

SUBMETIDO 02/05/2022

APROVADO 14/07/2022

PUBLICADO ON-LINE 11/08/2022

PUBLICADO 10/04/2024

EDITORES ASSOCIADOS

José Carlos Lima Júnior e Adriano  
da Silva Marques

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2022id6847>

ARTIGO ORIGINAL

## Slug flow em riser de extração de petróleo em águas profundas: uma análise numérica profunda e proposta de diagnóstico

 Priscilla Perussolo  
Cunico Conrado <sup>[1]</sup>

 Koje Daniel  
Vasconcelos Mishina <sup>[2]</sup>

 Marcelo Cavalcanti Rodrigues <sup>[3]\*</sup>

[1] [pri.conrado@gmail.com](mailto:pri.conrado@gmail.com)

[3] [marcelo.labii@gmail.com](mailto:marcelo.labii@gmail.com)

Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica, Universidade  
Federal da Paraíba (UFPB), Brasil

[2] [kojemishina@gmail.com](mailto:kojemishina@gmail.com)

Departamento de Engenharia Mecânica,  
Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil

**RESUMO:** O *slug flow* em *risers* de extração de petróleo em águas profundas é um fenômeno amplamente conhecido por seu potencial destrutivo nos casos em que esse efeito se torna extremo, fazendo com que a pressão se acumule e, conseqüentemente, origine o fluxo de pressão oscilante. Esse tipo de escoamento ocorre devido à característica multifásica na extração do óleo, formada geralmente pelas fases óleo e ar (gás). Ao longo de toda a história da extração de petróleo, o controle e reconhecimento desse padrão de fluxo gera desafios à engenharia de poços, e ainda hoje o método de mitigação e controle utilizado é subjetivo e dependente da experiência do operador de sonda. A proposta deste artigo é apresentar uma ferramenta de diagnóstico utilizando inteligência artificial a partir das informações de variação de pressão (velocidades de escoamento) coletadas pelos sensores do BOP (*Blow Out Preventer*) para o reconhecimento do fluxo de golfadas (*slugging*). Para analisar o *slugging* em toda a sua faixa e variação de velocidades, aplica-se uma análise numérica fluidodinâmica computacional (CFD) utilizando o software ANSYS Fluent. Os mapas identificadores dos tipos de escoamento devidos à velocidade de escoamento das fases, amplamente aceitos na literatura pertinente, foram utilizados para validar os resultados encontrados na análise CFD, comprovando que o modelo implementado neste estudo está em consonância com o fenômeno real. Os resultados obtidos foram usados para gerar um banco de dados que possibilitou o desenvolvimento de uma rede neural para diagnóstico de *slugging*. Algumas maneiras de controlar ou mitigar o *slugging* pesado também são discutidas.

**Palavras-chave:** CFD; óleo e gás; rede neural artificial; *riser*; *slug flow*.

## Slug flow in deep water oil extraction riser: an in-deep numerical analysis and diagnostic proposal

**ABSTRACT:** *Slug flow in deepwater oil extraction risers is a phenomenon widely known for its destructive potential in cases where this effect becomes extreme,*

\*Autor para correspondência.

causing pressure to build up and, consequently, give rise to fluctuating pressure flow. This type of flow occurs due to the multiphase characteristic in oil extraction, usually formed by the oil and air (gas) phases. Throughout the history of oil extraction, the control and recognition of this flow pattern has created challenges for well engineering, and even today the mitigation and control method used is subjective and dependent on the experience of the rig operator. The purpose of this article is to present a diagnostic tool using artificial intelligence from the information on pressure variation (flow velocities) collected by the BOP (Blow Out Preventer) sensors for the recognition of the flow of slugs (slugging). To analyze the slugging in its entire range and speed variation, a computational fluid dynamics (CFD) numerical analysis is applied using the ANSYS Fluent software. The maps identifying the types of flow due to the velocity of the phases, widely accepted in the relevant literature, were used to validate the results found in the CFD analysis, proving that the model implemented in this study is in line with the real phenomenon. The results obtained were used to generate a database that enabled the development of a neural network for slugging diagnosis. Some ways to control or mitigate heavy slugging are also discussed.

**Keywords:** artificial neural network; CFD; oil-gas; riser; slug flow.

## 1 Introdução

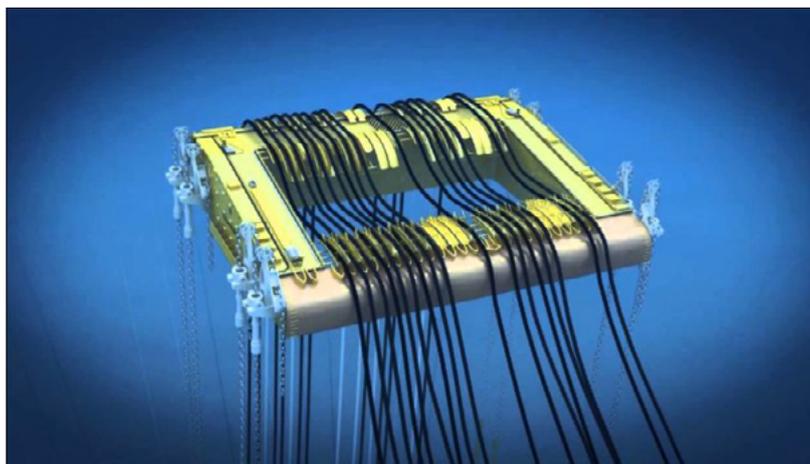
Atualmente, os estudos de controle do *slug flow* (escoamento em golfadas) são desenvolvidos para reduzi-lo ou eliminá-lo, porém esse controle pode diminuir a produção de petróleo e gás. De acordo com Pedersen, Durdevic e Yang (2017), o *slug* é um fenômeno bem definido. Prevê-se que os desafios induzidos por *slugs* serão ainda mais graves como consequência dos *risers* verticais mais longos causados por E&P (Exploração e Produção) em águas profundas no futuro. Existem três subseções conectadas de sistema específico; uma delas é a seção de dutos de transporte submarino, que consiste em um duto de transporte que segue do mar até o leito e o trecho de *riser* vertical (Bai; Bai, 2016).

Os *risers* marinhos podem ter configurações distintas dependendo dos requisitos do projeto, que são ambientalmente dependentes. A configuração mais difundida é a catenária (curva plana) (Bai; Bai, 2016). O aumento da profundidade de extração tornou necessário o uso de boias para sustentação das linhas do *riser* devido ao aumento da profundidade e do próprio peso do *riser*. A Figura 1 mostra uma das boias em uso pela Petrobras.

**Figura 1** ▶

Boia do riser.

Fonte: Montenegro (2019)

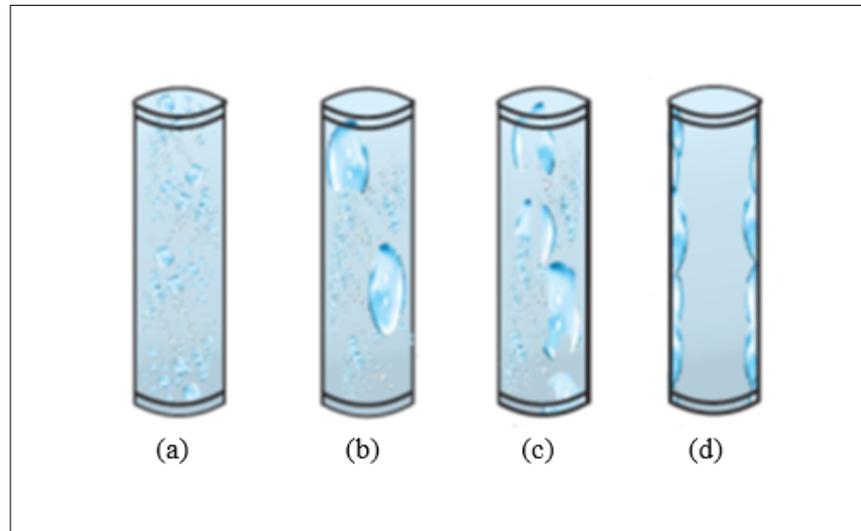


Embora os *risers* de extração possam assumir diferentes formas, o fluxo é ascendente e, portanto, definido como vertical. As características diferem entre fluxos horizontais e verticais. Segundo Taitel, Barnea e Dukler (1980), alguns dos principais padrões de escoamento multifásicos conhecidos são fluxo de bolhas, fluxo de golfadas (*slugs*), fluxo agitado e fluxo anular, como pode ser visualizado na Figura 2.

