por meio de uma câmera de alta velocidade.

## 2. METODOLOGIA

Neste estudo foi desenvolvido um sensor óptico capaz de captar sinais da passagem das bolhas de vapor, de modo que a partir deste sinal pode-se determinar, via tratamento adequado, valores de frequências características para o regime de ebulição nucleada. Destacam-se duas principais vantagens no uso deste sensor: i) seu baixo custo comparado a outros métodos utilizados para estudar tais parâmetros e, ii) o fato de sua aplicação não ser intrusiva, de modo que a sua presença não causa alteração no fenômeno físico estudado, fornecendo assim resultados totalmente livres de interferências.

A análise do sinal do sensor é feita por um sistema de aquisição de dados da National Instruments modelo NI USB-6009 e, por fim, os dados obtidos são tratados utilizando o Matlab®. Na Fig.1 é apresentado o posicionamento do sensor na bancada experimental, assim como o sistema de aquisição de dados.

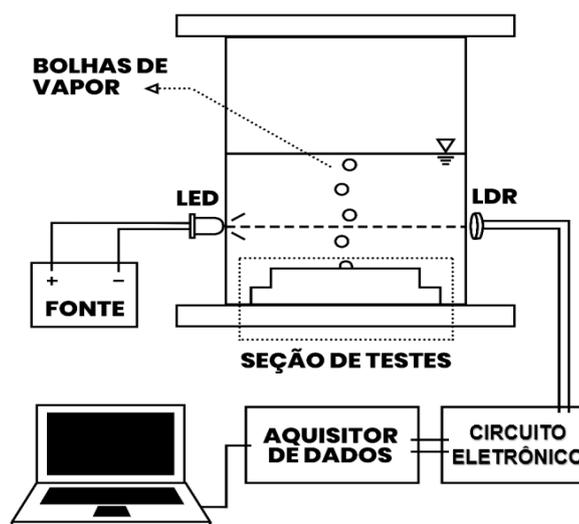


Figura 1. Representação esquemática do sensor óptico acoplado à bancada experimental.

### 2.1. Sensor óptico

O sensor é constituído basicamente de um diodo emissor de luz (LED – *Light Emitting Diode*) de alto brilho, um sensor de fotoresistência (LDR – *Light Dependent Resistor*) e um circuito eletrônico, desenvolvido e montado em uma PCI (placa de circuito impresso). A variação do brilho causada pela estrutura da interface líquido-vapor altera o valor da resistência elétrica do LDR. Tal variação de resistência é transformada em uma variação de tensão elétrica por meio de um circuito eletrônico. Após esta conversão, o sinal de tensão passa por etapas de amplificação e filtro para, então, ser analisado.

A PCI (placa de circuito impresso) desenvolvida é composta principalmente por três circuitos eletrônicos internos sendo esses, a fonte de alimentação, o amplificador e o filtro de sinais, os quais serão apresentados individualmente a seguir.

#### 2.1.1. Fonte de alimentação

Os circuitos integrados usados na placa funcionam com uma alimentação de 5 V, assim, para regular a tensão da fonte externa de 12 V para 5 V tem-se uma fonte linear DC-DC que utiliza o regulador de tensão linear LM317. Este circuito é representado na Fig. 2. Nota-se na imagem que, além do LM317, temos um diodo M7 na entrada para

proteger todo o sistema contra inversão de polaridade, assim como uma série de capacitores cuja função é filtrar possíveis ruídos de sinais gerados pela rede elétrica e pela fonte de alimentação externa.

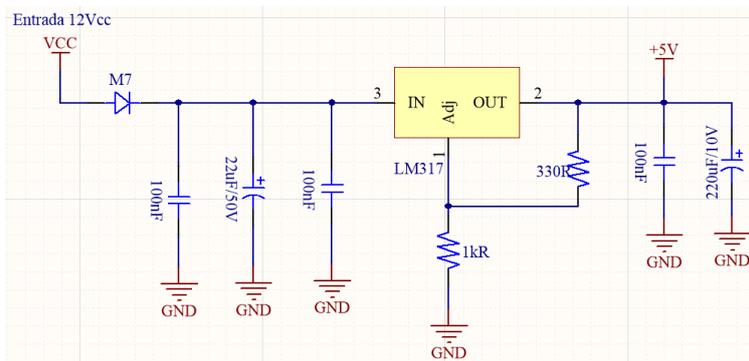


Figura 2. Circuito da fonte de alimentação.

