

Análise da fluidodinâmica em leito fluidizado gás-sólido sob regime slugging

Fluidodynamic analysis of a gas-solid fluidized bed under slugging regime

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento fluidodinâmico de um leito fluidizado gás-sólido, sob regime *slugging*. Para a realização dos ensaios utilizou-se partículas de areia quartzosa de dois diâmetros médios distintos, uma coluna cilíndrica, uma faixa de alturas de leito e uma variada vazão de ar circulante no sistema. Para a obtenção dos resultados, analisou-se as flutuações de pressão do leito por meio da Transformada de Fourier e, com isso, identificou-se a frequência dominante do fenômeno empistonado para cada condição de experimentação. Os resultados mostraram que o aumento da altura do leito de partículas resulta na redução da frequência dominante média das bolhas no regime. Além disso, os experimentos envolvendo partículas de maior diâmetro apresentaram uma tendência de queda gradativa da frequência dominante com o aumento da velocidade do ar em excesso.

PALAVRAS-CHAVE: Fluidização. Transformada de Fourier. escoamento bifásico.

ABSTRACT

The main purpose of this paper is to analyze the fluid dynamic behavior of a gas-solid fluidized bed, under the slugging regime. To execute the tests, were used: quartz sand particles of two different average diameters, a cylindrical column, a range of bed heights, and a varied flow of air circulation on the system. The bed pressure fluctuations were analyzed using Fourier Transform and, with that, we identified the dominant frequency of piston phenomenon for each experimentation condition. The results showed that the increase of bed height causes a decrease in the mean dominant frequency of bubbles in the regime. Also, experiments involving larger diameter particles tended to gradually decrease the dominant frequency when increasing the excess air velocity.

KEYWORDS: Fluid bed process. Fourier transform. Two-phase flow.

Eric Keen Torigoe

erictorigoe@hotmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Maria Regina Parise

parise@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Jhon J. Ramirez Behainne

jhon@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

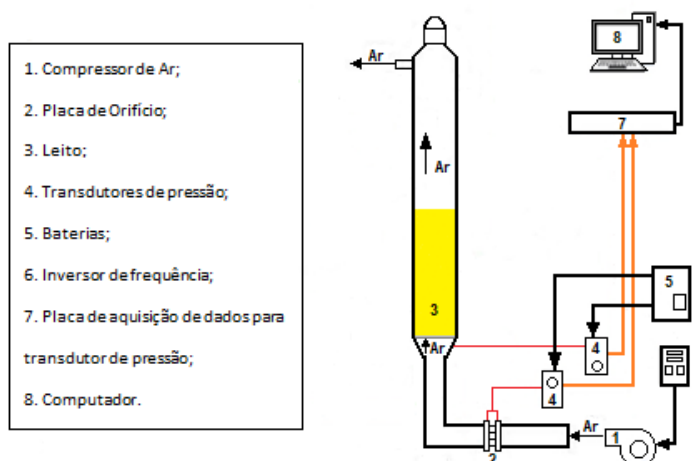
No âmbito industrial, o fenômeno da fluidização é representado por uma ampla aplicabilidade em processos envolvendo conversão de energia, produção de fármacos, operações petroquímicas, processamento de minerais e processos físicos como secagem (BASU, 2006). Implementado, por exemplo, em equipamentos envolvendo transferência de calor, por meio de leitos fluidizados borbulhantes, é possível obter rápido transporte de energia e uniforme temperatura do leito decorrente da eficiente agitação de suas partículas no sistema. Além disso, também pode-se mencionar sua presença nas reações catalíticas, especialmente para aquelas altamente exotérmicas e sensíveis a mudanças de temperatura, como a produção de anidrido ftálico por meio da oxidação catalítica de naftalina ou orto-xileno (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

