

## Estudo Hidrodinâmico de um relé de gás utilizando a fluidodinâmica computacional (CFD).

Ivan X. Lins\*. Hilário J. B. Lima Filho\*. Valdemir A. Santos\*. Júlio C. S. Pereira\*\*. José Mak\*\*. Cynthia Wanick Vieira\*\*\*.

\*Universidade Católica de Pernambuco, Centro de Ciências e Tecnologia, Pernambuco, Brasil  
(ivanxavierlins@hotmail.com).

\*\*Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação (CGTI), Pernambuco, Brasil.

\*\*\*Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A. - TAESA, Rio de Janeiro, Brasil.  
(cynthia.vieira@taesa.com.br).

**Abstract:** This article aimed to provide a hydrodynamic study of a gas relay using the computational fluid dynamics tool, to predict speed profiles, temperature variation and oil pressure caused by large electrical failures inside the transformer (short circuit), from physical properties, volumetric expansion coefficient and operational conditions. Obtaining more accurate information about the behavior of the oil in the system. The proposed methodology was based on three stages: pre-processing (development of the computational mesh, based on real three-dimensional geometry), processing (definition of boundary conditions, choice and resolution of hydrodynamic models in a FlowSimulation simulation environment) and post-processing (obtaining speed profiles, fin tilt, temperature and pressure variation). The results showed that in the upward flow, the fin will move when the fluid speed exceeds 0.04 m / s. It was also found that significant elevations in temperature (> 60°C) can be associated with serious failures, leading to the combustion of the insulating oil, resulting in speeds greater than or equal to 2 m / s, resulting in the maximum inclination of the fin (36.5°). In relation to downward flow, a small pressure drop in the system was observed, equivalent to 2.84 kPa, caused by the reduction in oil temperature.

**Resumo:** O presente trabalho teve como objetivo fornecer um estudo hidrodinâmico de um relé de gás a partir da ferramenta fluidodinâmica computacional, para prever perfis de velocidade, variação de temperatura e pressão do óleo ocasionados por grandes falhas elétricas no interior do transformador (curto-circuito), partir das propriedades físicas, coeficiente de expansão volumétrica e condições operacionais. Obtendo informações mais precisas a respeito do comportamento do óleo no sistema. A metodologia proposta foi baseada em três etapas: pré-processamento (desenvolvimento da malha computacional, a partir da geometria tridimensional real), processamento (definição das condições de contorno, escolha e resolução de modelos hidrodinâmicos em ambiente de simulação FlowSimulation) e pós-processamento (obtenção dos perfis de velocidade, inclinação da aleta, variação da temperatura e pressão). Os resultados mostraram que no escoamento ascendente, a aleta irá se deslocar quando a velocidade do fluido superar 0,04 m/s. Verificou-se também, que elevações significativas de temperatura (>60°C), podem estar associadas a falhas graves, levando a combustão do óleo isolante, acarretando velocidades maiores ou iguais a 2 m/s, resultando na inclinação máxima da aleta (36,5°). Em relação ao escoamento descendente, observou-se uma pequena perda de carga no sistema, equivalente a 2,84 kPa, provocado pela redução na temperatura do óleo.

**Keywords:** Buchholz relay, high voltage transformers, insulating mineral oil, CFD, single phase flow.

**Palavras-chaves:** Relé buchholz, transformadores de alta tensão, óleo mineral isolante, CFD, escoamento monofásico.

### 1. INTRODUÇÃO

Os transformadores de alta potência são um dos elementos de alto custo fundamentais para o sistema de energia elétrica, como usinas de geração de energia, sistemas de transmissão e grandes plantas industriais. A falta de energia dos transformadores de potência durante sua operação geralmente leva a uma perda expressiva de receita para a concessionária,

prováveis danos ao meio ambiente, riscos de explosão, incêndios e elevados custos de reparo ou substituição de equipamentos (DUARTE et al., 2010; N'CHO et al., 2016).

