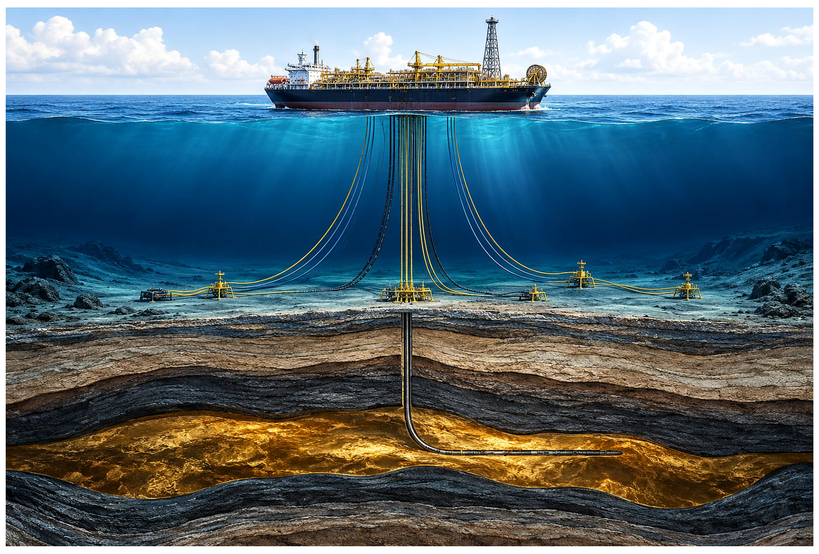
Gestão:

Reunião de Acompanhamento
e Avaliação – RAA 2026

MODELAGEM HÍBRIDA APLICADA À INFLUÊNCIA DA MASSA ESPECÍFICA DO GÁS NO ESCOAMENTO BIFÁSICO NO PADRÃO GOLFADAS

Guilherme Lopes de Campos[1]; Ana Luiza Beltrão Santana[2] ; Rigoberto E. M. Morales[3];
[1]Doutorando e bolsista PRH 21; [2]Coorientadora; [3]Orientador;
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba – PR
guilherme_lopescampos@hotmail.com; rmorales@utfpr.edu.br; anasantana@alunos.utfpr.edu.br

01 CONTEXTO E OBJETIVO DA PESQUISA



Produção offshore (ilustração).

Pressões elevadas e gases densos modificam a dinâmica das golfadas em linhas de produção offshore e em sistemas com CO_2 pressurizado.

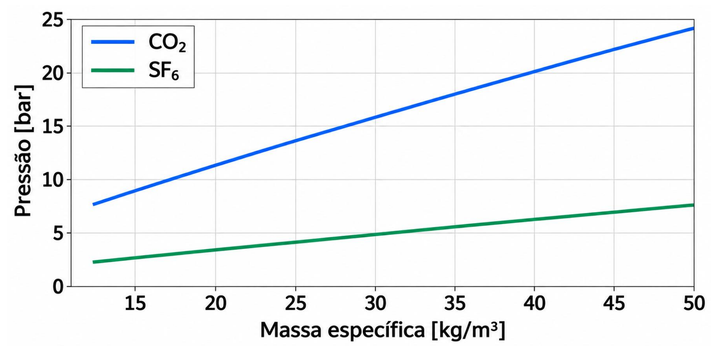
OBJETIVO

Investigar o efeito da massa específica do gás e desenvolver um modelo híbrido físico-informado para escoamentos em golfadas.

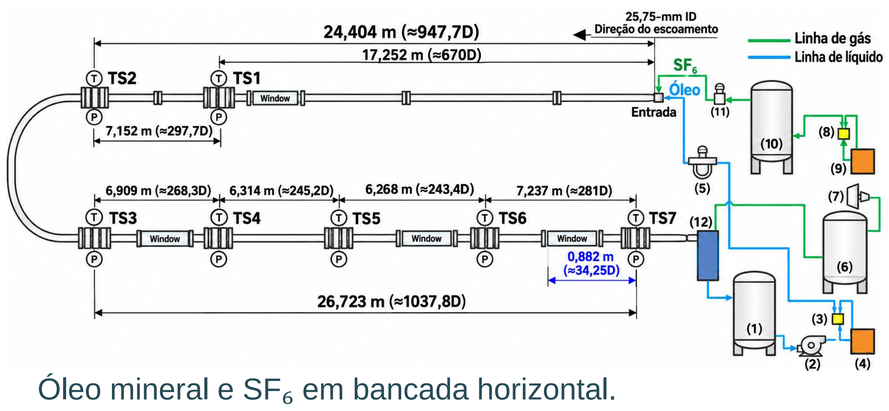
SF_6

Hexafluoreto de enxofre
Alta massa específica com menor pressão de ensaio.