### 2.1.2. Circuito amplificador

A variação de resistência elétrica do LDR é convertida em um sinal de tensão utilizando um resistor em série com o LDR. Após isso, este sinal de tensão elétrica foi amplificado em 16 vezes de forma diferencial com relação a um valor de tensão ajustado com o auxílio de um *trimpot*. Para fazer esta amplificação, foi utilizado o amplificador de instrumentação INA826, conforme apresentado na Fig. 3.

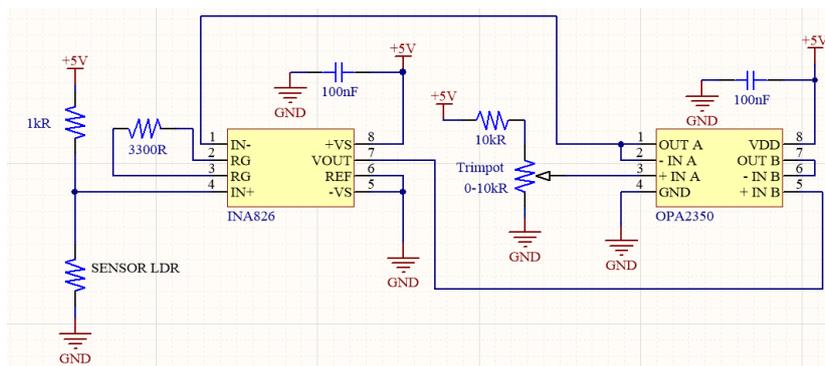


Figura 3. Circuito amplificador.

### 2.1.3. Circuito do filtro passa baixa

O último circuito desenvolvido da placa eletrônica é um filtro passa baixa ativo de segunda ordem ajustado para filtrar frequências superiores a 500Hz. O objetivo desse filtro é eliminar qualquer ruído presente nos sinais que sejam irradiados ou conduzidos ao sensor. Utiliza-se o circuito integrado OPA2350 para o projeto do filtro, conforme apresentado na Fig. 4.

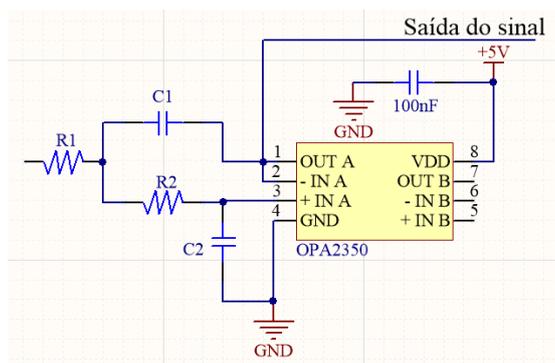


Figura 4. Circuito do filtro passa baixa.

## 2.2. Bancada experimental

A Fig. 5 mostra um desenho esquemático do aparato experimental indicando os principais componentes.