Uma companhia de distribuição de energia elétrica possui um número expressivo de transformadores em diversos tamanhos, oscilando sua capacidade de alguns kVA até centenas de MVA em toda sua rede de distribuição elétrica, sendo muito

confiáveis em sua operação contínua até chegarem próximo aos 40 anos de utilização, onde fica o limite das condições ideais de operação (N'CHO et al., 2016). Apesar disso, alguns transformadores estão operando por muito mais tempo, acima dos 50 anos. O transformador de potência (Figura 1) e os seus componentes incluindo a parte ativa (enrolamento e núcleo), transformador de carga, bucha, isolamento e tanque são componentes mais compassivos à deterioração com o tempo, sendo continuamente sujeitos a várias tensões operacionais durante seu tempo de operação, provocando sua degradação. Esta degradação pode levar a falhas catastróficas, resultando em perdas significativas, e interrupção de energia para clientes (ARIAS VELÁSQUEZ; MEJÍA LARA; MELGAR, 2019; HWANG, 2017; MURUGAN; RAMASAMY, 2019).

Da mesma forma, o custo da substituição de um transformador torna-se alto devido aos prazos de entrega, que em alguns casos excedem um ano ou mais de espera. O custo em substituir os transformadores oscila entre centenas a milhões de dólares (USD). Em pesquisa realizada por N'cho et al. (2016), a percepção precoce de falhas pode reduzir os custos de reparo em 75% e o prejuízo de receita em 60%, sendo essa economia de custos anual equivalente a 2% do preço de um novo transformador, ou seja, de 40.000 a 80.000 dólares podem ser economizados. Assim, é importante entender como e porque os transformadores de energia falham e sua estratégia de manutenção.



Fig. 1 Transformador de alta potência

Fonte: Savree, 2019.

Segundo Murugan e Ramasamy, (2019), no período de 1996 a 2010 as principais falhas em transformadores operando acima de 100 kV eram especialmente o comutador sob carga sendo o modo dominante de falha (31%), acompanhado pelo enrolamento de alta tensão (19%) e buchas (14%). Outra análise de dados na interrupção em transformadores de energia de 220 kV realizada no Egito, no período de 2002-2009, descobriram que os motivos das falhas estavam relacionados ao transformador, onde o Relé Buchholz e o alívio de pressão do sistema de proteção falharam, ocorrendo defeitos e danos ao equipamento, pontos quentes, fugas de óleo, de corrente elétrica sobre o sistema (TANG; HALE; THAKER, 2014). O objetivo deste trabalho é simular um sistema contendo o relé de buchholz, em diferentes vazões para compreender seu funcionamento em caso de falhas, utilizando as propriedades físico-químicas do óleo mineral e o coeficiente de expansão  $\beta$ .

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Relé de Buchholz

O relé Buchholz é um sistema de segurança operado por gás e óleo, instalado na tubulação entre a parte superior do tanque principal do transformador e o conservador. A função do relé é detectar uma condição anormal (falhas) dentro do tanque e enviar um alarme ou sinal de alerta. Em situações normais, o relé está totalmente abastecido de óleo. A operação ocorre quando os flutuadores ou aletas são arrastados por acúmulo de gás, ou é movido por uma onda de óleo, sendo desenvolvido pela primeira vez por Max Buchholz em 1921 (HWANG, 2017).

Apenas os transformadores que possuem conservador podem ser equipados com um relé Buchholz (Figura 2), já os sistemas fechados sem conservador por possuírem altura elevada do tanque, exigem características específicas para as buchas, dificuldades para manutenção (regulador de pressão, reposição de gás e atuação indevida da válvula alívio de pressão) e, principalmente, risco de formação de bolhas no óleo por saturação do nível de gases elevado no óleo são inviabilizados para a instalação do relé (Georgilakis et al., 2006; ROGERS, 1978).

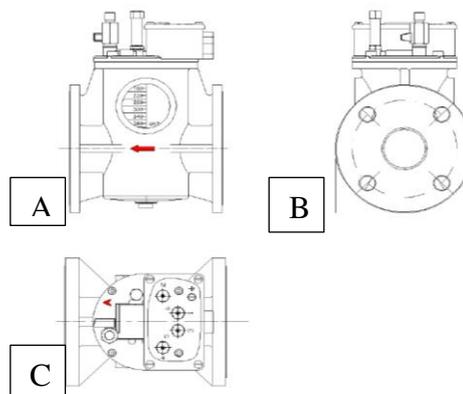


Fig. 2 Relé Buchholz Vistas seccionais: a) frontal, b) lateral e c) superior.

