

# 12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



## TÍTULO DO TRABALHO:

Efeitos do aquecimento circunferencial não uniforme sobre o início da secagem em escoamentos horizontais

## AUTORES:

Matheus S. Moitinho  
Arthur K. A. de Araújo  
Júlio César Passos

## INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Santa Catarina

## EFEITOS DO AQUECIMENTO CIRCUNFERENCIAL NÃO UNIFORME SOBRE O INÍCIO DA SECAGEM EM ESCOAMENTOS HORIZONTAIS

### Resumo

Este artigo investiga o impacto do aquecimento circunferencial não uniforme no processo de secagem da parede de tubos de aço inoxidável em escoamento horizontal com ebulição. A principal motivação do estudo está nas aplicações em heliotérmica utilizando a tecnologia de geração direta de vapor (DSG, em inglês). Foram realizados testes em uma bancada experimental utilizando R141b, com pressão próxima da atmosférica, velocidades mássicas de 50 e 150 kg/(m<sup>2</sup>s) e fluxos de calor de 3,4 e 10,5 kW/m<sup>2</sup>. A distribuição de temperaturas e o coeficiente de transferência de calor (CTC) ao longo do tubo foram analisados para títulos de vapor superiores a 80%, em sete seções ao longo do comprimento da seção de teste e em duas condições de aquecimento: por baixo e uniforme. Não foram observadas quedas bruscas nos parâmetros avaliados, o que sinaliza a ausência de secagem. No entanto, foi verificada influência do tipo de aquecimento na diferença de temperatura entre as porções superior e inferior para ambas as velocidades mássicas testadas, bem como no CTC. A relevância deste estudo está na compreensão de como a variação do aquecimento circunferencial pode influenciar o início da secagem da parede, com consequências tanto para a eficiência da transferência de calor quanto para a vida útil do equipamento.

Palavras-chave: secagem, ebulição, aquecimento, circunferencial, uniforme.

### Abstract

This article investigates the impact of non-uniform circumferential heating on the drying process of stainless steel tube wall in horizontal flow boiling. The primary motivation for the study lies in heliothermal applications using direct steam generation (DSG) technology. Tests were conducted on an experimental setup using R141b, with pressures close to atmospheric, mass velocities of 50 and 150 kg/(m<sup>2</sup>s), and heat fluxes of 3.4 and 10.5 kW/m<sup>2</sup>. Temperature distribution and heat transfer coefficient (HTC) along the tube were analyzed for vapor qualities above 80%, in seven sections along the length of the test section and under two heating conditions: from below and uniform. No abrupt drops in the analyzed parameters were observed, which indicates the absence of drying. However, the type of heating was found to influence the temperature difference between the upper and lower portions for both tested mass velocities, as well as the HTC. The relevance of this study lies in understanding how circumferential heating variation can influence the onset of wall drying, with implications for both heat transfer efficiency and equipment lifespan.

Keywords: dry out, ebullition, heating, circumferential, uniform.

## **Introdução**

A energia solar concentrada (CSP) representa uma fonte alternativa e renovável com grande potencial para geração de energia elétrica e térmica. A aplicação dessa tecnologia em locais remotos tem incentivado significativos investimentos em pesquisa e desenvolvimento pela indústria. Os refletores lineares de Fresnel (FLR, na sigla em inglês) para CSP demonstram potencial para reduzir os custos de produção de energia quando comparados com a tecnologia de calhas parabólicas e essa possibilidade é ainda melhorada pela combinação com a geração direta de vapor (DSG).

Conforme observado por Serrano-Aguilera et al. (2014), a CSP com DSG opera em pressões mais elevadas do que o padrão, exigindo, portanto, paredes de tubos mais espessas. Isso resulta em gradientes térmicos maiores e, conseqüentemente, em maiores tensões térmicas. Em uma revisão abrangente da combinação de CSP e DSG, Sá et al. (2018) ressaltaram suas vantagens e desvantagens. Essas usinas de energia solar possibilitam trabalhar com temperaturas mais elevadas do que aquelas que utilizam óleo térmico como fluido de transferência de calor, contudo as instabilidades no escoamento bifásico aumentam as tensões térmicas nos tubos absorvedores, enquanto as mudanças no padrão de escoamento ao longo do circuito podem afetar a transferência de calor, potencialmente levando ao empenamento e, eventualmente, a falhas.