≈70% menor pressão
A 25 °C, para a mesma massa específica.



02 EXPERIMENTO E CARACTERIZAÇÃO

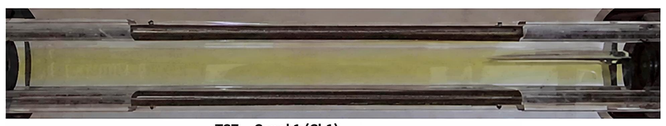


54 m
Comprimento

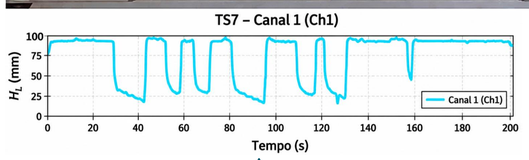
25,75 mm
Diâmetro interno

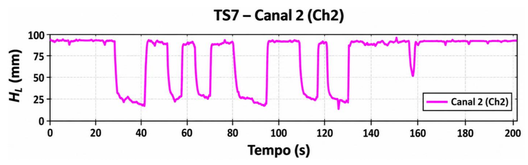
Óleo mineral e SF_6 em bancada horizontal.
7 estações de medição e 4 janelas de visualização.

Pressões: 4, 5, 10, 15 e 20 bar.



Imagens e sinais sincronizados identificam as estruturas.

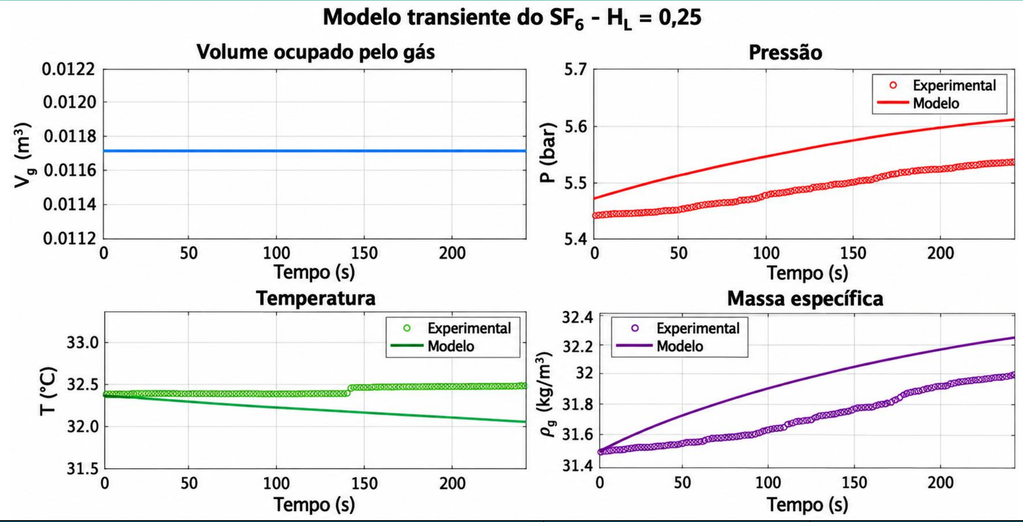




$$u_B = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

$$f = \frac{1}{t_s + t_b}$$

04 RESULTADOS QUANTITATIVOS



Variável	MAPE (%)	Máximo (%)
Pressão (bar)	1,231	1,397
Temperatura (°C)	0,635	1,305
Massa específica (kg/m³)	0,807	1,070

03 MODELO FÍSICO E VALIDAÇÃO

Massa da fase gasosa

$$\frac{\mathrm{d}\rho_G}{\mathrm{d}t} = \frac{\rho_{G,e} j_{G,e} - \rho_G j_{G,s}}{(1 - H_L)L} \qquad \rho_G(0) = \rho_{G,0}$$

Energia da fase gasosa

$$\frac{\mathrm{d}T_G}{\mathrm{d}t} = \frac{hA_s(T_a - T_G)}{C_p \rho_G (1 - H_L) AL} \qquad T_G(0) = T_{G,0}$$