Em estudo realizado por Georgilakis et al. (2006), foi apresentada uma proposta de diagnóstico de falhas com redes de Petri em transformadores a partir dos sinais obtidos pelo rele de buchhols, levando em conta a complexidade da sua atuação durante diferentes tipos de falhas que o transformador possa apresentar, a fim de diagnosticar as falhas e reparar o transformador. Que classificou como os principais problemas que o rele pode detectar podem ser: Curto-circuito, falha de isolamento ou vazamento de óleo.

Bhat et al. (2013), em estudo semelhante, também propôs um sistema de segurança para aumentar ou suprir os métodos de proteção existentes na proteção de transformadores isolados a óleo, usando um sistema de sensor de sistemas microeletromecânicos (MEMS). As tecnologias tradicionais usadas para proteção envolvem detecção de pressão e temperatura em um relé Buchholz.

## 2.2 Características Físico-Químicas Do Óleo Mineral Isolante

Uma avaliação das características de refrigeração, ou da troca térmica dos líquidos isolantes no interior de um transformador, pode ser realizada através de suas propriedades físicas, tais como a condutividade, viscosidade e densidade. Um líquido isolante adequado deve permitir uma fácil convecção do óleo no interior do equipamento elétrico, a fim de facilitar a troca térmica com o meio ambiente (GALEANO; VIEIRA; VÁSQUEZ, 2017).

Em caso de falha o gás que é produzido principalmente pela decomposição química e física do óleo isolante e enrolamento devido a gradientes desordenados de alta tensão no transformador, pode gerar uma quantidade de gás de 1 cm<sup>3</sup> a 2 m<sup>3</sup>. Quase 70% do gás gerado em condições normais e de falha é composto por hidrogênio. Já nas falhas extremas, o deslocamento total do óleo atinge até 5 m/s, e o volume correspondente de gás devido à vaporização pode atingir 3,4 m<sup>3</sup> (Bhat et al., 2013).

### 2.3 Coeficiente de Expansão Volumétrica

A variação de densidade do óleo isolante possui uma relação de dependência direta com a temperatura, que pode ser observada através da expansão de volume de óleo do sistema. A propriedade que fornece essa informação é o coeficiente de expansão de volume (ou expansividade do volume)  $\beta$ , definida na Equação (1).

$$\beta = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (1)$$

Também pode ser expresso de forma aproximada em termos de variações finitas pela Equação 2:

$$\beta = \frac{\Delta V/V}{\Delta T} = \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta T} \quad (2)$$

Onde:

V: Volume em m<sup>3</sup>;

P: Pressão em Pa;

$\rho$ : Densidade em kg/m<sup>3</sup>;

T: Temperatura em °C.

### 2.4 Fluidodinâmica Computacional (CFD)

O avanço tecnológico ocasionado pelo desenvolvimento de máquinas com alto poder de processamento, permitiram aprimorar o uso da fluidodinâmica computacional (SIERRA et al., 2017). Essa ferramenta é fundamental no suporte do projeto, otimização e análise de máquinas e outros elementos, como o relé de Buchholz. Com esta ferramenta, é possível simular o comportamento dos fluidos e sua interação com diversos componentes. Isso pode diminuir significativamente o tempo de desenvolvimento de novas tecnologias e sua

otimização (SIERRA et al., 2017; TANG; HALE; THAKER, 2014). Em estudo realizado por Pendyala et al. (2016), mostra que a partir da discretização de modelos tridimensionais em CFD, foi possível realizar simulações do comportamento do óleo isolante no interior de um transformador de distribuição, analisando a eficiência na transferência de calor com a adição de aditivos: nanotubos de carbono (CNT) e nanofluidos à base de grafite. Mostrando que a aplicação de nanofluidos na indústria de transformadores pode levar à redução geral do tamanho do transformador.