Sá et al. (2018) observam ainda que a integração dessas tecnologias introduz complexidade nos sistemas de geração. Certos absorvedores FLR, como os trapezoidais, exibem uma distribuição não uniforme de radiação solar ao longo da circunferência. Essa característica, combinada com o escoamento bifásico, modifica o comportamento termo-hidráulico das usinas de energia solar. A falta de uniformidade na distribuição de radiação ao redor dos tubos absorvedores apresenta um desafio para a análise física e resulta em alterações no comportamento do escoamento bifásico, afetando padrões de escoamento, perda de pressão e transferência de calor.

Este estudo é motivado pela aplicação de DSG na tecnologia CSP, considerando os aspectos e condições de contorno de FLR. O presente trabalho se limita à análise de padrões de escoamento, CTC e variações de temperatura, tendo como objetivo geral da pesquisa a avaliação do comportamento do CTC para títulos de vapor elevados. Para tanto foi utilizada uma bancada experimental, onde testes foram conduzidos com velocidades mássicas de 50 e 150 kg/(m<sup>2</sup>s), fluxos de calor de 3,4 e 11,0 kW/m<sup>2</sup> e títulos de vapor superiores a 80%.

## **Metodologia**

A figura 1 apresenta o esquema do aparato experimental. Dois transmissores de pressão absoluta medem pressões de 0 a 300 kPa e um transmissor de pressão diferencial fornece a queda de pressão na seção de testes de 0 a 30 kPa. Três termopares sonda tipo T posicionados na entrada do pré-aquecedor, na entrada da seção de testes e na saída, medem as temperaturas do fluido. Um total de 21 termopares tipo E distribuídos por sete seções medem as temperaturas da parede do tubo no topo, lateral e base.

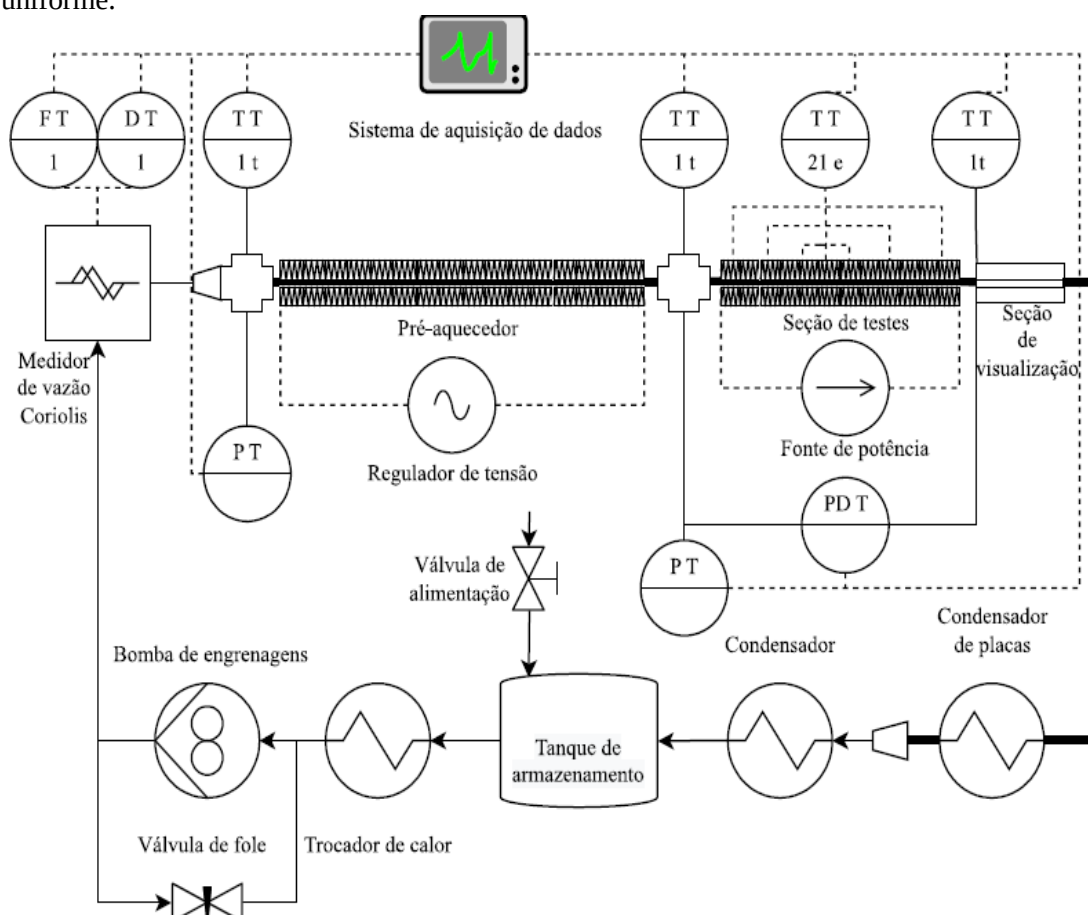
A bancada experimental é a mesma utilizada por Araújo (2023) e Araújo et al. (2024) e segue um projeto bem conhecido para experimentos de escoamento em ebulição, semelhante aos de Wang et al. (2019) e Dirker et al. (2022). Uma bomba de engrenagens direciona o fluido para o medidor de vazão