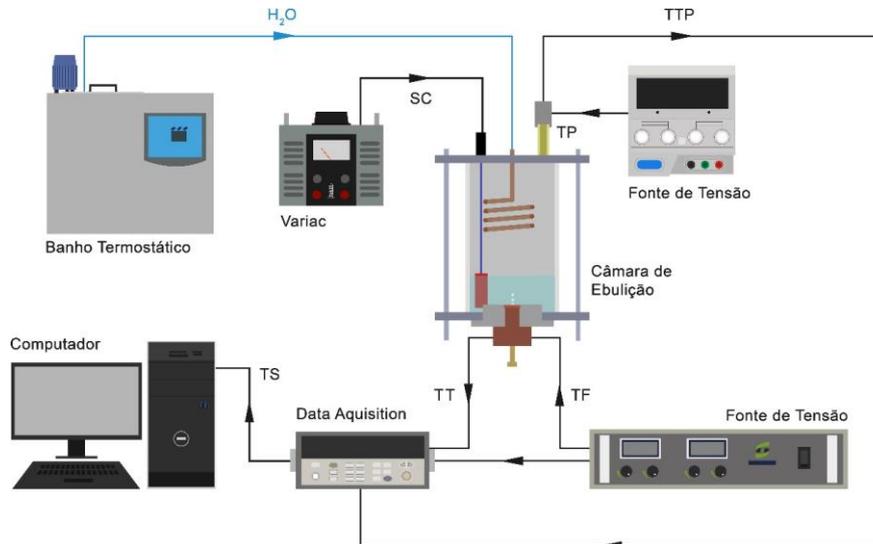
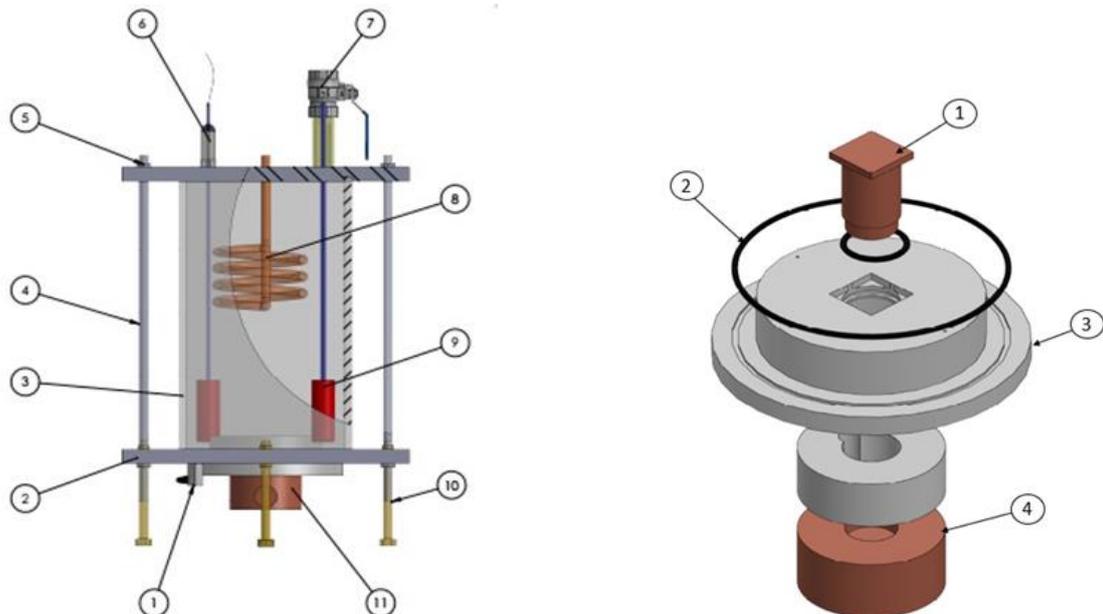


Figura 5. Representação esquemática da bancada experimental.

A câmara de ebulição consiste em uma cuba de vidro de 5 mm de espessura e dimensões 100 x 100 x 200 mm, duas chapas de aço inoxidável AISI 316 com dimensões de 150 x 150 x 10 mm, um condensador tipo serpentina de cobre e a seção de testes, conforme mostra a Fig. 6, sendo que um banho termostático é utilizado para controlar a temperatura do condensador, tipo serpentina, localizado na parte superior da câmara de ebulição. Um transdutor de pressão permite medir a pressão no interior da câmara de ebulição, a qual é mantida à pressão atmosférica local (Ilha Solteira/SP) durante os testes em ebulição. A parte superior da câmara de ebulição possui uma válvula para realizar o vácuo e o carregamento do fluido de trabalho. Aquecedores auxiliares estão fixados na parede da câmara de ebulição a fim de manter a temperatura do líquido à temperatura de saturação.