O regime de fluidização do tipo *slugging* ocorre em determinados leitos com colunas de diâmetro reduzido, e é caracterizado pela formação de bolhas que preenchem todo o diâmetro do recipiente de fluidização e estabelecem um escoamento pistonado (KUNII e LEVENSPIEL, 1991). Esse tipo de regime de fluidização pode ser encontrado, por exemplo, na indústria do petróleo, onde é amplamente utilizado e classificado como facilitador do processo de exploração e transporte de sistemas multifásicos em tubulações situados em alto mar (ZHOU, 2018). No âmbito laboratorial, esse regime é normalmente analisado através de medidas de flutuações de pressão no leito, e tais dados são derivativos principalmente da formação de bolhas perto do distribuidor de gás, do fluxo de jato do fluido circulante e pela erupção das bolhas na superfície do leito (BOYCE, 2014).

MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Sistemas Gás-sólido da UTFPR/campus Ponta Grossa. O sistema experimental foi composto por uma coluna de acrílico de 1,01 m de altura com diâmetro interno de 0,11 m. A Figura 1 representa de forma esquemática o sistema experimental utilizado.

Figura 1 – Esquema do sistema experimental



Fonte: Autoria própria (2020)

O material particulado utilizado para compor o leito foi areia quartzosa, sendo está classificada como tipo B (Geldart, 1973), possuindo densidade aparente de 2559 kg/m^3 , e dois diâmetros médios, um de $210 \mu\text{m}$ e outro de $449 \mu\text{m}$. Foram utilizadas as técnicas de picnometria líquida e de peneiramento para a determinação da densidade e do diâmetro médio das partículas, respectivamente.

As velocidades de mínima fluidização para as partículas de areia foram obtidas experimentalmente através da análise da curva fluidodinâmica. Por um outro lado, a fim de verificar a velocidade de mínima fluidização teórica das partículas utilizadas no sistema, e poder comparar com os resultados obtidos experimentalmente, utilizaram-se as seguintes equações apresentadas por BASU (2006):

$$Re_{mf} = \frac{U_{mf} d_p \rho_g}{\mu} = [C_1^2 + C_2 Ar]^{0,5} - C_1 \quad (1)$$

sendo C_1 e C_2 números empíricos que assumem valores de 27,2 e 0,0408, respectivamente; Re_{mf} representa o número de Reynolds na mínima fluidização; U_{mf} é a velocidade de mínima fluidização teórica a ser determinada; d_p é o diâmetro médio das partículas; ρ_g é a densidade do ar, μ é a viscosidade dinâmica do ar, e, Ar , é o número de Archimedes.

O número de Archimedes é determinado pela Equação 2:

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) g d_p^3}{\mu^2} \quad (2)$$

sendo ρ_p a densidade do sólido particulado.

Para a realização dos experimentos envolvendo a regime *slugging* montou-se um planejamento das condições a serem analisadas durante o estudo. Todos os ensaios foram realizados a temperatura ambiente (25°C), com as outras condições pré-estabelecidas sendo apresentadas na Quadro 1.

Quadro 1 – Condições experimentais do ensaio

Tipo de Partícula	\bar{d}_p [μm]	Altura do Leito [cm]	$U_o - U_{mf}$ [m/s]
Areia Quartzosa	210	33-38-43-48-53-58	Uma faixa de 0,4 - 2
	449		

Fonte: Autoria própria (2020)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