A tecnologia da modelagem com uso da Fluidodinâmica Computacional – CFD tem se mostrado um método abrangente e eficaz para solucionar e decifrar complexos fenômenos de transporte e reações aplicadas na engenharia moderna. A modelagem e simulação com CFD empregada em processos bifásicos, por exemplo, visa compreender o comportamento de misturas complexas contendo hidrocarbonetos, muitos dos quais desconhecidos. É difícil prever as reações reais que ocorrem para cada espécie química (VALUS et al., 2017). Em geral, O método de solução via simulação é composto por três etapas: 1-Pré-processamento; 2-Solver; 3-Pós-processamento (MORGHI et al., 2018).

As características físicas de qualquer fluxo de fluido são regidas por três princípios básicos: a conservação da massa, a segunda lei de Newton e a conservação da energia. Esses princípios podem ser expressos em função de equações matemáticas, que são, na maior parte, equações diferenciais parciais. A técnica de dinâmica de fluidos computacional busca solucionar as equações que conduzem o fluxo de fluidos numericamente, enquanto a solução matemática prossegue no espaço e no tempo para obter a descrição completa do campo de fluxo numérico (WU; LI; WU, 2015).

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Simulação do escoamento no interior do relé de gás

Os efeitos da transferência de calor no transformador geram uma expansão volumétrica do fluido no sistema, que pode ser verificado pelo deslocamento de óleo. Para representar o sistema ou domínio computacional, foi modelado um relé de gás inteligente (Figura 3), com trechos de tubos a jusante e a montante, com diâmetros nominais de 80 mm e inclinação de 5°. A Figura 4 apresenta uma malha composta por 13.102 elementos, que será empregada na discretização dos modelos, resolvidos pelo software FlowSimulation.

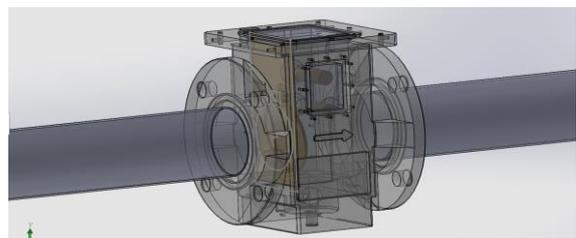


Fig. 3 Relé de gás em perspectiva tridimensional

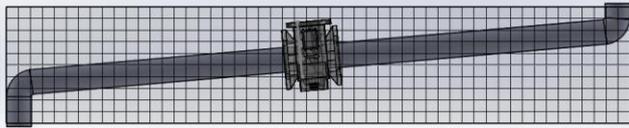


Fig. 4 Domínio da simulação: geometria e malha

Foi considerado neste estudo um transformador com capacidade de 20.000 litros de óleo, suportando uma variação térmica entre 40 e 80°C (NBR 5356), por um período de 01 hora. Para simular o escoamento utilizou-se as propriedades físicas e coeficiente de expansão volumétrica ( $0,000925 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) do óleo fornecido pela concessionária. Sendo assim, foram adotados perfis de velocidade, variação de temperatura e pressão no interior da válvula, para melhorar a compreensão do seu funcionamento, bem como o acionamento da aleta interna para baixa e alta velocidade, representando possíveis falhas elétricas (BRITO et al., 2013).

Para a realização das simulações foram consideradas três situações distintas (Tabela 1): escoamento ascendente do óleo (aquecimento em condições normais de funcionamento); escoamento descendente (resfriamento em condições normais de funcionamento); e escoamento ascendente por falha elétrica grave no interior do relé (elevação na temperatura fora das condições normais de funcionamento).

**Tabela 1: Condições de contorno para simulações CFD**

	Varição de Temp. ( $\Delta \text{ } ^\circ\text{C}$ )	Velocidad e (m/s)	Densida de ( $\text{kg/m}^3$ )	Viscosidad e ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )
Escoamento ascendente	40	0,04	895	9,9
Escoamento descendente	40	0,04	895	9,9
Falha elétrica	>60	2,00	895	9,9

#### 4. RESULTADOS

Todas as máquinas movidas a eletricidade provocam perdas no processo de transformação de energia em trabalho. Por exemplo, no processo de redução ou aumento de tensão dos transformadores elétricos, ocorre um aquecimento do núcleo que eleva a temperatura do óleo, alterando as suas propriedades como densidade, condutividade térmica e calor específico.