Coriolis e para o pré-aquecedor, que controla o estado termodinâmico na entrada da seção de teste através de quatro resistências elétricas de níquel-cromo, com 8 mm de largura e 0,3 mm de espessura cada, este arranjo permite três modos de aquecimento: uniforme, superior e inferior. A potência dissipada nas resistências é controlada por um regulador de tensão AC.

Segundo Lima e Tome (2012, 2013), os efeitos de curvas sobre a queda de pressão e padrões de escoamento são inferiores a 10% para distâncias maiores que  $150d$ , onde  $d$  é o diâmetro interno do tubo, exigindo para este trabalho uma seção reta de 1,6 m à montante da seção de teste, por segurança o pré-aquecedor possui 4 m de comprimento. A seção de teste possui 0,5 m de comprimento. Tanto o pré-aquecedor quanto a seção de teste são constituídas de aço inoxidável com 10,92 mm de diâmetro interno.

Os tubos são eletricamente isolados das resistências com fita Kapton®. As resistências também são cobertas com uma camada adicional de fita. Uma camada de fibra de vidro é aplicada para garantir que as resistências estejam em contato com a tubulação e um material adicional de isolamento térmico envolve todo o conjunto. Os termopares foram distribuídos pela seção de teste de forma que o primeiro é posicionado a 10 mm ( $\delta l$ ) a jusante da entrada, enquanto os seguintes estão espaçados em 80 mm ( $\Delta l$ ).

**Figura 1** – Desenho esquemático da bancada para testes de escoamento em ebulição com aquecimento não uniforme.



Fonte: Adaptado de Araújo et al. (2024).

As pontas dos termopares foram embutidas na parede do tubo, semelhante ao procedimento adotado por Dirker et al. (2022). Elas estão distantes de 0,29 mm ( $\pm 0,05$  mm) da parede interna, o que resulta em uma resistência térmica de aproximadamente  $5,94 \times 10^{-4}$  K/W. Para efeito de comparação, um fluxo de calor de 22,0 kW/m<sup>2</sup>, que é o dobro do maior valor utilizado neste trabalho, resultaria em uma diferença de temperatura entre a ponta do termopar e a parede interna de 0,22 K, valor equivalente à incerteza de calibração, portanto a temperatura da parede interna foi considerada igual à medida pelo termopar. A validação desta hipótese está descrita em Araújo et al. (2024).