- 1) Válvula para retirada de fluido; 2) Placa de aço inox;
- 3) Cuba de vidro; 4) Barra de rosca sem fim; 5) Porcas e arruelas; 6) Transdutor de pressão; 7) Válvula para carregamento do fluido; 8) Condensador; 9) Resistências auxiliares; 10) Base de apoio; 11) Seção de testes.

- 1) Superfície aquecedora; 2) Anéis de vedação; 3) Peça de politetrafluoretileno; 4) Base de cobre.

Figura 6. Câmara de ebulição e vista explodida da expandida de testes.

A seção de testes consiste em um tarugo de cobre com seção transversal quadrada (16 x 16 x 60 mm) contendo três termopares tipo K, fixados no interior de três orifícios localizados ao longo do tarugo de cobre, com o objetivo de determinar a temperatura da superfície. A superfície de aquecimento em contato com o fluido de trabalho possui um sítio único de nucleação com diâmetro de 100 µm, fabricado por meio do processo de microusinagem, utilizando uma broca de diâmetro 0,1 mm.

A parte inferior do tarugo de cobre possui uma rosca M14 para acoplar à base do bloco de cobre. O bloco de cobre é aquecido por uma resistência elétrica tipo cartucho alimentada pela fonte de potência. O isolamento térmico da seção de testes consiste em uma peça de politetrafluoretileno e a parte do bloco de cobre que permanece no exterior da câmara de ebulição é isolada termicamente com uma fita de fibra de cerâmica capaz de isolar em temperaturas de até 1260 °C.

Durante cada teste realizado, o sensor óptico está acoplado à bancada experimental capturando a variação do brilho causada pela estrutura da interface líquido-vapor das bolhas de vapor formadas a partir da cavidade artificial. Além disso, uma câmera de alta velocidade (Photron FASTCAM SA3 60K M3), com taxa de 1000 fps e um sistema de iluminação, captura imagens das bolhas de vapor para posterior pós-processamento e comparação com o sinal do sensor óptico obtido.

### 2.3. Tratamento do sinal do sensor

O sinal de tensão obtido pelo sensor é tratado via MATLAB® por meio da Transformada Rápida de Fourier - FFT (Welch, 1967), para cada valor de tensão aplicado à resistência e, por conseguinte, à superfície aquecedora.

O método consiste em, a partir de uma série temporal (tensão) que representa o conjunto de variações do sinal do sensor, fazer com que este sinal seja então convertido para o domínio da frequência. A FFT que converte um sinal em domínio temporal,  $x(t)$ , para um sinal em domínio de frequência,  $X(f)$  é dado pela Eq. (1), tendo como argumentos das complexas a frequência  $f$ , num dado interval de tempo, assim como considera seu número  $N$  de pontos.

$$X(f) = F\{x(t)\} = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} x(t)e^{-j2\pi ft} \Delta t \quad (1)$$

O tratamento do sinal foi feito por meio de um algoritmo desenvolvido em MATLAB® R2017a, sendo que o *script* se encontra no Apêndice A.

### 3. RESULTADOS

Para assegurar que as bolhas de vapor seriam uma barreira suficiente para bloquear/desviar o feixe de luz incidente por meio do LED, foi realizado o primeiro teste no sentido de garantir que o sensor seria capaz de perceber a passagem das bolhas de vapor. Para tal análise foi usado o software DAQSPRESS, na entrada analógica, de modo que em seu mostrador pode-se observar a variação de tensão no tempo sempre que o sítio de nucleação está ativo, como mostrado na Fig.7.