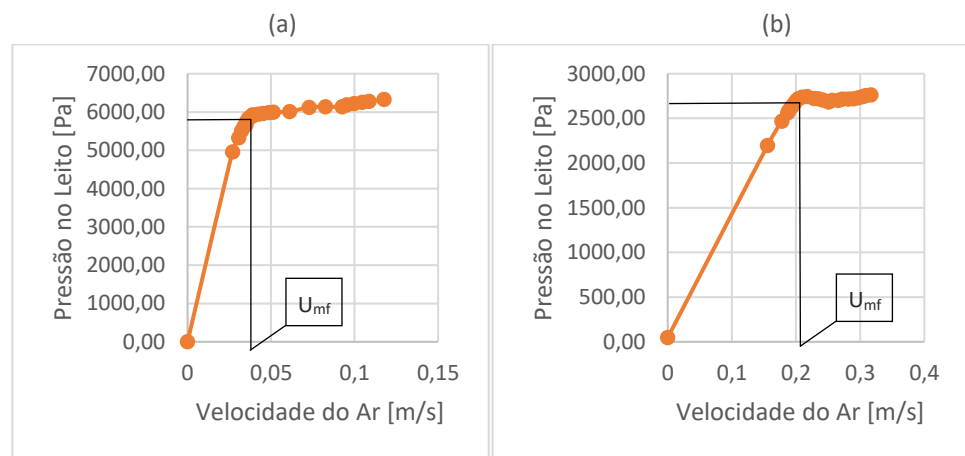
Antes do início da execução dos experimentos envolvendo o regime *slugging*, foram realizados testes preliminares com o intuito de determinar a frequência de amostragem e o número de pontos de pressão a serem considerados nos testes definitivos. Primeiramente, foram testadas as mesmas configurações usadas para uma análise de curva fluidodinâmica (sendo com frequência de 400 Hz e amostragem de 2048 pontos). Com isso, pode-se verificar que havia uma

considerável oscilação na frequência dominante para uma velocidade superficial do ar inalterada, juntamente com uma não expressiva curva característica da frequência dominante. A fim de corrigir tal problema no comportamento dos dados, decidiu-se aumentar o tempo de ciclo de cada análise, sendo assim, reduziu-se a frequência (para 100 Hz) e aumentou-se a amostragem (para 18432 pontos). Por meio dessa alteração, ampliou-se a duração de cada análise em 36 vezes, e, como benefício, obteve-se uma resposta mais confiável correspondente à uma média da frequência dominante para um período maior de teste.

Também é importante mencionar que houve uma limitação da velocidade superficial do ar para os experimentos envolvendo altura de leito de partícula de 58 cm, devido ao comprimento insuficiente da coluna de fluidização disponível. Neste caso, com o aumento da velocidade do ar além do que foi apresentado nos resultados, poderia haver perdas de material particulado devido ao seu arraste para fora do sistema. Não desejando-se tal interferência, foi adotada essa medida restritiva na experimentação.

As velocidades de mínima fluidização para as partículas de areia com diâmetro médio de 210 μm e 449 μm foram obtidas tanto experimentalmente, por meio da análise de sua curva fluidodinâmica (Figura 2), quanto através dos cálculos expressos nas equações (1) e (2). Esses valores são apresentados no Quadro 2.

Figura 2 – Curva fluidodinâmica da areia quartzosa de (a) $\bar{d}_p = 210 \mu\text{m}$ (b) $\bar{d}_p = 449 \mu\text{m}$



Fonte: Autoria própria (2020)

Quadro 2 – Velocidades de mínima fluidização teóricas e experimentais

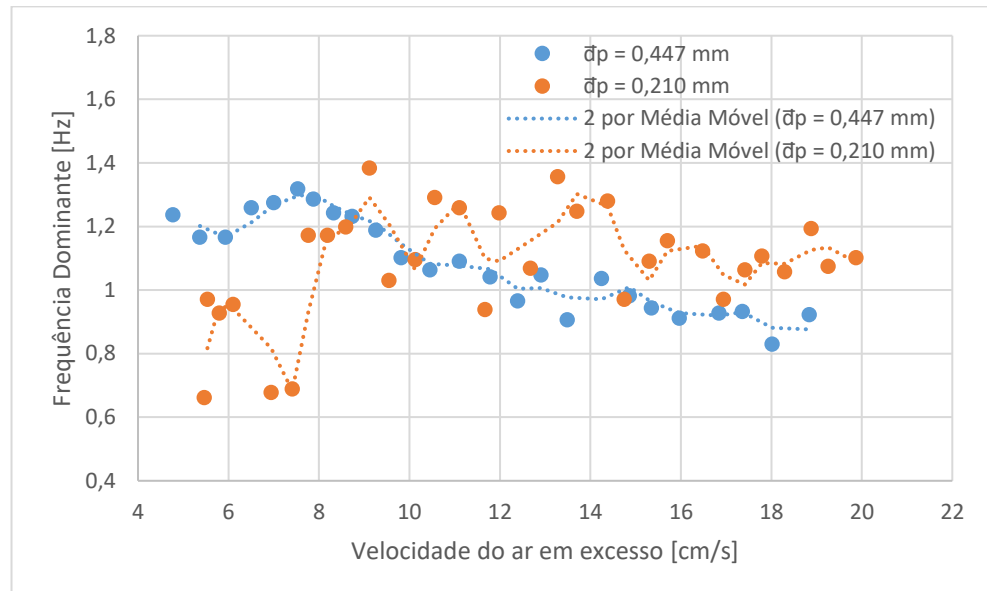
Tipo de Partícula	\bar{d}_p [μm]	$U_{mf,teórico}$ [m/s]	$U_{mf,exp}$ [m/s]
Areia Quartzosa	210	0,0445	0,0389
	449	0,1871	0,2092