##### 4.1 Simulação do escoamento do óleo no relé de gás

Conforme mostra a Figura 5 (a) é possível observar a formação de vórtices no escoamento ascendente do óleo mineral, quando a velocidade do fluido é de 0,04 m/s. Neste caso, observou-se uma pequena variação de pressão (118 Pa) em regiões distintas, antes e após a aleta (Figura 5 (b)). Outro aspecto avaliado na simulação foi a perda de carga total decorrente da geometria da válvula, considerando a diferença de pressão entre os pontos de entrada e de saída de óleo (Figura 6). Verificou-se uma diferença de pressão de 3,68 kPa.

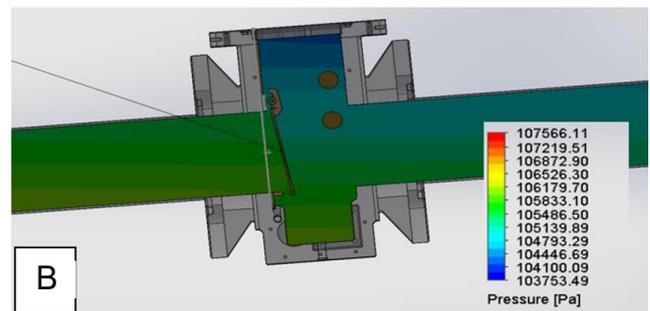
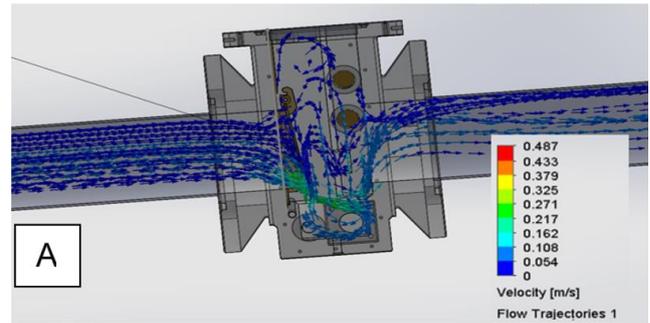


Fig. 5: (a) Perfil de velocidade; (b) Perfil de pressão do óleo isolante no interior do relé, com velocidade normal de operação, 0,04 m/s.

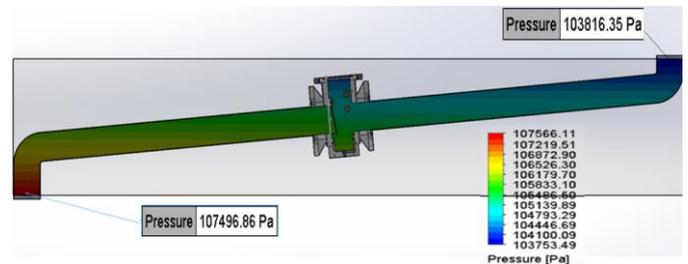


Fig. 6: Perfil de pressão no sistema (relé e tubulação).

Considerando as condições descritas na Tabela 1 para uma simulação de falha elétrica grave (gerando um grande deslocamento de óleo), com velocidade de 2,0 m/s, é possível verificar na Figura 7 (a) e Figura 7 (b), a formação de vórtices mais acentuados, apresentando maiores variações de pressão (28 kPa). Avaliando-se a diferença de pressão entre os pontos de entrada e de saída de óleo (Figura 8), verificou-se que a pressão máxima alcançada é de 1083 kPa.