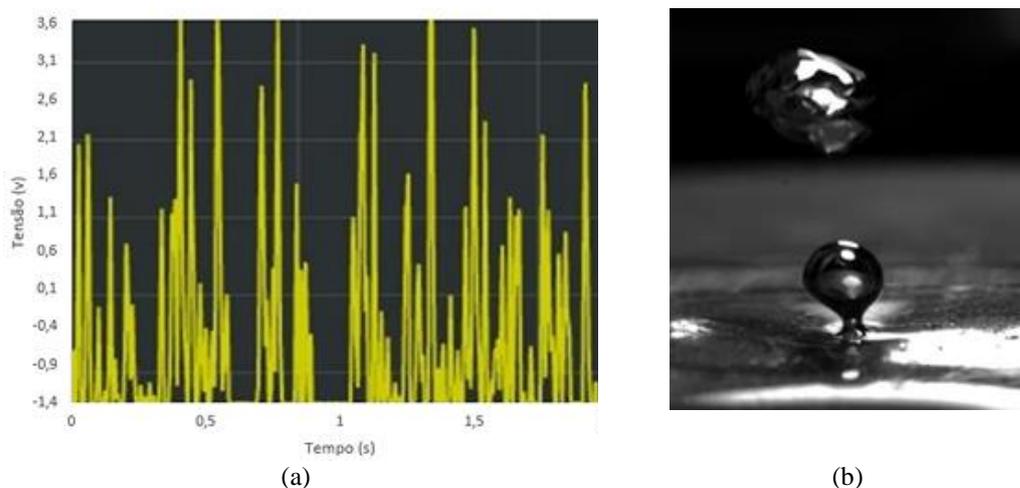


Figura 7. Características na presença de bolhas de vapor para intervalo de 2 s. (a) Sinal de tensão do sensor. (b) Visualização do padrão de bolhas.

Após a validação do sensor, os primeiros testes em regime de ebulição nucleada foram realizados conforme procedimento descrito em Kiyomura et al. (2020), e as frequências características de partida de bolhas de vapor, dependendo do fluxo de calor aplicado, estão apresentadas na Fig. 8.