**Figura 2** ►

Padrões de fluxo verticais:  
(a) Fluxo de bolhas; (b) Fluxo de golfadas; (c) Fluxo agitado; (d) Fluxo no anular.

Fonte: adaptado de Taitel, Barnea e Dukler (1980)



O escoamento multifásico pode ser visto em muitas aplicações, podendo ser induzido ou ocorrer naturalmente, como no caso da extração de óleo. No reservatório, geralmente há petróleo, gás natural, água e sedimentos. A composição exata varia de acordo com as especificidades de cada reservatório. No entanto, as duas principais fases são o gás e o petróleo; por isso esse fluxo é tratado como gás-líquido (Andreolli, 2016).

O padrão de fluxo de golfada é definido como o fluxo de um *slug* gasoso conhecido como bolha de Taylor, com bolhas menores dispersas em sua cauda e na fase líquida. A bolha de Taylor, segundo Abdulkadir *et al.* (2010), teve seu primeiro modelo matemático, em relação à sua velocidade ascendente, apresentado por Nicklin, Wilkes e Davidson (1962). Desde então, estudos foram desenvolvidos com o objetivo de prever e mitigar o *slugging*.

Taitel (1986) realizou diversos estudos sobre o *slug flow*, publicando a dinâmica do *slugging* severo. De acordo com seu estudo, o líquido se acumula na parte inferior do *riser*, bloqueando a passagem do gás, o que fará com que o gás na entrada do *riser* comece a comprimir a coluna de líquido. Isso aumentará a pressão no sistema até que esta seja suficiente para mover a coluna de líquido, fazendo a sustentação. Quando isso acontece, a coluna vai explodir na saída do *riser*, o que é conhecido como *blowout*. Esse efeito pode então se repetir, pois, com o rápido alívio da pressão, ele tende a diminuir de forma drástica novamente e causar outra retenção de líquido.

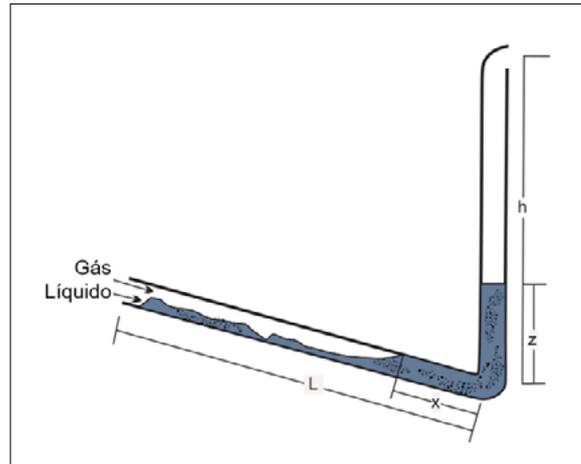
Segundo Taitel (1986), o escoamento de golfadas extremas é formado nas seguintes etapas:

- O líquido entrando na tubulação se acumula na parte baixa do tubo e causa um bloqueio à passagem do gás, fazendo com que ele seja comprimido na entrada, conforme mostra a Figura 3.

**Figura 3** ▶

Passo 1 para a formação de golfada extrema.

Fonte: adaptado de Taitel (1986)

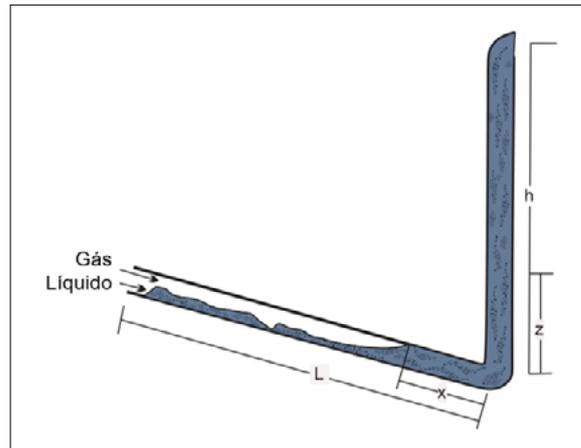


- Quando a altura da coluna líquida ( $z$ ) se iguala à altura da tubulação ( $h$ ), começa a entrada do *slug* líquido no aparato que se encontra no topo do *riser*, conforme Figura 4.

**Figura 4** ▶

Passo 2 para a formação de golfada extrema.

Fonte: adaptado de Taitel (1986)

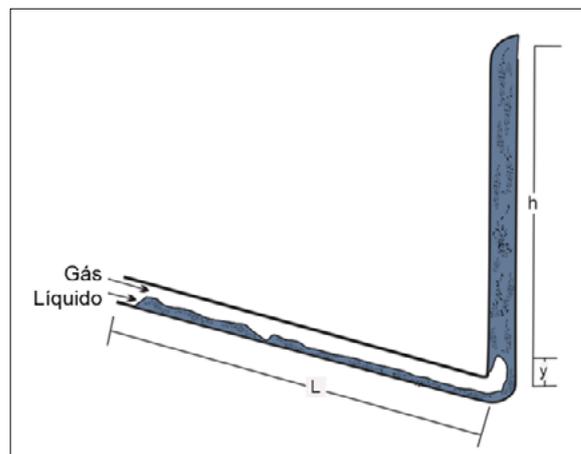


- Quando o gás que estava comprimido na entrada do tubo, por conta do bloqueio causado pela coluna líquida, alcança a base da tubulação, o líquido começa a fluir para o topo com uma velocidade bastante elevada, fenômeno conhecido como *blowout*. Na Figura 5, apresenta-se o *blowout*.

**Figura 5** ▶

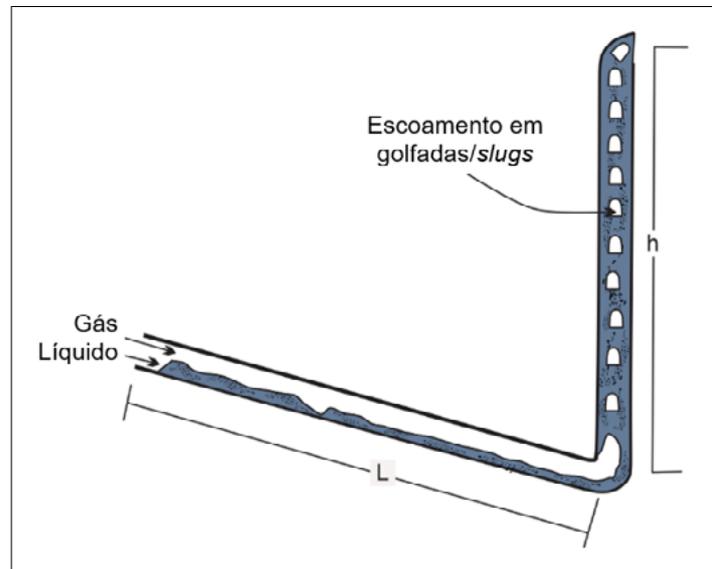
Ilustração do efeito *blowout*.

Fonte: adaptado de Taitel (1986)



- Por último, antes de o ciclo iniciar novamente, tem-se uma diminuição de pressão, a qual causa a queda do líquido, que volta a se acomodar na base do duto, reiniciando o processo. Na Figura 6, apresenta-se a operação estável.

**Figura 6** ▶  
Operação estável.  
Fonte: adaptado de  
Taitel (1986)



Perez (2007) publicou que a frequência de golfadas periódicas pode ser definida usando a densidade espectral de potência (PSD).

Segundo Oliveira Junior (2011), existem dois fatores que podem causar o recalque de líquido no fundo do *riser*, que então progride em *kick* ou *blowout* dependendo do tamanho do retentor, que são os efeitos hidrodinâmicos ou geométricos. O fator geométrico está se tornando cada vez mais complexo. Com a linha do *riser* se tornando longa, a pressão necessária para o fluxo também aumenta.

De acordo com Nilsen (2012), existem dois métodos principais de controle do escoamento de *slugs*. O primeiro e mais convencional consiste em uma válvula de estrangulamento no topo da tubulação e o segundo é um “agarrador” de *slugs*. A válvula de estrangulamento é de longe o método mais utilizado, por ser mais barato, bastante difundido e funcionar relativamente bem. O problema desse método é que, cada vez que a válvula é utilizada para controlar a flutuação de pressão, ocorre uma perda na produção, sem contar que a sua necessidade ou não é baseada na experiência do operador, o que faz com que esse método esteja sujeito a erros. O “agarrador” de *slugs* é um método mais caro e deve ser previsto desde a fase de projeto, sendo dependente de uma estimativa fidedigna do tamanho dos *slugs*.