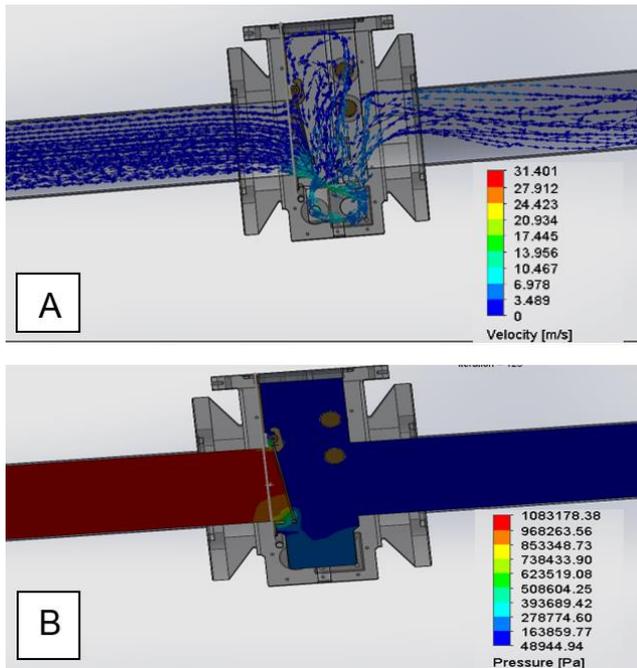


Fig. 7 (a) Perfil de velocidade; (b) Perfil de pressão do óleo isolante no interior do relé, com velocidade elevada por falha grave, 2,0 m/s.

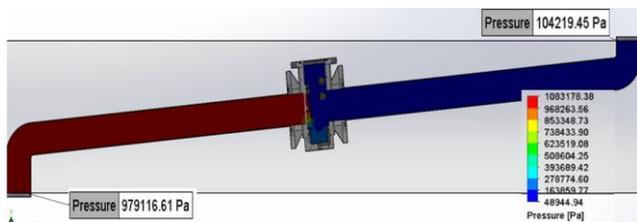


Fig. 8 Perfil de pressão no sistema (relé e tubulação), com velocidade de 2,0 m/s.

Como pode ser observado na Figura 9, a aleta poderá atingir seu limite de inclinação ( $36,5^\circ$ ) quando a velocidade do óleo for igual ou maior do que 2,0 m/s. Neste caso, tem-se um alívio na pressão da tubulação, propiciando uma área de escoamento maior para o óleo.

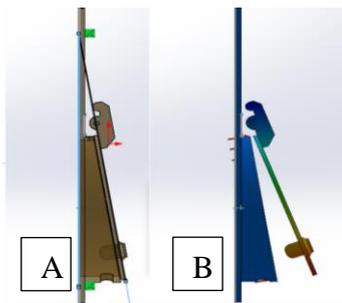


Figura 9: Aleta de segurança: (a) operação normal; (b) em caso de acionamento de segurança.

A Figura 10 apresenta a simulação ascendente do óleo, com velocidade elevada (2,0 m/s), no momento em que a aleta

atinge a abertura máxima (inclinação), decorrente de uma falha elétrica grave. Pode-se observar a redução da pressão, onde a máxima observada alcança aproximadamente 123 kPa.

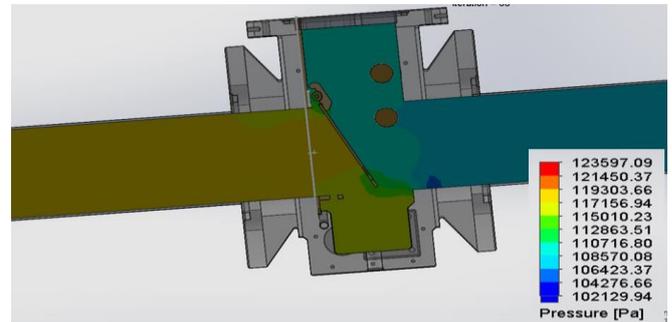


Fig. 10 Perfil de pressão do óleo isolante no interior do relé, 2,0 m/s, com acionamento da aleta de segurança.

A Tabela 2 resume as diferentes forças obtidas em cada condição (sentido ascendente), e os respectivos ângulos de abertura para a aleta.

**Tabela 2: Forças exercidas pelo óleo isolante no relé de buchholz.**

	Varição de Temp. ( $\Delta^\circ\text{C}$ )	Velocidade (m/s)	Força (N)	Ângulo de abertura ( $^\circ$ )
Expansão (normal)	40	0,04	0,67	0
Expansão (falha)	> 60	2,00	161,9	36,5

Por fim, foi analisado o retorno do óleo do tanque pulmão para o transformador, conforme observado na Figura 11. Neste caso, observa-se uma região com muita formação de vórtice sobre a face posterior da aleta. Porém, no sentido descendente, há o escoamento total do fluido através do orifício. É possível observar o comportamento do óleo (Figura 12) quando se tem uma redução da temperatura no interior do transformador, resultando em um escoamento menos turbulento com uma perda de carga menor que os demais (2,84 kPa).