De maneira similar ao adotado por Wojtan et al. (2005) e Wang et al. (2019), o padrão de escoamento na saída da seção de teste é considerado o mesmo do interno. Uma câmera de alta velocidade registra vídeos dos padrões de fluxo na seção de visualização, posicionada na saída da seção de testes. Dois retroiluminadores de alta intensidade com uma folha difusora entre eles e a seção de visualização melhoram a distribuição de contraste nas imagens, facilitando a identificação dos padrões de escoamento.

Na saída da seção de visualização, dois banhos térmicos circulam água fria por dois trocadores de calor para condensar o fluido e posteriormente o fluido volta para o tanque de armazenamento abaixo da temperatura de saturação, a 20 °C. A partir daí, o fluido passa por um trocador de calor casco e tubo, estabelecendo a temperatura de sub-resfriamento na entrada do pré-aquecedor.

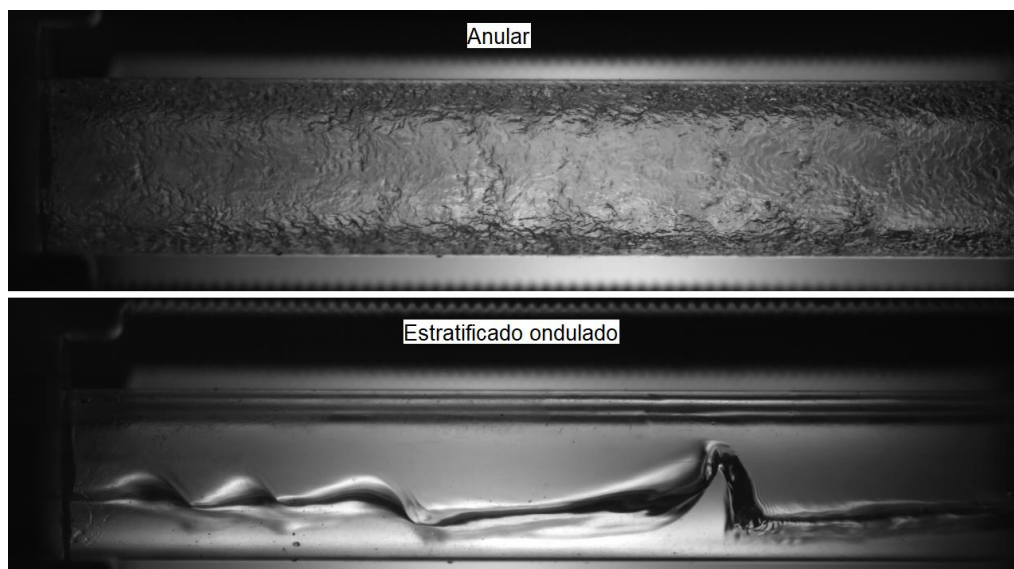
A análise de dados foi feita utilizando o mesmo procedimento descrito em Araújo (2023) e Araújo et al. (2024), assim como a validação do método de medição do CTC para aquecimento não uniforme, porém, alguns novos parâmetros foram definidos para análise dos resultados. A secagem da parede é caracterizada por uma diminuição do CTC. Isto indica a transição da transferência de calor ocorrendo pela fase líquida para a fase de vapor. Além da queda do CTC, é esperado um aumento brusco da temperatura da parede. Na secagem parcial, característica do escoamento horizontal em tubos convencionais, a diferença de temperatura entre a porção de cima e de baixo aumenta. Essa diferença de temperatura pode ser calculada pela Eq. (1) como:

$$\Delta T = T_t - T_b, \quad (1)$$

onde,  $T_t$  e  $T_b$  são as temperaturas da parte de cima e de baixo do tubo, respectivamente.