Nilsen (2012) fez um projeto de especialização no intuito de identificar as diferenças de comportamento de *risers* em formato “S” e em formato “L” no que diz respeito ao escoamento com padrão intenso de golfadas. Utilizou simulação no software OLGa e experimentos laboratoriais, com a justificativa de que o desenvolvimento de um bom modelo de caracterização do sistema é a base para o controle. O mecanismo de geração do escoamento de *slugs* junto com os métodos disponíveis para controle desse escoamento foram discutidos. Comparações entre abordagem experimental e numérica foram feitas; algumas divergências foram encontradas, porém demonstra-se que ambos os grupos de dados gerados seguem a mesma tendência.

Ruas (2016) desenvolveu uma análise teórica, aplicando a equação da energia em um escoamento multifásico (óleo-gás) para obter os campos térmicos, buscando

solucionar as equações que regem esse tipo de escoamento. Para isso, aplicou a técnica da transformada integral generalizada e criou uma rotina no FORTRAN para obtenção da solução numérica.

Portanto, identificar o *slug flow* e mitigá-lo, caso não seja possível evitá-lo completamente, pode aumentar a produtividade e reduzir os riscos. Para isso, este trabalho propõe desenvolver um diagnóstico a partir de dados dos sensores de pressão presentes no BOP (*Blow Out Preventer*), instalados na cabeça do poço, e utilizar redes neurais artificiais para detectar o padrão do escoamento no *riser*, isto é, identificar se está ocorrendo *slug flow*.

Na sequência, o artigo descreve, na seção 2, a metodologia proposta, com análise numérica fluidodinâmica, aplicação de técnicas de processamento de sinais e o desenvolvimento da rede neural. Em seguida, apresentam-se os resultados e as discussões, na seção 3, com a conclusão do artigo na seção 4.

## 2 Metodologia

Apresentam-se o desenvolvimento e resultados da análise computacional fluidodinâmica (CFD) para obtenção dos escoamentos a partir de dados de entrada de velocidade de gás e líquido; em seguida aplica-se a densidade espectral de potência nos resultados numéricos de escoamento, em que se observa o padrão do *slug flow*. Esses resultados serão usados para alimentar a rede neural artificial.

### 2.1 Análise computacional fluidodinâmica

Para diagnosticar o *slug flow*, é necessário identificar seu comportamento típico. Pedersen, Durdevic e Yang (2015) publicaram um artigo de revisão do estado da arte em detecção de *slugging* e de técnicas de controle. Entre as técnicas de detecção, estão os mapas de padrões de escoamento já citados anteriormente e critérios matemáticos. Esses critérios são úteis em fase de projeto, visto que são capazes de prover de alguns parâmetros limitantes de projeto. Porém, eles requerem informações de pressão na base do *riser* ou informação das fases líquida e gasosa, além de uma caracterização construtiva extensa. Ambos os requerimentos não são realísticos quando se pensa em uma unidade de extração em operação real. De acordo com os autores supracitados, o alinhamento desses modelos de critérios teóricos com a análise de dados em tempo real levaria a melhores resultados de detecção do escoamento em golfadas.

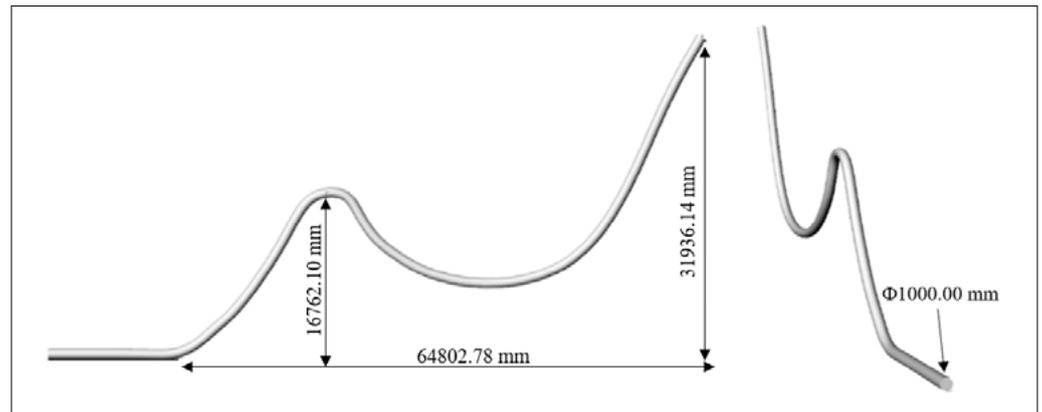
Outros estudos experimentais foram realizados por Jahanshahi, Backi e Skogestad (2017), Mendes *et al.* (2011), Nilsen (2012), Silva (2006), Taitel, Barnea e Dukler (1980) e Valdivia *et al.* (2007). Os estudos experimentais são caros e exigem grandes instalações, além disso, não é possível manter simultaneamente similaridade dinâmica, cinemática e geométrica. Valdivia *et al.* (2007) desenvolveram um experimento no qual a similaridade incompleta com o modelo teve que ser assumida para reproduzir o padrão de escoamento desejado, em virtude dos efeitos capilares e viscosos devidos ao diâmetro reduzido.

Portanto, este trabalho realiza uma análise computacional fluidodinâmica (CFD) a partir de um modelo numérico em forma de duas catenárias com uma curva mais acentuada simulando a presença da boia do *riser* aproximadamente no meio do modelo. Para evitar os problemas presentes nas análises experimentais, foi escolhido o diâmetro

considerável de 1 m. Esse diâmetro permite que os efeitos da capilaridade não sejam levados em consideração e os efeitos viscosos sejam bem desenvolvidos no escoamento. O comprimento do *riser* foi escolhido arbitrariamente, pois diferentes instalações possuem comprimentos diferentes e o objetivo era identificar o comportamento da assinatura, e não realizar análises para um caso específico. O comprimento reto entre a entrada e a saída da catenária foi de 64,8 m e considerou o ponto de saída com 31,9 m, com outras dimensões e forma geral podendo ser observadas na Figura 7. Computacionalmente, o modelo mostrou-se demorado e, portanto, a malha teve que ser adaptada para ser a mais limpa possível após a convergência dos resultados.

**Figura 7** ►

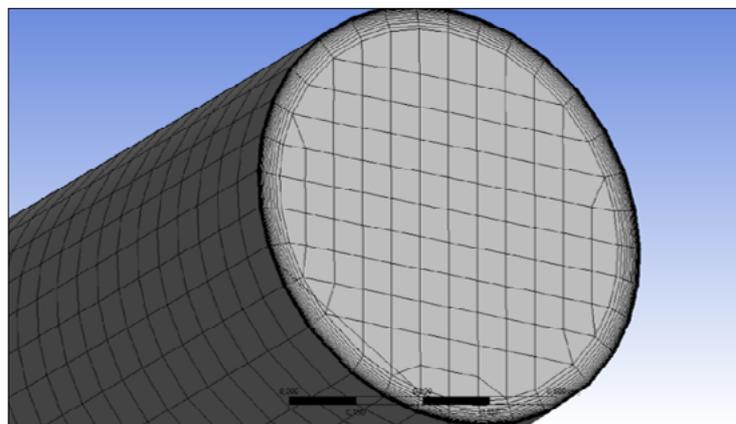
Modelo numérico do *riser*.  
Fonte: elaborado pelos autores



O software Ansys Fluent 17 foi utilizado para realizar a análise. Esse software trabalha com o método de volumes finitos. A malha gerada foi não estruturada ao longo do modelo para ter melhor adaptação e reduzir o custo computacional. No entanto, devido à necessidade de os resultados de interação da parede serem mais precisos, uma malha estruturada foi gerada em várias camadas na parede, com proporção de célula de 1; uma seção da malha pode ser vista na Figura 8. Alguns parâmetros de orientação para qualidade de malha foram levados em consideração, embora o método de definição tenha sido baseado na convergência de resultados. A malha contém 679669 nós e 900335 elementos, o que gera um custo e tempo computacional elevado.