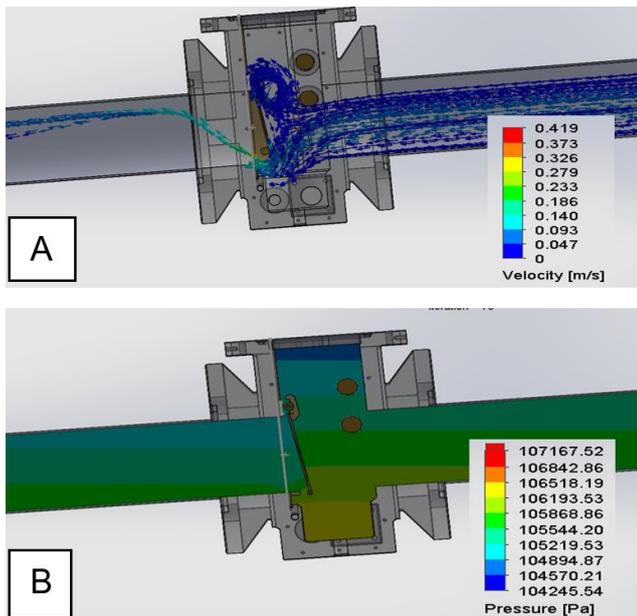


Figura 11: (a) Perfil de velocidade; (b) Perfil de pressão do óleo isolante no interior do relé, com fluxo de óleo descendente.

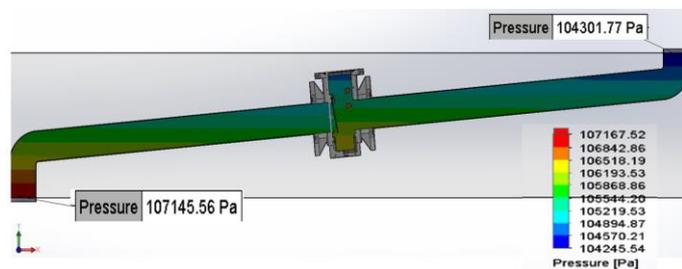


Fig. 12: Perfil de pressão no sistema (relé e tubulação), 0,04 m/s.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um estudo do comportamento fluidodinâmico do óleo em um relé de gás (baseado em um relé do tipo Buchholz) com o auxílio do software FlowSimulation. Foi possível modelar o escoamento do fluido em ambiente 3D, usando uma malha computacional gerada a partir de uma geometria real existente. Sobre o domínio computacional, foram aplicadas as propriedades físicas do óleo isolante, seu coeficiente de expansão volumétrico em função da temperatura, e diferentes condições de operação.

Ao analisar o escoamento interno, em sentido ascendente (funcionamento normal), pode-se concluir que velocidade igual ou menor do que 0,04 m/s não é capaz de deslocar a aleta, direcionando o escoamento do óleo para o orifício. No entanto, utilizando velocidade igual ou superior a 2,0 m/s, visando a representação de falhas elétricas graves (superaquecimento, curto-circuito ou combustão do óleo isolante), a aleta abrirá completamente, ativando o sistema de segurança do relé de gás. No sentido descende, a perda de carga não foi significativa, gerando um diferencial de pressão de 2,84 kPa.

Por meio dos resultados apresentados, compreendeu-se o comportamento hidrodinâmico do óleo no interior do relé de

gás, em diferentes situações operacionais, demonstrando ser uma ferramenta prática para a modelagem de sistemas de escoamentos monofásicos. Possibilitando observar de maneira mais detalhada o funcionamento de um dos principais sistemas de segurança utilizados em transformadores.

Como sugestões para futuros estudos, pode-se propor um estudo experimental através de uma planta em pequena escala visando aprimorar os resultados obtidos na modelagem. Outro aspecto importante é a aplicabilidade do estudo em CFD na análise do tempo de resposta do relé a diferentes tipos de falhas.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Projeto “Relé de Proteção com Monitoramento Ativo de Óleo e Gases e um Sistema Inteligente para Diagnóstico e Monitoramento de Transformadores e Reatores de Potência de Alta Tensão” (PD-07130-0060/2019), financiado pelo Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL.