Equação de estado do virial

$$P_G = \frac{\rho_G R T_G}{M}(1 + B\rho_G + C\rho_G^2) \qquad P_G(0) = P_{G,0}$$

H_l = 0,25; L = 30 m; A = πD²/4; A_s = πDL.
$P_G(0)$ calculada pela equação de estado.

$$V_G = (1 - H_L)AL, \quad \frac{\mathrm{d}V_G}{\mathrm{d}t} = 0$$

05 APRENDIZADO DE MÁQUINA

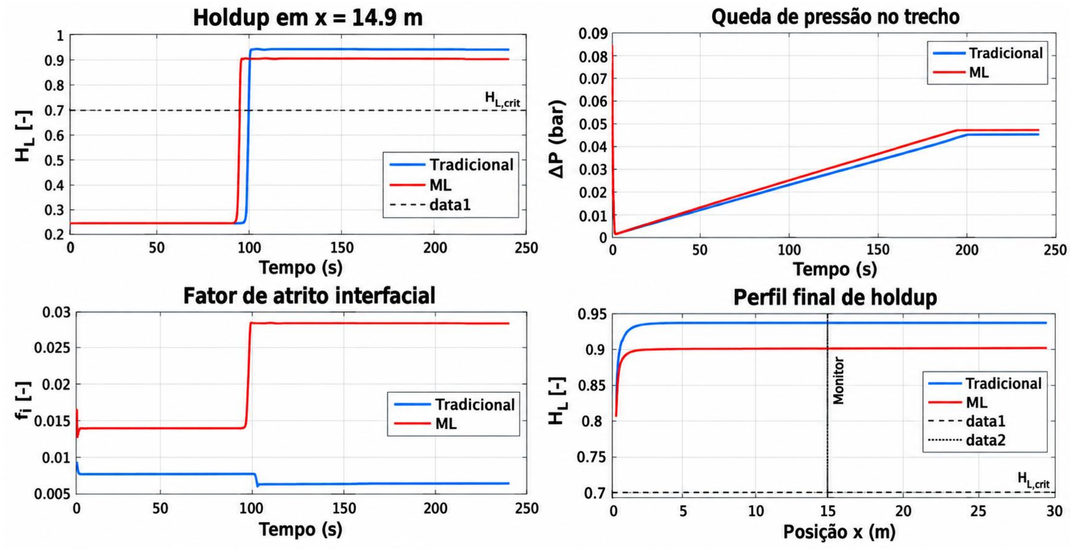
$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_G (U_G - U_L)|U_G - U_L|$$

$$f_{i,\mathrm{ML}} = f_G K_{\mathrm{ML}}$$

$$f_{i,\mathrm{trad}} = f_G$$

$$f_L = f_{IA}(Re_L, \rho_L, \rho_G, D, \mu_L, \mu_G, \alpha_L, J_G, J_L, L)$$

Entradas: H_l, Re_G, Re_l e $|U_G - U_l|$. O aprendizado estima K_{ML} e corrige o atrito interfacial. A solução física fornece holdup, queda de pressão e velocidades.



Prova de conceito: 6.000 condições sintéticas, com 80% para treino e 20% para teste. Validação experimental prevista.

06 CONTRIBUIÇÕES POTENCIAIS PARA PETRÓLEO, GÁS E ENERGIA

ECONÔMICAS E OPERACIONAIS

Apoiar o dimensionamento de dutos e a análise de oscilações de pressão. Reduzir margens excessivas de projeto e orientar condições de operação.

TECNOLÓGICAS E ACADÊMICAS

Integrar Slug Capturing, Slug Tracking e aprendizado de máquina. Ampliar a base óleo–SF_6 para validar modelos de gases densos e apoiar estudos de CO_2 e CCUS.

REFERÊNCIAS ESSENCIAIS

SANTANA et al. (2025). Two-phase oil-dense gas slug flow. JEM-2025-0078.
ISSA; KEMPF (2003). Simulation of slug flow with the two-fluid model. IJMF, 29, 69–95.
BUIST et al. (2019). Machine learning for closure models. UNCECOMP, 379–399.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil, através do processo nº 2025/17497-2. Em especial, agradeço ao PRH-ANP 21/UTFPR, sob o processo nº 2025/03577-4.