**Figura 8** ►

Seção da malha do modelo.  
Fonte: elaborado pelos autores



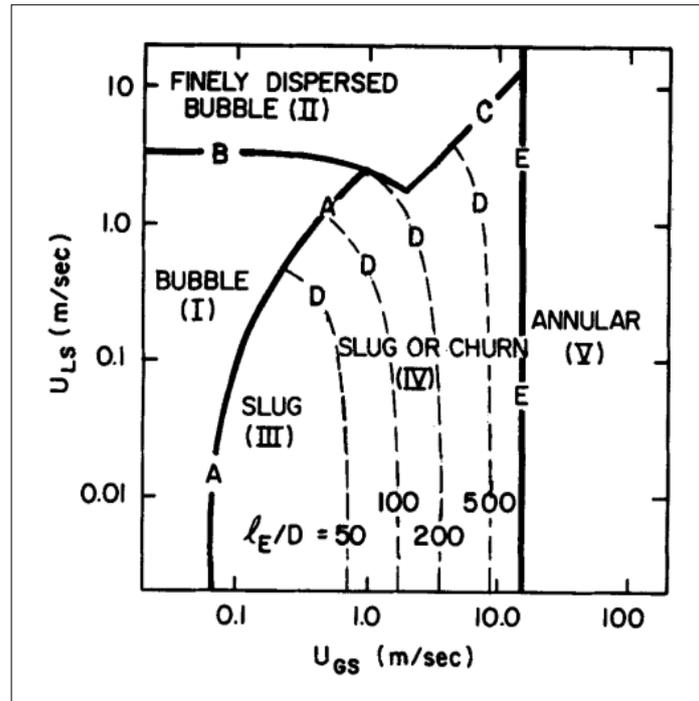
Entre as opções de escoamento multifásico, o modelo matemático escolhido para realizar a análise foi o método VOF (volume de fluido), que não permite a interpenetração das fases (Andreolli, 2016). Essa metodologia é bastante difundida em relação a sua

capacidade de rastreamento de interface e à proporção de cada fase em cada célula da malha, tornando-a o método indicado para análise numérica de *slugging*.

Para realizar a análise numérica, é necessário identificar a faixa de velocidade na qual ocorre o escoamento em golfadas. Os mapas de padrões de fluxo são uma ferramenta bastante difundida, desenvolvida com dados de análises experimentais e identificação de pontos de transição geralmente feitos por análise humana. Taitel, Barnea e Dukler (1980) propuseram o mapa de padrão de fluxo apresentado na Figura 9. Esse mapa foi escolhido como guia para a faixa aplicada na análise numérica CFD, pois foi realizada uma extensa pesquisa sobre *slugs* ao longo dos anos. Vários mapas encontrados na literatura são consonantes com esse, com seus limiares de transição estando em coordenadas dimensionais, e o procedimento experimental que gerou esse gráfico foi de um escoamento gás-líquido.

**Figura 9** ▶

Mapa de padrões de fluxo para uma configuração de fluxo vertical de água-gás em um tubo de 5 cm de diâmetro a 25 °C e 100 kPa.  
Fonte: Taitel, Barnea e Dukler (1980)



Para ser o mais abrangente possível, utiliza-se o intervalo para fluxo de golfadas e de golfadas/agitação. As análises foram realizadas para velocidades gasosas de 0,1 m/s até 10 m/s, e a velocidade do líquido foi de 0,01 m/s até 5,0 m/s. As condições de contorno escolhidas foram entradas de velocidade, conforme apresentado na Tabela 1, devido aos dados disponíveis, e saída de pressão para que possa ocorrer refluxo.

**Tabela 1** ▶

Condições de contorno de entrada de velocidade.  
Fonte: dados da pesquisa

Parâmetros	Entrada
Velocidade da fase gás ( $V_g$ )	0.1 m/s – 9.8 m/s
Velocidade da fase líquido ( $V_l$ )	0.01 m/s – 4.9 m/s

Após a finalização da análise numérica, pôde-se visualizar os *slugs*. Ao longo do espectro, foi possível identificar algumas mudanças no comportamento do *slugging*. Na Figura 10, apresentam-se as frações de volume de ar em função da velocidade da fase de gás ( $V_g$ ) e da velocidade da fase de líquido ( $V_l$ ). A Figura 10d apresenta as

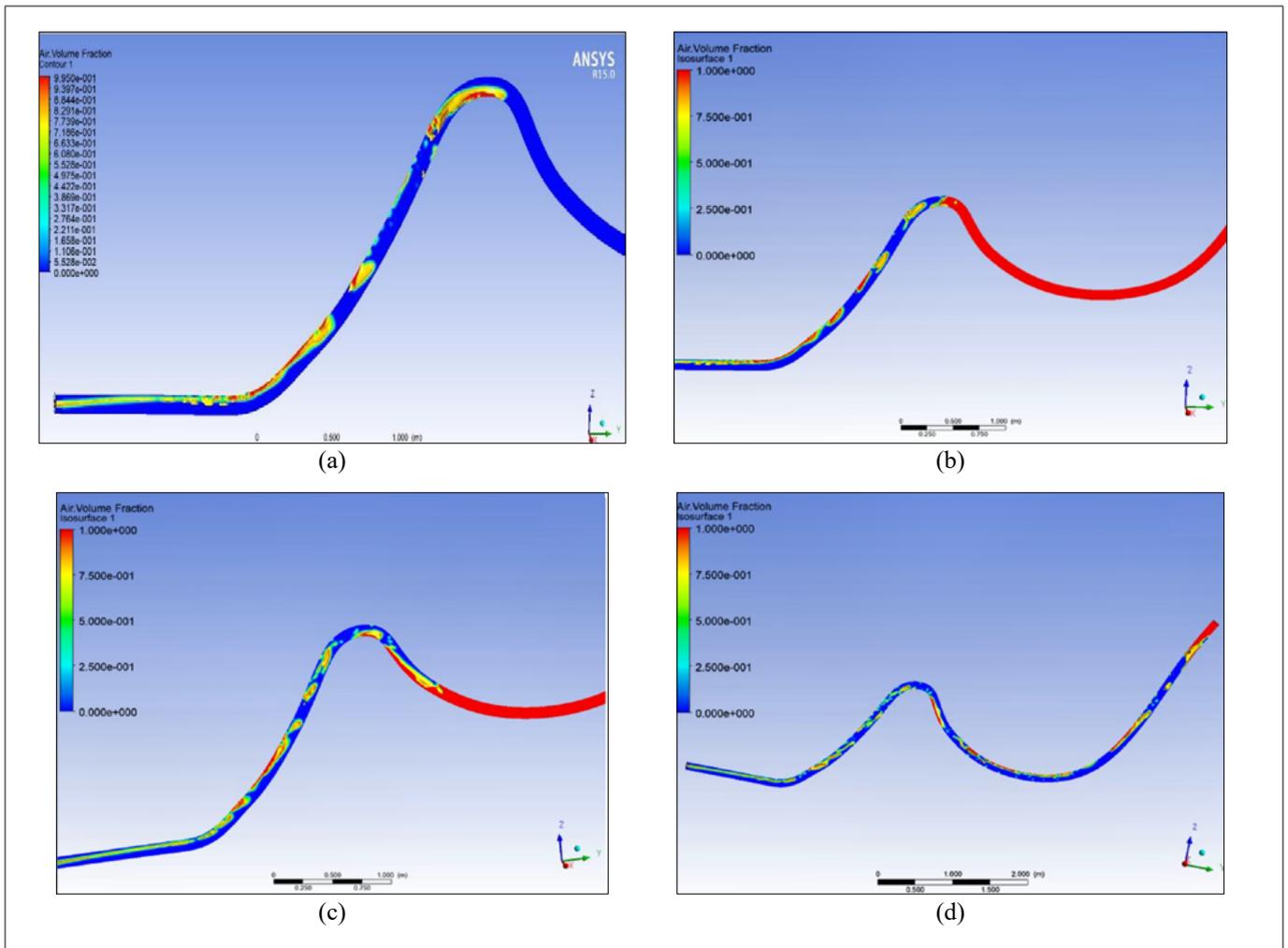
**Figura 10 ▼**

- Fração de volume de ar.  
 a)  $V_g = 1 \text{ m/s}$ ,  $V_l = 0.5 \text{ m/s}$ ;  
 b)  $V_g = 5 \text{ m/s}$ ,  $V_l = 2 \text{ m/s}$ ;  
 c)  $V_g = 8 \text{ m/s}$ ,  $V_l = 4 \text{ m/s}$ ;  
 d)  $V_g = 10 \text{ m/s}$ ,  $V_l = 5 \text{ m/s}$ .

Fonte: Taitel, Barnea e Dukler (1980)

maiores velocidades analisadas, enquanto a Figura 10a mostra uma faixa de velocidade significativamente menor; comparando-as, é possível identificar que o tamanho da golfada gasosa diminui com o aumento da velocidade.