## 6. REFERÊNCIAS

- Arias Velásquez, R.M., Mejía Lara, J.V., Melgar, A., 2019. Converting data into knowledge for preventing failures in power transformers. *Engineering Failure Analysis* 101, 215–229. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.027>
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 5356: Transformador de potência. Rio de Janeiro, pp. 59. 1993.
- Bhat, K.P., Oh, K.W., Hopkins, D.C., 2013. Feasibility of a MEMS Sensor for Gas Detection in HV Oil-Insulated Transformer. *IEEE Transactions on Industry Applications* 49, 316–321. <https://doi.org/10.1109/TIA.2012.2229681>
- Brito, A. T.; Dupont, C.; Gonzales, C. G. Guia de Manutenção para Transformadores de Potência. Cigré-Brasil, v. 1, pp. 248, 2013.
- Duarte, E., Falla, D., Gavin, J., Lawrence, M., McGrail, T., Miller, D., Prout, P., Rogan, B., 2010. A practical approach to condition and risk based power transformer asset replacement, in: 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Presented at the 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), IEEE, San Diego, CA, USA, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2010.5549580>
- Galeano, P.C.C., Vieira, L.W., Vásquez, T.G.P., 2017. ANÁLISE DA VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE ÓLEO MINERAL ISOLANTE DE TRANSFORMADORES ELÉTRICOS PARA O ESTADO DE SANTA CATARINA, in: 6º SICT-Sul - Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense. Presented at the 6º SICT-Sul - Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense.
- Georgilakis, P.S., Katsigiannis, J.A., Valavanis, K.P., Souflaris, A.T., 2006. A Systematic Stochastic Petri Net Based Methodology for Transformer Fault Diagnosis and Repair

Actions. *J Intell Robot Syst* 45, 181–201. <https://doi.org/10.1007/s10846-006-9033-9>

Hwang, G.H., 2017. A Review on Equipment Protection and System Protection Relay in Power System. *International Journal of Integrated Engineering* 9, 7–12.

Murugan, R., Ramasamy, R., 2019. Understanding the power transformer component failures for health index-based maintenance planning in electric utilities. *Engineering Failure Analysis* 96, 274–288. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.10.011>

N'cho, J.S., Fofana, I., Hadjadj, Y., Beroual, A., 2016. Review of Physicochemical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers. *Energies* 9, 367. <https://doi.org/10.3390/en9050367>

Pendyala, R., Ilyas, S.U., Lim, L.R., Marneni, N., 2016. CFD Analysis of Heat Transfer Performance of Nanofluids in Distributor Transformer. *Procedia Engineering, Proceeding of 4th International Conference on Process Engineering and Advanced Materials (ICPEAM 2016)* 148, 1162–1169. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.619>

Rogers, R.R., 1978. IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient Faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis. *IEEE Transactions on Electrical Insulation EI-13*, 349–354. <https://doi.org/10.1109/TEI.1978.298141>

SAVREE, 2019. Liquid Insulated Transformer. saVRee. URL <https://savree.com/en/3d-models/liquid-insulated-transformer/> (accessed 6.3.19).

Sierra, J., Ardila, J., Vélez, S., Maya, D., Hincapié, D., Sierra, J., Ardila, J., Vélez, S., Maya, D., Hincapié, D., 2017. Simulation Analysis of a Coandă-Effect Ejector Using CFD. *Tecciencia* 12, 17–25. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2017.22.3>

Tang, S., Hale, C., Thaker, H., 2014. Reliability modeling of power transformers with maintenance outage. *Systems Science & Control Engineering* 2, 316–324. <https://doi.org/10.1080/21642583.2014.901930>

Valus, M.G., Fontoura, D.V.R., Serfaty, R., Nunhez, J.R., 2017. Computational fluid dynamic model for the estimation of coke formation and gas generation inside petrochemical furnace pipes with the use of a kinetic net. *Can. J. Chem. Eng.* 95, 2286–2292. <https://doi.org/10.1002/cjce.23007>

Wu, D., Li, S., Wu, P., 2015. CFD simulation of flow-pressure characteristics of a pressure control valve for automotive fuel supply system. *Energy Conversion and Management* 101, 658–665. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.025>