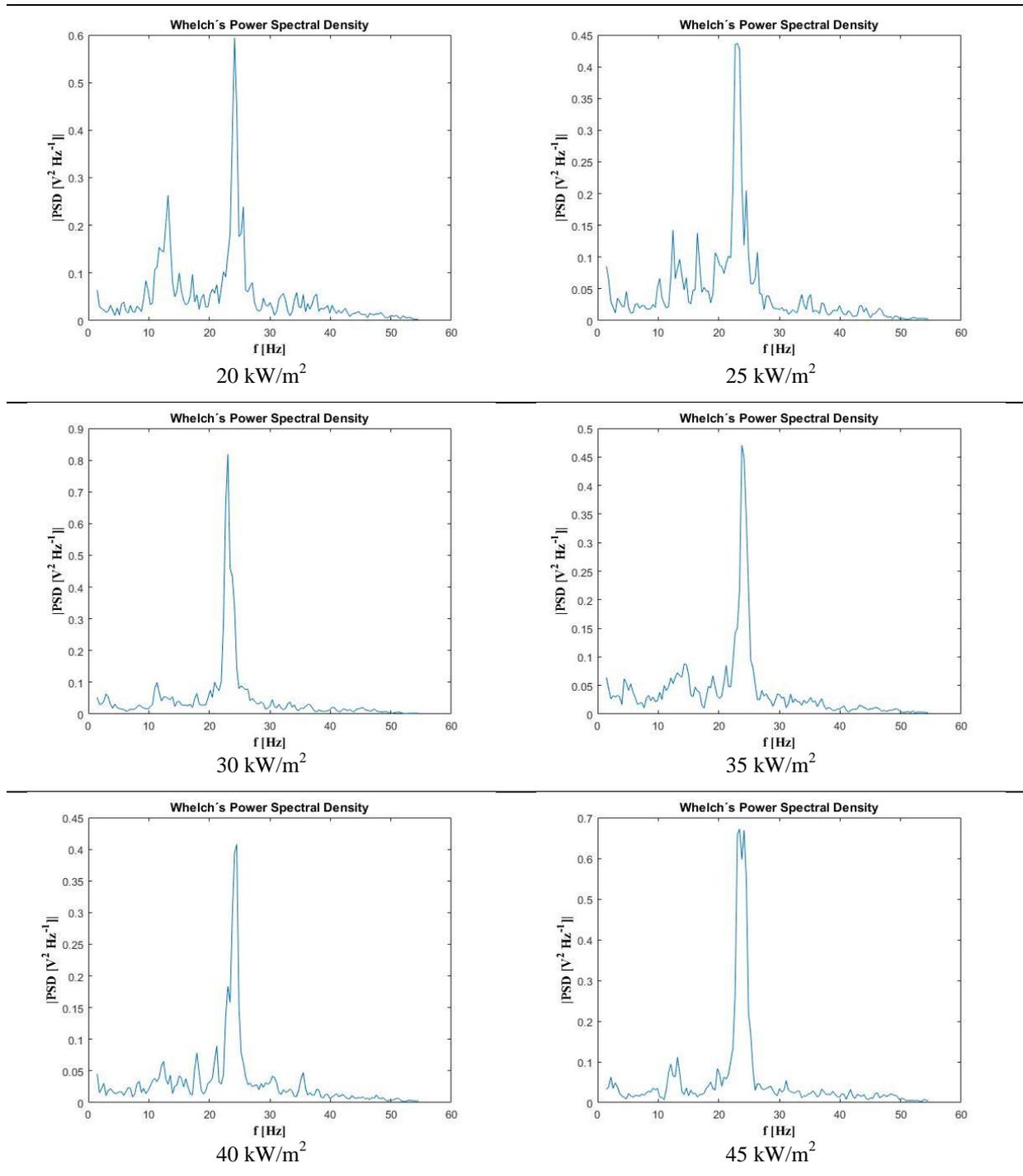


Figura 8. Frequência característica de partida de bolha de vapor do sítio único para diferentes fluxos de calor aplicados.

A Figura 9 mostra a sequência de imagens obtidas com a câmera de alta velocidade (Photron FASTCAM SA3 60K M3), com taxa de 1000 fps e com sistema de iluminação acoplado. O tempo de crescimento da bolha de vapor, que é o intervalo de tempo entre a nucleação da bolha e sua subsequente partida, também é apresentado na Fig. 9, possibilitando a análise da frequência de partida de bolhas.

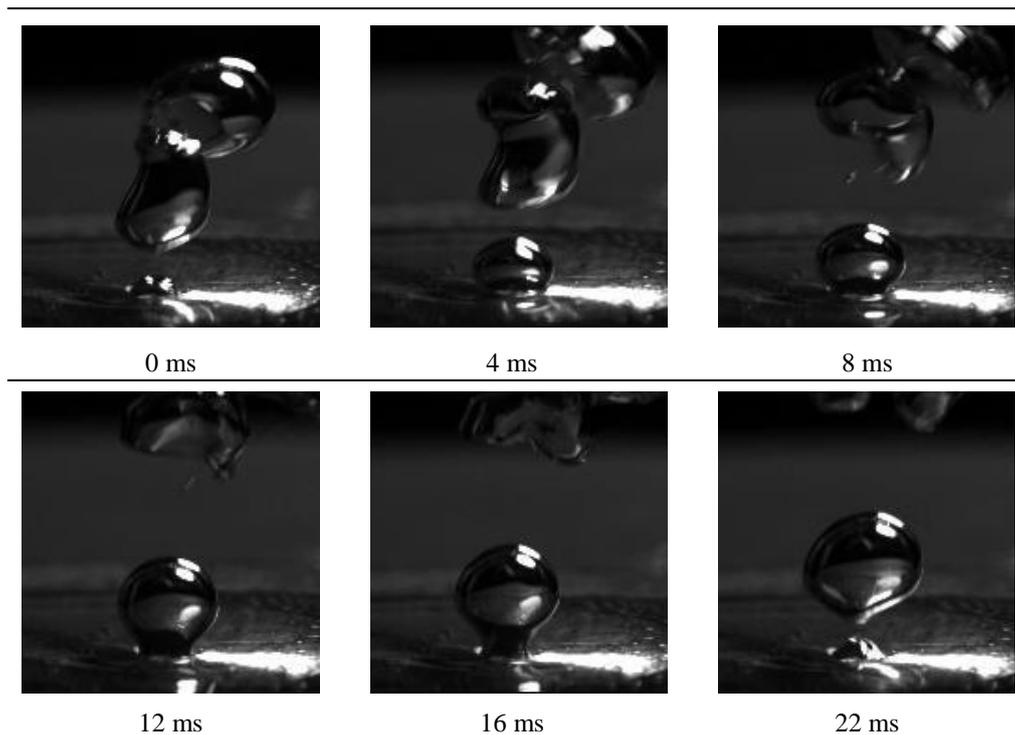


Figura 9. Imagens de câmera de alta velocidade de uma bolha de vapor para fluxo de calor de  $30 \text{ kW/m}^2$ .