Também é possível detectar que o escoamento está mudando de *slugging* para agitação. Na Figura 10a e na Figura 10b, que possuem velocidades menores, os *slugs* são mais organizados, com poucas bolhas de cauda dispersas, enquanto na Figura 10c e na Figura 10d, os *slugs* começam a perder a forma e apresentam bolhas mais dispersas. No entanto, o limiar entre esses dois padrões não era claro.



## 2.2 Densidade espectral de potência – PSD (*Power Spectral Density*)

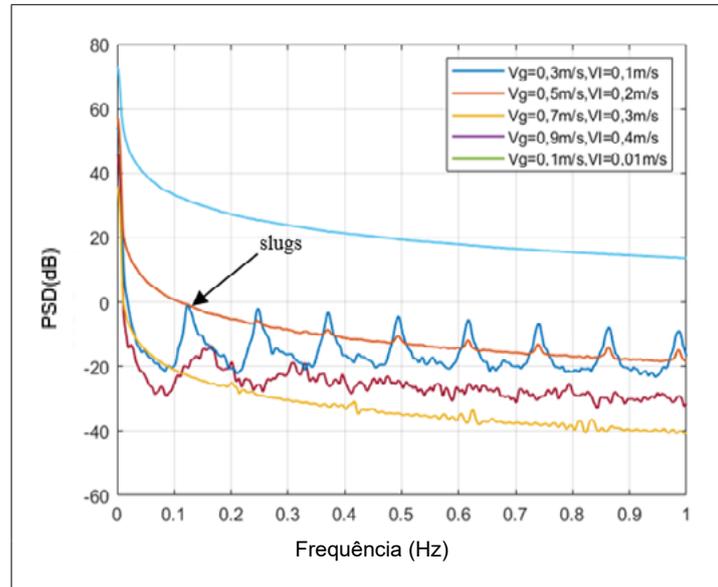
A densidade espectral de potência é uma ferramenta útil para identificar e capturar faixas de frequências e suas potências (energias) associadas (Diniz; Silva; Lima Netto, 2014; Oppenheim; Schafer, 2013). Utiliza-se para o treinamento da rede neural artificial.

Os gráficos de variação de pressão ao longo do *riser* em função do tempo foram extraídos das análises numéricas CFD. A PSD é uma função que mostra a distribuição de potência contida na curva ao longo da frequência normalizada, estimada usando a transformada rápida de Fourier. Isso possibilita a visualização dos picos de potência que são esperados no *slugging*, visto que a pressão varia quando um *slug* gasoso surge (Mendes *et al.*, 2011).

Ao rever a densidade espectral de potência das análises CFD, algumas diferenças de comportamento foram identificadas. Essas diferenças levaram à separação das curvas em grupos por faixa de velocidade e semelhança de comportamento. Na Figura 11, apresenta-se a PSD para velocidades de gás de 0,1 m/s a 0,3 m/s e de líquido de 0,01 m/s a 0,1 m/s.

**Figura 11** ►

Densidade espectral de potência para as velocidades  $V_g$  de 0,1 m/s a 0,3 m/s e  $V_l$  de 0,01 m/s a 0,1 m/s.  
Fonte: dados da pesquisa

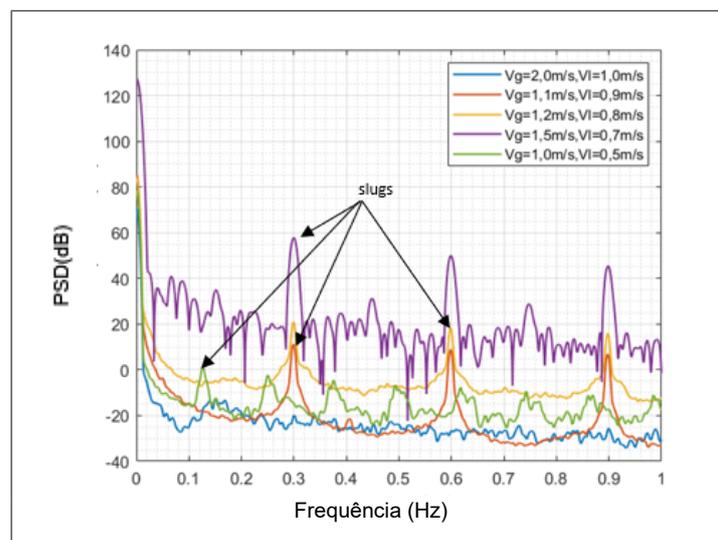


Na Figura 11, é possível identificar o comportamento típico dos picos de potência do escoamento em golfadas na maioria deles. No entanto, a mesma figura mostra três curvas de velocidade em que não há picos ou há picos muito sutis. Elas ocorrem entre as faixas de velocidades do gráfico, o que é interessante por apresentar um comportamento intermitente. A teoria diz que, como o fluxo em golfadas está – de acordo com o mapa de padrão de fluxo – entre os padrões de bolha e agitação, há alguma oscilação entre os padrões. Esse padrão quase linear sugeriria que essa oscilação está na direção do fluxo da bolha, uma vez que, com a passagem constante de pequenas bolhas, o fluxo é mais estável.

Na Figura 12, o comportamento geral é mais constante e condizente com o esperado, mas não há conformidade na frequência, com os picos ocorrendo aleatoriamente, o que é uma característica inerente a esse tipo de escoamento.

**Figura 12** ►

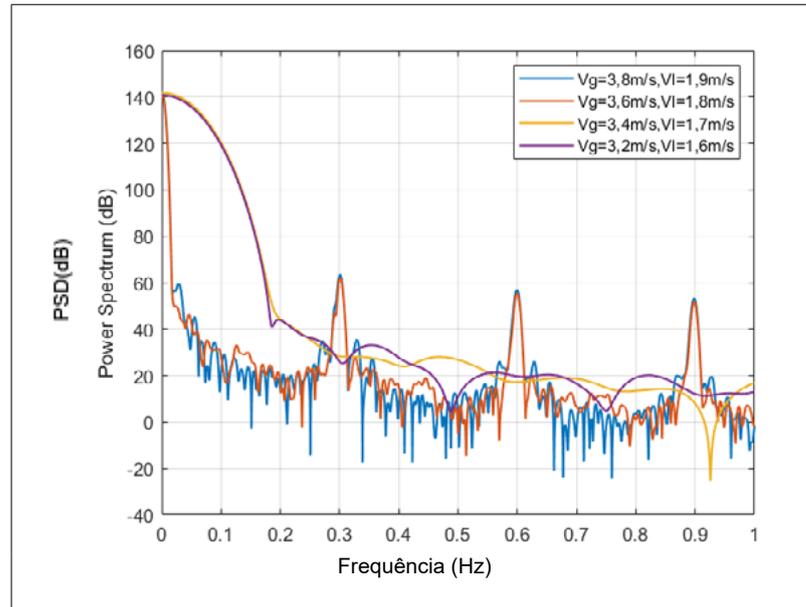
Densidade espectral de potência para as velocidades  $V_g$  de 1,0 m/s a 2,0 m/s e  $V_l$  de 0,5 m/s a 1,0 m/s.  
Fonte: dados da pesquisa



A Figura 13 mostra duas curvas de velocidade distintamente diferentes do esperado. A curva nas velocidades gasosas de 3,2 m/s e 3,4 m/s tem um poder considerável em comparação com as outras duas, nas frequências mais baixas, e apresenta picos negativos em diferentes frequências. Isso provavelmente representa os atrasos gerados pelos *slugs*.