Fonte: Autoria própria (2020)

Após a conclusão desses preparativos, iniciou-se o desenvolvimento dos experimentos principais deste estudo. Para isso, preencheu-se a coluna com areia à uma altura pré-definida e iniciou-se a sua fluidização por meio do fornecimento contínuo de ar. Havendo o acompanhamento da frequência dominante sob o leito de partículas no regime *slugging*, de forma gradativa aumentou-se a velocidade superficial do gás após cada ciclo de coleta de dados. A Figura 3 mostra o perfil da frequência dominante em relação à velocidade do gás em excesso empregado no

sistema, para a altura de leito de 43 cm e diâmetros médios de partícula de 0,210 e 0,447 mm.

Figura 3 – Perfil da frequência dominante com o acréscimo na velocidade superficial do ar na condição de 43 cm de altura do leito.



Fonte: Autoria própria (2020)

Por meio dessa análise é possível verificar que as partículas de menor diâmetro tendem a variar mais sua frequência dominante com o acréscimo da velocidade superficial do ar. Não seguindo uma tendência muito definida, quando comparada com as partículas de maior diâmetro, tem-se que as mesmas não assumem um comportamento passível de concreta previsão. Além disso, verifica-se que as partículas de maior diâmetro, tendem reduzir a frequência dominante com o acréscimo da velocidade superficial do ar.

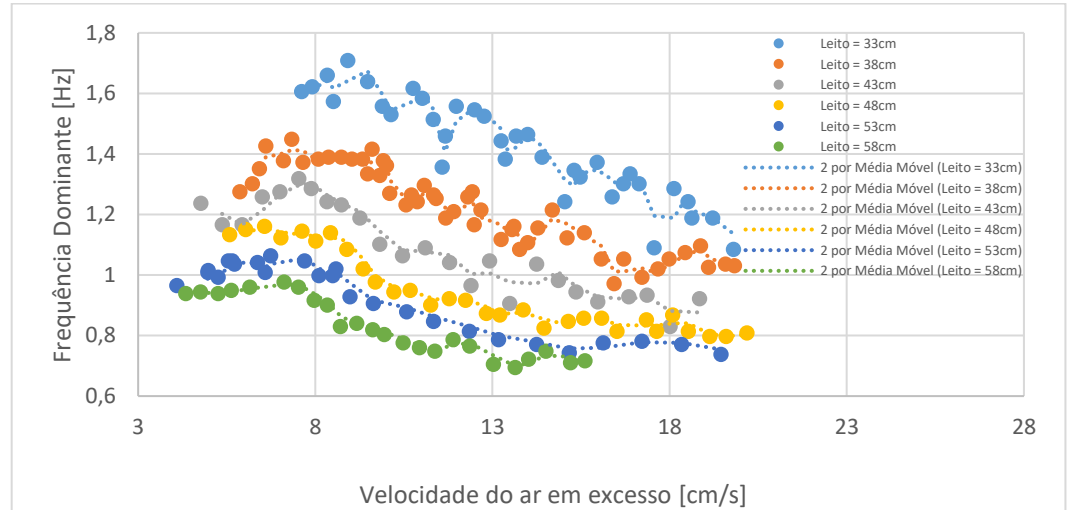
Diferentemente do que foi proposto por Geldart (1974), os experimentos deste estudo envolvendo o regime *slugging* não apresentaram o mesmo comportamento do seu estudo, isto é, em nenhum dos casos foi confirmada:

- a) A formação de uma curva inicialmente crescente da frequência dominante, decorrente do aumento da velocidade superficial do ar;
- b) O estabelecimento do ponto de *slugging* incipiente, seguido da estagnação da frequência dominante independentemente do acréscimo da velocidade superficial.

Cabe destacar também que houve problemas na análise de experimentos envolvendo baixas velocidades do ar em excesso ($[U_0 - U_{mf}] < 5$ cm/s), uma vez que a curva do gráfico da frequência dominante obtida nesses casos não se mostrava expressiva e exata. Isto pode indicar a necessidade de apurar o método empregado para ensaios nessa faixa operacional.

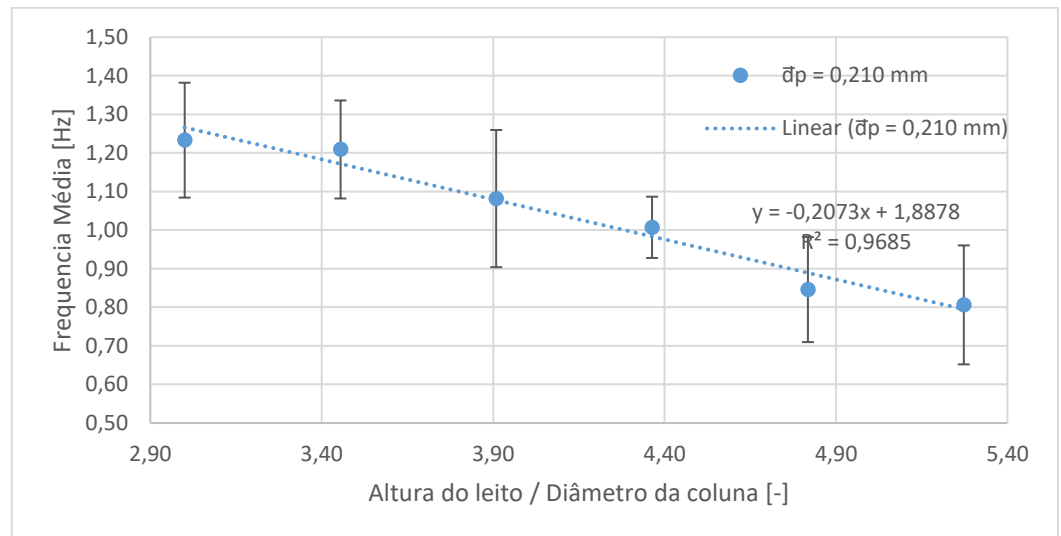
As Figura 4 e 5 mostram comparativos contendo todos os testes realizados no regime *slugging*, para diâmetro de partícula de 449 μm e 210 μm , respectivamente.

Figura 4 – Perfil da frequência dominante em relação à velocidade do ar em excesso, com altura de leito entre 33 e 58 cm, e $\bar{d}_p = 449 \mu\text{m}$



Fonte: Autoria própria (2020)

Figura 5 – Perfil da frequência dominante em relação à altura do leito/diâmetro da coluna, para $\bar{d}_p = 210 \mu\text{m}$



Fonte: Autoria própria (2020)

Na Figura 4, que ilustra os resultados obtidos em todas as alturas de leito e velocidades superficiais de ar analisadas, é possível verificar a influência produzida pela altura do leito sobre a frequência dominante e consequente formação de bolhas no sistema. Todas as situações confirmam a presença de um comportamento inversamente proporcional, uma vez que para menores alturas de leito verificam-se maiores frequências dominantes. Esse resultado pode ser explicado pela maior compactação das partículas no leito e da dificuldade que tal condição traz na movimentação ascendente das bolhas no meio de uma maior coluna de material particulado.