Para os testes apresentados, o sensor foi posicionado a uma distância de 13,6 mm acima da superfície aquecedora, ponto onde já havia ocorrido a coalescência vertical de bolhas segundo as imagens obtidas pelas filmagens (Fig. 9). Isso pode ter influenciado os dados de frequência obtidos pelo sensor óptico, que permaneceu em torno de 25 Hz independente do fluxo de calor aplicado, visto que as bolhas de vapor sofrem influência de forças como empuxo e arrasto quando se desprendem da superfície e ascendem em direção ao meio líquido (inclusive causando o achatamento e/ou coalescência das bolhas de vapor, como pode-se observar na sequência de imagens da Fig. 9).

Dos dados obtidos pela câmera de alta velocidade, por meio das análises das imagens obtidas com a câmera de alta velocidade e tratadas no software Tracker®, tem-se a frequência característica da bolha de vapor de aproximadamente 40 Hz. A diferença entre os dados obtidos pelo sensor e pela câmera de alta velocidade deve-se, como já mencionado, ao posicionamento do sensor que captura o sinal após a bolha de vapor ter se deslocado uma altura de 13,6 mm ao invés de capturar o sinal assim que a bolha se desprende da superfície, como feito pela câmera de alta velocidade.

De todo modo, os valores obtidos para frequência de partida da bolha de vapor estão coerentes com aqueles encontrados na literatura (Zhang et al, 2003; Sakashita, 2009; Hamzekhani et al., 2014; Hamzekhani et al., 2015), visto que fluxos de calor baixos usualmente estão associados a frequências de partida características e pouco variáveis, provando assim que o sensor é uma maneira bastante eficiente para determinação da frequência de partida das bolhas de vapor.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizadas metodologias experimentais direcionadas a compreensão de mecanismos associados ao regime de ebulição nucleada. O fluido de trabalho utilizado foi o HFE-7100, em condições de saturação ( $T_{\text{sat}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $p_{\text{atm}} = 98 \text{ kPa}$ ), sobre uma superfície de cobre contendo uma única cavidade artificial. A partir dos dados apresentados tem-se que:

- ✓ O sensor óptico desenvolvido foi validado com sucesso, mostrando ser capaz de analisar a frequência de partida de bolha de vapor em diferentes condições de testes. A fim de comparar os dados obtidos com o sensor com aqueles obtidos pela câmera de alta velocidade, deve-se posicionar o sensor a uma altura o mais próximo possível da superfície de teste garantindo que o sinal de referência seja tomado no exato instante da partida da bolha (novos testes estão sendo feitos com esta modificação);
- ✓ Para fluxos de calor baixos observou-se que a coalescência vertical das bolhas de vapor afetou negativamente os dados de frequência obtidos pelo sensor devido ao seu posicionamento; a frequência obtida pode ser resultado da passagem de duas ou mais bolhas coalescidas e não de uma única bolha de vapor. Assim, o valor de frequência obtido pelo sensor não correspondeu ao valor obtido pela câmera de alta velocidade (dado pelo inverso do período, o qual consiste no tempo desde a nucleação até a partida - tempo de crescimento da bolha). Entretanto,

os valores obtidos para frequência de partida da bolha de vapor estão coerentes com aqueles encontrados na literatura, visto que fluxos de calor baixos estão associados a frequências de partida características e pouco variáveis.