**Figura 13** ►

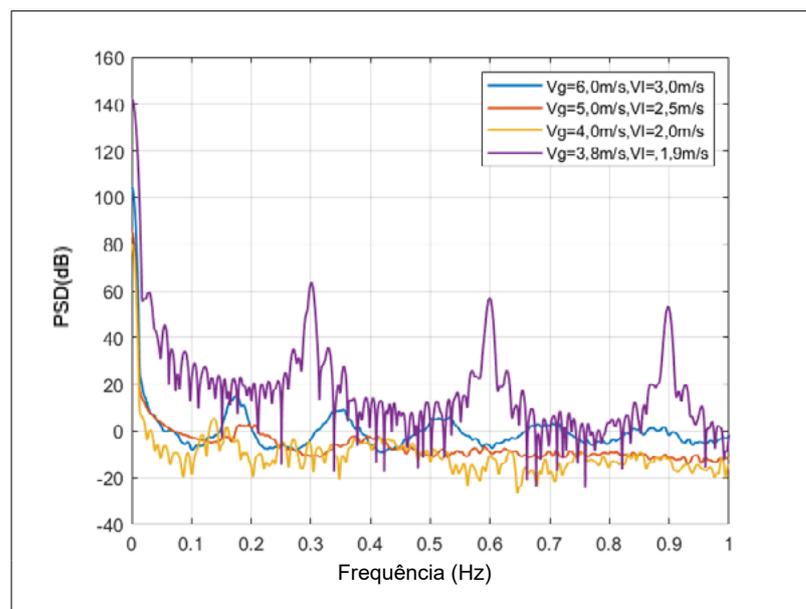
Densidade espectral de potência para as velocidades  $V_g$  de 3,2 m/s a 3,8 m/s e  $V_l$  de 1,6 m/s a 1,9 m/s.  
Fonte: dados da pesquisa



A Figura 14 sugere o aumento de bolhas dispersas na cauda dos *slugs* gasosos, uma vez que os picos maiores ainda são visíveis, mas com muitos outros menores próximos; à medida que a velocidade aumenta, o comportamento começa a suavizar. A mesma teoria da oscilação dos padrões de fluxo pode ser aplicada para as Figuras 13, 14, 15 e 16, mas, diferentemente das Figuras 11 e 12, pode-se supor que essas variações estão entre os fluxos de *slug* e agitação.

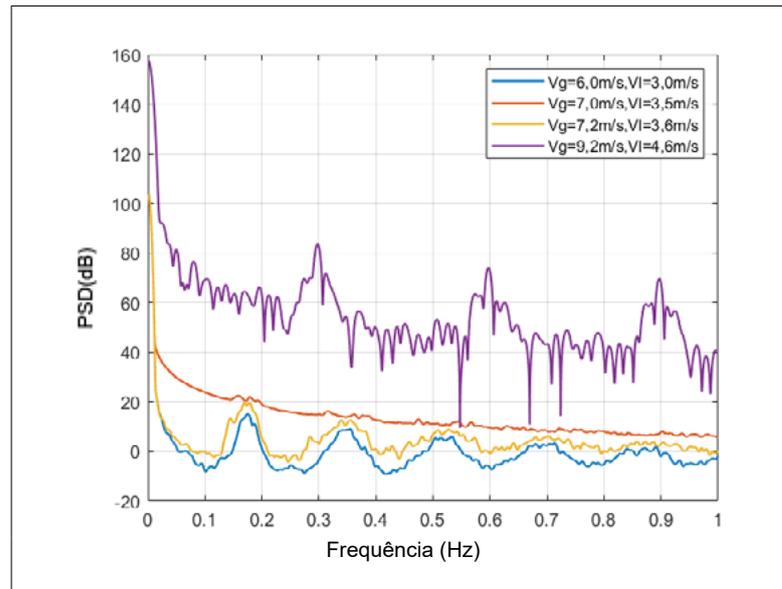
**Figura 14** ►

Densidade espectral de potência para as velocidades  $V_g$  de 3,8 m/s a 6,0 m/s e  $V_l$  de 1,9 m/s a 3,0 m/s.  
Fonte: dados da pesquisa



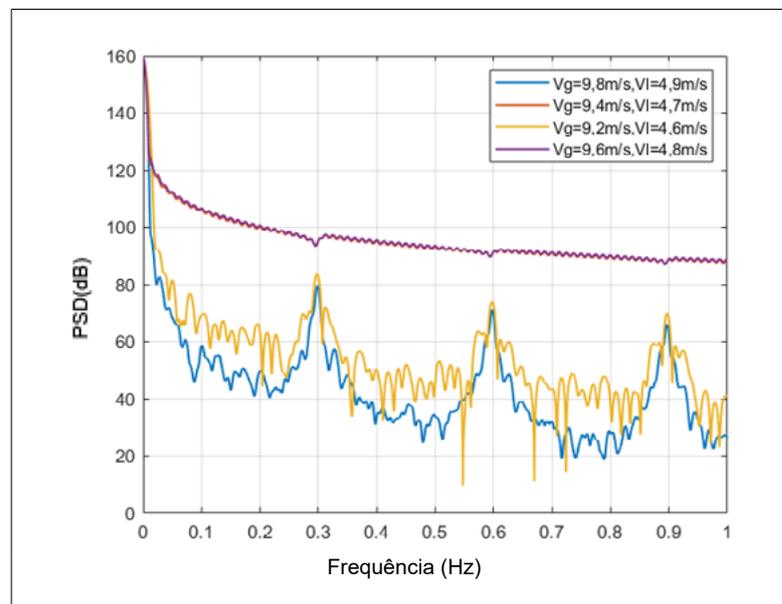
**Figura 15** ►

Densidade espectral de potência para as velocidades  $V_g$  de 6,0 m/s a 9,2 m/s e  $V_i$  de 3,0 m/s a 4,6 m/s.  
Fonte: dados da pesquisa



**Figura 16** ►

Densidade espectral de potência para as velocidades  $V_g$  de 9,6 m/s a 9,8 m/s e  $V_i$  de 4,8 m/s a 4,9 m/s.  
Fonte: dados da pesquisa



Os resultados gráficos foram analisados em sincronia com os resultados físicos que podem ser vistos no pós-processamento da análise numérica CFD, portanto, sabe-se que a faixa de análise realizada nunca entrou no padrão anular. Embora duas curvas de velocidade da Figura 16 –  $V_g = 9,4$  m/s e  $V_g = 9,6$  m/s – sugeriram outra mudança de comportamento, a teoria indica que nessas velocidades o fluxo é totalmente agitado.

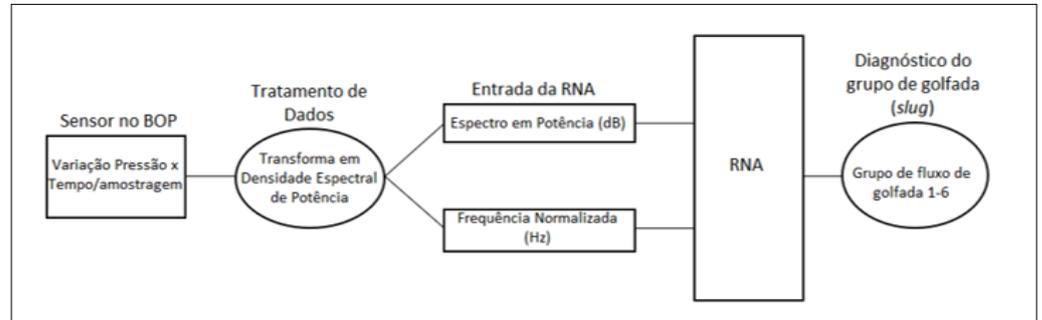
Observa-se *slugging* nas outras curvas de velocidade, como na Figura 15, com bolhas menos dispersas, e na Figura 16, com muitas bolhas dispersas.

### 2.3 Rede neural artificial

Levou-se em consideração que existem sensores instalados nas plataformas de extração de petróleo, geralmente no BOP (*Blow Out Preventer*), que monitoram a variação de velocidade de fluxo/pressão. Foi isso que motivou a aplicação das curvas

de variação de velocidade de fluxo para gerar o espectro de potência e então utilizá-las como dados de entrada da rede neural. Um fluxograma do diagnóstico de *slugging* que transforma os dados do sensor do BOP em densidade espectral de potência para a entrada de uma RNA (Rede Neural Artificial) é apresentado na Figura 17.