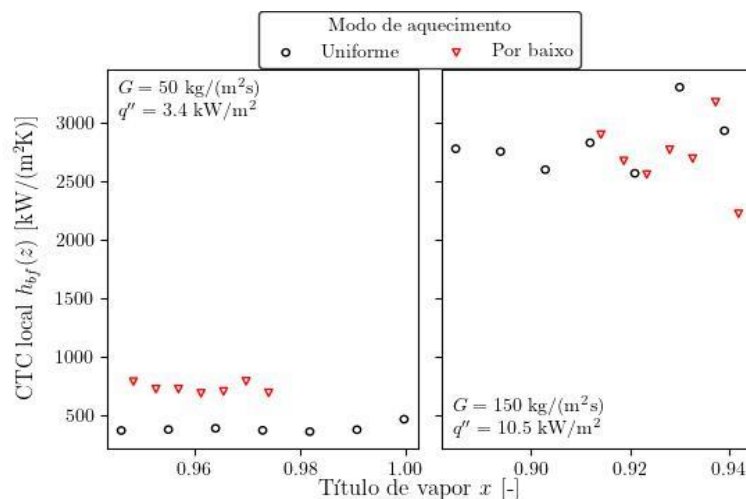
## **Resultados e Discussão**

A figura 2 ilustra os padrões de escoamento estratificado ondulado, predominante para a velocidade mássica de 50 kg/(m<sup>2</sup>s), e anular, predominante para a velocidade mássica de 150 kg/(m<sup>2</sup>s). O escoamento ocorre da direita para a esquerda. O padrão anular é caracterizado por uma película de líquido ao redor do perímetro do tubo com um núcleo de vapor em alta velocidade, enquanto o estratificado ondulado se caracteriza pelas fases líquida, na região inferior do escoamento, e o vapor, na região superior do escoamento, separados por uma interface com presença de ondulações.

**Figura 2** – Imagens da seção de visualização para escoamento anular e estratificado ondulado.

Fonte: Adaptado de Araújo (2023).

A figura 3 mostra o CTC versus o título de vapor para ambas as velocidades mássicas, 50 e 150 kg/(m<sup>2</sup>s), para os casos de aquecimento uniforme e por baixo. Para a menor velocidade mássica o CTC permanece constante, já para a maior há uma maior variação conforme se aumenta o título, todavia os resultados não mostram uma tendência clara, devido à alta flutuação nos pontos apresentados. Para nenhuma das duas velocidades mássicas o CTC apresentou uma queda brusca com aumento do título, o que indica não ter ocorrido a secagem da parede.

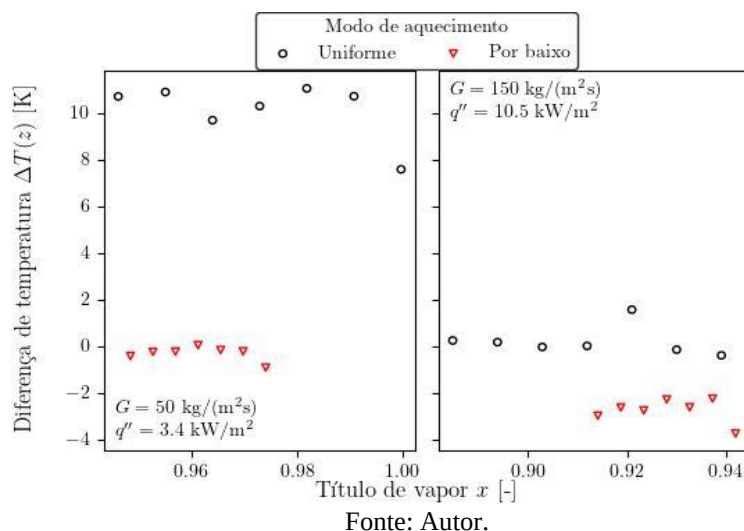
**Figura 3** – CTC versus título para as velocidades mássicas de 50 e 150 kg/(m<sup>2</sup>s).

Fonte: Autor.

A figura 4 ilustra o desenvolvimento da diferença de temperatura entre a parte superior e inferior do tubo com o título de vapor. Assim como o CTC, o comportamento apresentado pelo gráfico da diferença de temperatura não caracteriza secagem. No entanto, pode-se observar que a variação foi maior

para o aquecimento uniforme quando associado à menor velocidade mássica, enquanto para a maior velocidade mássica, houve maior gradiente para o caso do aquecimento por baixo, o que está diretamente relacionado com o tipo de aquecimento.