## 5. REFERÊNCIAS

Hamzekhani S.; Falahieh M.; Akbari A. Bubble departure diameter in nucleate pool boiling at saturation: pure liquids and binary mixtures. *Int J Refrig.* 46:50–8, 2014.

Hamzekhani S.; Falahieh M.; Kamalizadeh M.; Nazari Z. Experimental study on bubble departure frequency for pool boiling of water/NaCl solutions. *Heat Mass Transf.* 51:1313–20, 2015.

Kim, J. Review of nucleate pool boiling heat transfer mechanisms. *International Journal of Multiphase Flow*, 35:1067–1076, 2009.

Kiyomura, I.S.; Nunes, J.M.; Souza, R.R.; Gajghate, S.S; Bhaumik, S.; cardoso, e.m. Effect of microfin surfaces on boiling heat transfer using HFE-7100 as working fluid. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 42, 366, 2020.

Liang, G.; Mudawar, I. Review of pool boiling enhancement by surface modification. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 128, p 892-933, 2019.

Liang, G.; Mudawar, I. Review of nanoscale boiling enhancement techniques and proposed systematic testing strategy to ensure cooling reliability and repeatability. *Applied Thermal Engineering*, 115982, 2020 (*in press*).

Manetti, L.L.; Ribatski, G.; Souza, R.R.; Cardoso, E.M. Pool boiling heat transfer of HFE-7100 on metal foams. *Exp Therm Fluid Sci* 113:110025, 2020.

Mchale, J.P.; Garimella, S.V. Bubble nucleation characteristics in pool boiling of a wetting liquid on smooth and rough surfaces. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 36, n. 4, p. 249-260, 2010.

Sadaghiani, A. K. (2019) Micro/Nano-engineered techniques for enhanced pool boiling heat transfer. [Thesis]

Sakashita, H.; Ono, A. Boiling behaviours and critical heat flux on a horizontal plate in saturated pool boiling of water at high pressures. *Int J Heat Mass Transf* 52:744–50, 2009.

Sarker, D.; Franz, R.; Ding, W.; Hampel, U. Single bubble dynamics during subcooled nucleate boiling on a vertical heater surface: An experimental analysis of the effects of surface characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109, 907-921, 2017.

Welch, P.D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transaction on Audio and Electroacoust* v.15, p. 70 – 73, 1967.

Zhang, L.; Shoji, M. Nucleation site interaction in pool boiling on the artificial surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 46, n. 3, p. 513-522, 2003.

## 6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

## Apêndice A

Script em MATLAB® para obtenção do PSD (*power spectral density*)

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
clear all  
load TESTE1.txt; %%%%Carrega o arquivo em formato .txt  
sinal = TESTE1; %%%%Cria a variável vetor composta pelo arquivo  
sigg = sinal-mean(sinal); %%%%% Sinal menos a sua média (para analisar apenas as flutuações do sinal)  
sig = sigg(1:2^(floor(log2(length(sigg))))); %%%% O sinal tem seu tamanho ajustado a um comprimento  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% de uma potência de 2  
fs= 24000; %%%% Frequência de aquisição do sinal  
[pxx,ff] = pwelch(sig,65000,[],[],fs); % Função que determina a transformada de Fourier  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% usando o método de Welch |  
figure(1);  
plot(sig);  
grid off;  
title('Signal [V]')  
xlabel('Samples [-]', 'FontSize',12, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k')  
ylabel('Signal [V]', 'FontSize',12, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k')  
  
figure(2);  
loglog(ff,pxx);  
grid on;  
title('Welch's Power Spectral Density')  
xlabel('log10{f} [Hz]', 'FontSize',12, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k')  
ylabel('log10{PSD} [V2 Hz-1]', 'FontSize',12, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k')  
  
x_range = 150; %%%% Comprimento do vetor frequência a ser plotado |  
  
figure(3);  
plot(ff(5:x_range),pxx(5:x_range));  
grid off;  
title('Welch's Power Spectral Density')  
xlabel('f [Hz]', 'FontSize',12, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k')  
ylabel('PSD [V2 Hz-1]', 'FontSize',12, 'FontName', 'Times New Roman', 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k')
```