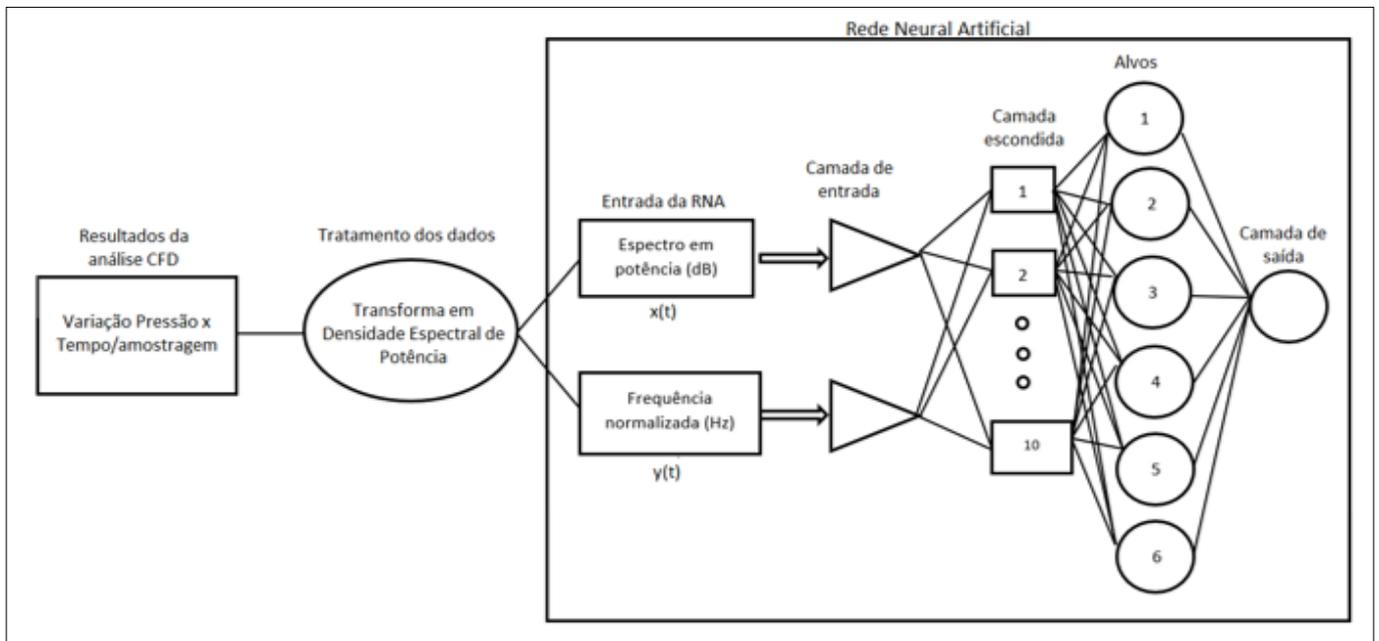
**Figura 17** ► Fluxograma do diagnóstico de *slugging*.  
Fonte: elaborado pelos autores



Foi implementada a rede neural artificial NARX, a qual é não linear e autorregressiva com entrada exógena, sendo uma rede recorrente (Haykin, 2007). Nesse tipo de rede, a camada de entrada recebe mais de um tipo de dados, sendo influenciada pelos atrasos. Dessa forma, os valores anteriores influenciarão os resultados subsequentes, o que torna essa rede adequada a fenômenos que variam em função do tempo.

**Figura 18** ▼ Fluxograma da rede neural artificial.  
Fonte: elaborado pelos autores

A topologia da rede foi definida por testes, com dez neurônios na camada oculta e dois atrasos, com o fluxograma indicado na Figura 18. O algoritmo de treinamento implementado foi o de Levenberg-Marquardt (Haykin, 2007), devido à sua capacidade de convergência rápida e estável em comparação com outros disponíveis.



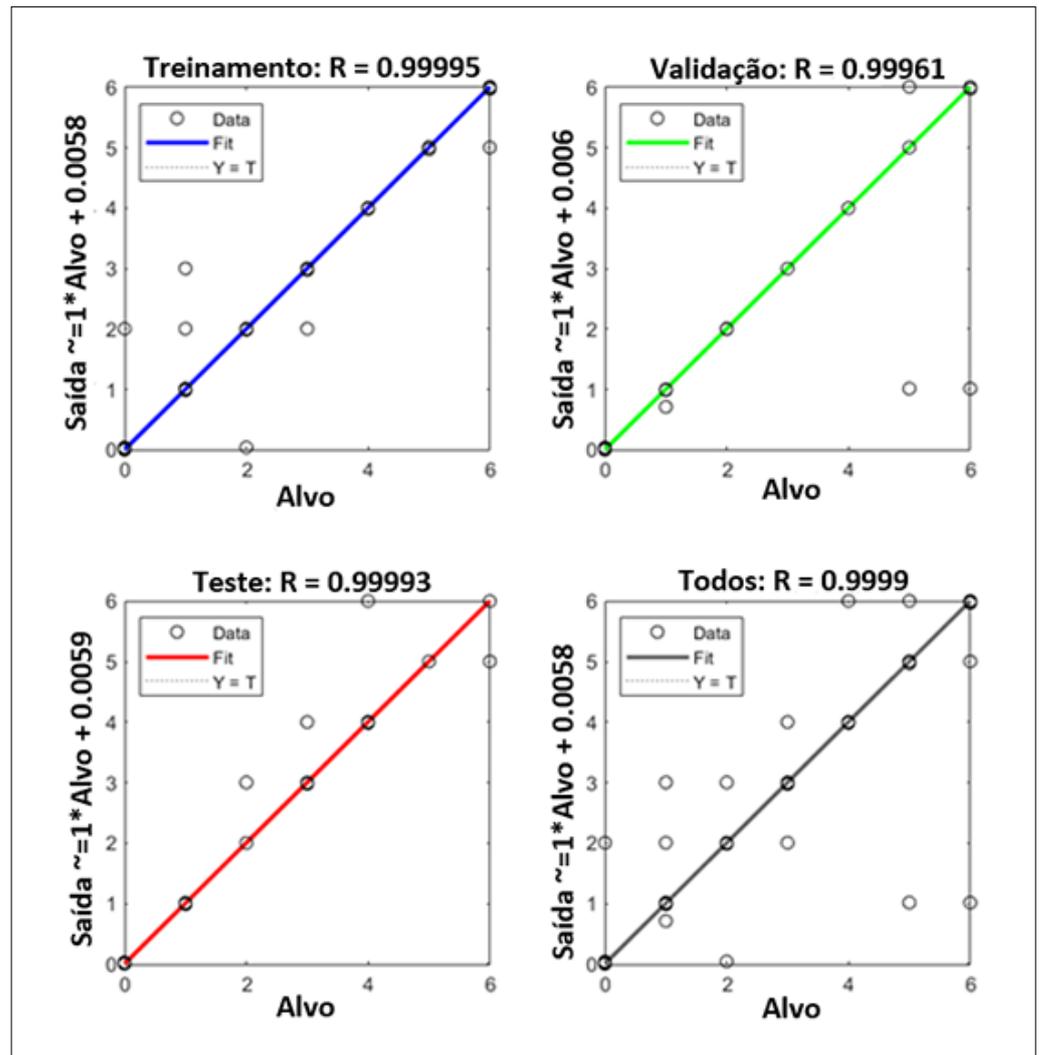
### 3 Resultados e discussão

A divisão dos dados da PSD em seis grupos diferentes foi feita para obter um melhor reconhecimento da rede neural. A normalização de frequência (0-1) foi realizada como

forma de reduzir os custos computacionais. Utilizando os dados de PSD, foi gerado um banco de dados distribuídos pelos seis grupos citados anteriormente, os quais podem ser vistos na primeira coluna da Tabela 2. Os dados do gráfico mostram as entradas da rede neural, tendo como alvo a identificação do grupo ao qual uma curva pertence, então o resultado-alvo é um número de 1 a 6, sendo que 70% dos dados de entrada (curvas PSD) foram usados para treinamento, 15% para validação e 15% para teste.

Os gráficos de regressão da RNA mostraram um erro de 0,999, para treinamento, validação e teste, conforme apresenta-se na Figura 19. O desempenho da rede também foi avaliado em relação ao seu erro médio quadrático; para treinamento o máximo aceito foi de  $5,52 \times 10^{-4}$ , e para validação, de  $6,10 \times 10^{-4}$ .

**Figura 19** ►  
Regressão da RNA.  
Fonte: dados da pesquisa



A RNA gerada com os dados de comportamento do escoamento em golfadas, obtidos pela análise CFD, trabalha com o gráfico de espectro de potência por frequência normalizada como entrada na rede; a saída da rede é um dos grupos (1 - 6) definidos anteriormente como grupos em que há a ocorrência de *slugging*.

Mais testes foram realizados na rede neural para cada um dos grupos que ela busca identificar, com o erro médio quadrático resultante para cada um indicado na Tabela 2 (próxima página).