**Figura 4** – Diferença de temperatura versus título para as velocidades mássicas de 50 e 150 kg/(m<sup>2</sup>s).



Para a menor velocidade mássica, com escoamento estratificado ondulado, a fase líquida escoava por baixo e o vapor por cima. Como a transferência de calor é mais eficiente pela porção molhada do tubo, a temperatura da parede de baixo tende a ser inferior à de cima, o que explica a menor diferença de temperatura para o aquecimento por baixo, pois o aquecimento uniforme favorece a tendência do escoamento de gerar temperaturas mais altas na porção superior. Quando o escoamento é anular, toda a parede interna do tubo está molhada, e, portanto, a transferência de calor ocorre pela fase líquida em todo o perímetro do tubo. Nesse caso, o aquecimento uniforme apresenta temperaturas semelhantes entre a porção superior e inferior, mas o aquecimento por baixo gera uma temperatura maior na parte inferior.

## Conclusões

Os experimentos com escoamento em ebulição e aquecimento não uniforme para altos títulos de vapor não apresentaram indicações claras de secagem da parede do tubo, entretanto os resultados demonstraram comportamentos distintos relacionados aos padrões de escoamento e tipo de aquecimento. Para o fluxo com escoamento estratificado o aquecimento por baixo resultou em uma menor variação entre as temperaturas da parte de cima e de baixo do tubo, mas para o escoamento anular o cenário foi o contrário, havendo menor variação no aquecimento uniforme. Os resultados indicam que, para plantas solares que operam com geração direta de vapor em tubos horizontais, a utilização de um concentrador secundário, e consequente uniformização do fluxo de calor, é o mais indicado quando se tem escoamento anular, pois garantiria uma maior uniformização nas temperaturas, evitando possíveis falhas.

## Agradecimentos

Ao apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015. E ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa (Processo 408129/2022-0, Chamada CNPQ/MCTI 25/2022 - Linha 2/CH Setor Elétrico Na).

## Referências Bibliográficas

ARAÚJO, A. K. A. Effect of non-uniform heating on horizontal flow boiling of R141. Tese de doutorado defendida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/254949>

ARAÚJO, A. K. A. et al. Heat transfer characteristics of horizontal flow boiling with uniform and non-uniform circumferential heat flux. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 228, p. 125624, 2024.

DIRKER, J.; SCHEEPERS, H.; MEYER, J. P. The effect of circumferentially non-uniform heat flux on flow boiling heat transfer in a horizontal tube. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Elsevier, v. 185, p. 122428, 2022. 4, 2, 3, 6, 7, 46, 47, 86, 91, 103, 109.

LIMA, R.J.D.S.; THOME, J.R. Two-phase flow patterns in U-bends and their contiguous straight tubes for different orientations, tube and bend diameters. **International Journal of Refrigeration**, 35 (5) (2012) 1439–1454.

LIMA, R.J.D.S.; THOME, J.R. Two-phase flow pressure drops in U-tubes: Towards more accurate measurement methods and prediction models. **International Journal of Refrigeration**, 36 (2) (2013) 492–503.

SÁ, A. B. de; FILHO, V. C. P.; TADRIST, L.; PASSOS, J. C. Direct steam generation in linear solar concentration: Experimental and modeling investigation—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 90, p. 910–936, 2018. 2, 3.

SERRANO-AGUILERA, J.; VALENZUELA, L.; PARRAS, L. Thermal 3d model for direct solar steam generation under superheated conditions. **Applied Energy**, Elsevier, v. 132, p. 370–382, 2014. 2, 100.

WANG, D.; ZHAO, L.; NIE, X.; LU, Y.; DENG, S. Experimental study on flow boiling characteristics of R-245fa in circular tube under non-uniform heat flux. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 143 (2019) 118570.

WOJTAN, L.; URSENBACHER, T.; THOME, J.R. Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part I—A new diabatic two-phase flow pattern map. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 48 (14) (2005) 2955–2969.