Na Figura 5 relaciona-se a média da frequência dominante com o valor adimensional da razão entre a altura do leito de partículas e o diâmetro da coluna utilizada. Com isso, pode-se encontrar uma equação de primeiro grau proporcional a essa média em todos os casos e estabelecer que, na faixa experimental testada, o valor médio da frequência dominante de todas as alturas pode cair quase 40% numa variação de ar em excesso de 6 a 20 cm/s.

CONCLUSÃO

Analisou-se de forma comparativa o comportamento da frequência dominante para as duas diferentes partículas quando submetidas ao regime *slugging*. Para os experimentos envolvendo partículas de $\bar{d}_p = 210 \mu\text{m}$, verificou-se uma não uniforme variação da frequência dominante, diferentemente do que foi observado nas partículas de $\bar{d}_p = 449 \mu\text{m}$ os quais apresentaram uma gradativa redução da frequência dominante com o aumento da velocidade superficial do gás em excesso. Por um outro lado também foi verificado que, nos experimentos de ambas as partículas, visualizou-se uma diminuição da frequência dominante com o aumento da altura do leito, o qual foi ocasionado pela maior quantidade de material particulado presente no sistema. Tal fator contribuiu para promover a ocorrência do efeito pistonado com frequências gradativamente menores.

Os resultados deste estudo não apresentaram um comportamento similar aos apresentados por Geldart (1974). Em vista disso, sugere-se a realocação da tomada utilizada na coleta das pressões acima do distribuidor de ar, a fim de verificar se há mudanças significativas no comportamento da frequência dominante em regime *slugging*, devido a uma possível atenuação da intensidade dos sinais de flutuação de pressão, o que poderia explicar as diferenças encontradas em relação às informações da literatura.

REFERÊNCIAS

BAEYENS, J.; GELDART, D. An investigation into slugging fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, Great Britain, v. 29, p. 255-265, 1974. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(74\)85051-7](https://doi.org/10.1016/0009-2509(74)85051-7). Acesso em: 20 mar. 2020.

BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized beds**. 1. ed. Halifax, Nova Scotia: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 460 p. ISBN 978-0849333965.

BOYCE, C.M.; DAVIDSON, J.F.; HOLLAND, D.J.; SCOTT, S.A.; DENNIS, J.S. The origin of pressure oscillations in slugging fluidized beds: comparison of experimental results from magnetic resonance imaging with a discrete element model. **Chemical Engineering Science**, v. 116, p. 611-622, 6 set. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.05.041>. Acesso em: 20 mar. 2020.

ÇENGEL, Y.A.; CIMBALA, J.M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. 1. ed. Porto Alegre: AMGH, 2007. 846 p. ISBN 8586804584.

FELIPE, C. A. S. **Identificação e monitoramento de regime fluidodinâmico em leitos fluidizados gás-sólido**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/267692>. Acesso em: 17 mar. 2020.

GELDART, D. Types of gas fluidization. **Powder Technology**, Lausanne, v. 7, p. 285-292, 1973. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(73\)80037-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(73)80037-3). Acesso em: 20 mar. 2020.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. 2. ed. United States of America: Butterworth-Heinemann, 1991. 491 p.

PARISE, M. R. **Aplicação da distribuição espectral normal em leito fluidizado gás-sólido**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/266232>. Acesso em: 20 mar. 2020.

TURINI, B. A. F. **Avaliação experimental do coeficiente de transferência de calor suspensão-parede em regime de leito fluidizado borbulhante monitorado pelo método da frequência central gaussiana**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2541>. Acesso em: 20 mar. 2020

ZHOU, H.; GUO, L.; YAN, H.; KUANG, S. Investigation and prediction of severe slugging frequency in pipeline-riser systems. **Chemical Engineering Science**, v. 184, p. 72-84, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.03.050>. Acesso em: 20 mar. 2020.