**Tabela 2** ▶  
Erros médio quadráticos dos grupos.  
Fonte: dados da pesquisa

Grupo	Velocidades – gás ( $V_G$ ) e líquido ( $V_L$ )	Erro médio quadrático
1	$V_G$ 9,8 – 9,6 m/s $V_L$ 4,9 – 4,6 m/s	$5,80 \times 10^{-7}$
2	$V_G$ 9,2 – 6,0 m/s $V_L$ 4,6 – 3,0 m/s	$2,51 \times 10^{-7}$
3	$V_G$ 6,0 – 3,8 m/s $V_L$ 3,0 – 1,9 m/s	$1,03 \times 10^{-6}$
4	$V_G$ 3,8 – 3,2 m/s $V_L$ 1,9 – 1,6 m/s	$3,13 \times 10^{-7}$
5	$V_G$ 2,0 – 1,0 m/s $V_L$ 1,0 – 0,5 m/s	$9,95 \times 10^{-8}$
6	$V_G$ 0,9 – 0,1 m/s $V_L$ 0,4 – 0,01 m/s	$1,32 \times 10^{-7}$

Os resultados da rede neural apontam que a rede é capaz de identificar os diferentes grupos de *slug flow* que foram inseridos. Para que a RNA seja capaz de identificar o fluxo em golfadas entre os outros tipos de fluxo, esses outros tipos (fluxo de bolhas, fluxo de agitação, fluxo anular etc.) devem ser inseridos no treinamento da rede.

## 4 Conclusões

A análise numérica CFD foi capaz de identificar o comportamento do *slugging*, computando o padrão de fluxo em uma ampla faixa de velocidades. Foi possível identificar mudanças no comportamento do *slug* na fase de pós-processamento das simulações e utilizar o seu comportamento em comparação com os resultados de espectro de potência obtidos.

Diferentemente das configurações experimentais, em que o escoamento em golfadas (*slugs*) é identificado com sensores que medem a passagem de uma única bolha de Taylor, a análise numérica realizada obteve resultados para bolhas múltiplas e vários casos diferentes no comportamento de golfadas, com dispersão e frequências de golfadas e tamanhos variados, por exemplo. Esse é um passo importante para tornar a pesquisa teórica funcional em aplicações práticas.

Para desenvolver o banco de dados, foram realizadas análises múltiplas, alterando a entrada de velocidade para cada fase para que toda a faixa de velocidade pudesse ser contemplada. Cada análise provou ser demorada e, portanto, impraticável em uma operação real. Isso motivou o desenvolvimento da rede neural, gerando uma forma rápida de identificar o *slugging*.

Os resultados obtidos pela rede neural foram satisfatórios para o conjunto de dados utilizados; isso significa que, embora o conjunto de resultados obtidos fosse bom, dados adicionais de configurações reais de trabalho aumentariam sua confiabilidade e os tornariam apropriados para uso em operações reais. Não havia nenhum dado disponível dos outros padrões de fluxo a serem inseridos na rede neural para que ela pudesse captar o fluxo em golfadas de todos os diversos padrões que podem ocorrer.

A proposta deste trabalho é utilizar essa ferramenta de diagnóstico com as informações adquiridas nos sensores do BOP, para que o reconhecimento do *slugging* possa ser feito de forma automática. O sensor fornecerá os dados de variação de velocidade/pressão, que serão transformados em espectro de potência e inseridos na RNA para verificação do comportamento de *slugging*, para que ações adequadas possam ser tomadas para mitigá-lo.

Este trabalho é um passo inicial para o desenvolvimento de um controle ativo de *slugging* nas operações de extração de petróleo existentes, para que a produção possa ser aumentada sem adicionar custos elevados como o *air lift* à planta. Os riscos podem ser rebaixados quando a mudança no padrão de fluxo de escoamento é identificada antecipadamente e ações podem ser tomadas.

A ideia de implementar um diagnóstico para identificar o fluxo por golfada (*slugging*) baseado em técnica de inteligência artificial utilizando como dados de entrada a variação de velocidade de escoamento dos próprios equipamentos (BOP) presentes na sonda de produção é eficiente, como apresentado neste artigo, sendo assim vantajoso detectar esses fluxos para evitar possíveis *kicks* e *blowouts*.

## Financiamento

Projeto financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

## Referências

ABDULKADIR, M.; HERNANDEZ-PEREZ, V.; ABDULKAREEM, L.; LOWNDES, I. S.; AZZOPARDI, B. J. Characteristics of slug flow in a vertical riser. *In: NIGERIA ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION, 2010, Tinapa. Proceedings [...].* Tinapa: Society of Petroleum Engineers, 2010. DOI: <https://doi.org/10.2118/140681-MS>.

ANDREOLLI, I. **Introdução à elevação e escoamento monofásico e multifásico de petróleo.** Rio de Janeiro: Interciência, 2016.

BAI, Y.; BAI, Q. **Sistemas marítimos de produção de petróleo: processos, tecnologias e equipamentos offshore.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

DINIZ, P. S. R.; SILVA, E. A. B.; LIMA NETTO, S. **Processamento digital de sinais: projeto e análise de sistemas.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.

JAHANSHAHI, E.; BACKI, C. J.; SKOGESTAD, S. Anti-slug control based on a virtual flow measurement. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 53, Part B, p. 299-307, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.01.008>.

MENDES, F. A. A.; RODRIGUEZ, O. M. H.; ESTEVAM, V.; LOPES, D. Flow patterns in inclined gas-liquid annular duct flow. **WIT Transactions on Engineering Sciences**, v. 70, p. 271-283, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.2495/MPF110231>.

MONTENEGRO, J. Descomissionamento de boias offshore em estudo. **Petróleo Hoje**, [S.l.], 25 fev. 2019. Disponível em: <https://petroleohoje.editorabrazilenergia.com.br/descomissionamento-de-boias-offshore-em-estudo/>. Acesso em: 8 ago. 2022.

NICKLIN, D. J.; WILKES, J. C.; DAVIDSON, J. F. Two-phase flow in vertical tubes. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, v. 40, p. 61-68, 1962.

NILSEN, A. S. **Simplified first principle model for severe-slugging flow in S-shaped risers**. Report written as a part of the preparation for the master thesis. **Trondheim**: Norwegian University of Science and Technology, 2012. Disponível em: [https://folk.ntnu.no/skoge/diplom/prosjekt12/nilsen/Rapport\\_prosjekt.pdf](https://folk.ntnu.no/skoge/diplom/prosjekt12/nilsen/Rapport_prosjekt.pdf). Acesso em: 21 jul. 2022.

OLIVEIRA JUNIOR, J. V. **Modelagem de slugging severo de risers em catenária**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: [https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufRJ-peno\\_upl//THESIS/10001518/2011\\_mestrado\\_jose\\_vilani\\_oliveira\\_junior\\_202107281051173.pdf](https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufRJ-peno_upl//THESIS/10001518/2011_mestrado_jose_vilani_oliveira_junior_202107281051173.pdf). Acesso em: 21 jul. 2022.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Processamento em tempo discreto de sinais**. 3. ed. São Paulo: Pearson, 2013.

PEDERSEN, S.; DURDEVIC, P.; YANG Z. Challenges in slug modeling and control for offshore oil and gas productions: a review study. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 88, p. 270-284, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.07.018>.

PEDERSEN, S.; DURDEVIC, P.; YANG, Z. Review of slug detection, modeling and control techniques for offshore oil & gas production processes. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, n. 6, p. 89-96, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.015>.

PEREZ, V. H. **Gas-liquid two-phase flow in inclined pipes**. 2007. Thesis (Doctor of Philosophy) – School of Chemical, Environmental and Mining Engineering, University of Nottingham, Nottingham, 2007. Disponível em: <https://eprints.nottingham.ac.uk/11764/1/Hernandez-Perez.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2024.

RUAS, P. H. D. **Análise teórica do escoamento bifásico e/ou dois-fluidos imiscíveis anular ascendente via GITT**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/8965>. Acesso em: 11 ago. 2022.

SILVA, E. S. **Estudo do escoamento bifásico em risers em movimento na produção marítima de petróleo em águas profundas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Petróleo) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=474274>. Acesso: 27 fev. 2024.

TAITEL, Y. Stability of severe slugging. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 12, n. 2, p. 203-217, 1986. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(86\)90026-1](https://doi.org/10.1016/0301-9322(86)90026-1).

TAITEL, Y.; BARNEA, D.; DUKLER, A. E. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. **AIChE Journal**, v. 26, n. 3, p. 345-354, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.690260304>.

VALDIVIA, P. G.; MOROOKA, C. K.; BORDALO, S. N.; MATT, C. G. C.; FRANCISS, R. Resposta dinâmica de um riser rígido em catenária devido à excitação induzida pelo escoamento interno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS (PDPETRO), 4., 2007, Campinas. **Anais** [...]. Campinas: ABPG, 2007. Disponível em: [http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/4/resumos/4PDPETRO\\_2\\_4\\_0265-1.pdf](http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/4/resumos/4PDPETRO_2_4_0265-1.pdf). Acesso em: 21 jul. 2022.