

Análise Térmica para a Detecção de Vazamentos por Imagens

Felipe Bastos de Freitas Rachid¹ e Yuri Pacheco Rodrigues de Oliveira²

¹Professor Titular do Departamento de Engenharia Mecânica/UFF

²Aluno de graduação do Engenharia de Recursos Hídricos e do Meio Ambiente /UFF

Niterói, 08 de março de 2021

RESUMO

Uma das etapas do projeto de pesquisa para a quantificação de vazamentos de óleo/gás em poços subsea a partir de imagens envolve o estudo da formação das bolhas a condições de temperatura e pressão semelhante ao fundo do mar. Para isso, vê-se como necessário a análise dos fenômenos de transferência de calor associados às etapas de formação e ascensão das bolhas/gotas na coluna de água. Desse modo, este trabalho tem como objetivo definir qual o primeiro instante de tempo necessário para a superfície e o centro da bolha de gás ou gota de óleo, que estão submetidos a uma pressão de 200 atmosferas no fundo do mar, entrarem em equilíbrio térmico com o meio externo. A metodologia tomou por base um método de solução analítica por séries infinitas, com determinações do decaimento da temperatura em função do tempo. Os resultados obtidos do tempo necessário para cada uma atingir sua temperatura de equilíbrio com o meio externo foram de 52,6 segundos para o ar e 81,5 segundos para o óleo, na superfície; e de 292 segundos para o ar e 317 segundos para o óleo, no centro das bolhas. Por fim, as conclusões do trabalho mostram-se promissoras para a detecção dos fluidos por sensores térmicos.

APLICABILIDADE NA INDÚSTRIA - PMV

- 1) Viabilidade de uso de sensores térmicos no processo de caracterização dos vazamentos*

1. Introdução

A pesquisa desenvolvida pelo projeto tem como objetivo conseguir detectar vazamentos de fluidos, como gás e óleo, no fundo do mar a 200 atmosferas, por meio de imagens. Para isso, foram realizados experimentos em laboratórios com a finalidade de estudar a dinâmica do fenômeno de formação de bolhas a temperaturas ambientes e de tentar reproduzir as condições específicas de pressão e temperatura no fundo do mar, assim como entender os fenômenos de transferência de calor associados às etapas de formação e ascensão das bolhas/gotas na coluna de água.

Para isso, foram levados em consideração alguns estudos encontrados na literatura, como o trabalho que indica que na etapa da formação da bolha uma parte significativa de calor é perdida, na faixa de 40% a 60% do total [1]. Tendo essa

informação como referência, foi aplicado um método encontrado em pesquisas bibliográficas, que é uma solução analítica e é dada por uma série infinita. Esse tipo de análise aproximada incorre num erro inferior a 2% e é denominado na literatura de análise não-concentrada de primeiro termo [2].

2. Metodologia

Inicialmente foi desenvolvida uma abordagem através de um modelo de capacidade concentrada, oriundo da lei de resfriamento de Newton e da primeira lei da termodinâmica. Porém, com a sua aplicação foi identificado que alguns parâmetros principais como os coeficientes de transferência de calor global, representado por \bar{h} , e o número de Biot eram bastante elevados, sendo esse último muito superior a 1, que é o limite de aplicação do método para o qual a distribuição de temperatura ocorre de forma homogênea no interior do corpo.

Para determinar o coeficiente de transferência de calor global e posteriormente o número de Biot, foi necessário aplicar uma correlação empírica (1) entre adimensionais, como os números de Prandtl, Reynolds e Nusselt [3].

$$\overline{Nu}_d = 2 + (0,4Re_d^{1/2} + 0,06Re_d^{2/3}) Pr^{0,4} (\mu^\infty / \mu_o)^{1/4}. \quad (1)$$

Assim, foram encontrados valores de Biot de 132 para o gás a 200 atm e 73 para o óleo a 200 atm, assim como coeficientes de transferência de calor $\bar{h} = 3903 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $4399 \text{ W/m}^2\text{K}$, respectivamente. Como esse modelo não se mostrou preciso, então mostrou-se necessário uma outra alternativa. Foi aplicado um outro modelo que foi encontrado através de pesquisas realizadas na literatura para estudos onde números de Biot fossem suficientemente altos, evidenciando assim a necessidade de se trabalhar com outro método [1].

Essa solução consiste em determinações do decaimento da temperatura em função do tempo, a princípio para um termo aplicado para o centro dos fluidos. Foram realizados experimentos iniciais e identificado que apenas um termo era insuficiente para resolver o problema, pois a única condição imposta era que todos os pontos da série de dados tivessem Fourier maior que 0,2 e isso ocorria apenas no último ponto, onde a temperatura era muito próxima da temperatura de equilíbrio térmico com o meio externo estabelecida

como sendo de 5°C. Deste modo, foi preciso calcular quantos termos eram necessários para resolver essa solução analítica de séries infinitas, utilizando como recurso o uso da ferramenta em Fortran, que definiu a quantidade de elementos necessários para fazer as séries convergirem tanto na superfície como no centro dos diferentes fluidos. Para cada situação eram necessários diferentes números de termos, chegando até o limite de 5000 termos para determinar o perfil de temperatura em função do tempo para as superfícies dos fluidos na condição do poço, sendo de 200 atm.

3. Desenvolvimento

Nas condições físicas apontadas na Seção Metodologia, a bolha de gás tem um decaimento muito abrupto de temperatura na superfície. Foram necessários 1,3 segundos para a temperatura variar de 40 graus Celsius para aproximadamente 6 graus Celsius. Depois, obteve duração de mais 51 segundos para atingir a temperatura de equilíbrio térmico com o meio externo. Estes resultados podem ser observados através da Figura 1 e, numericamente, da Tabela 1 – ANEXO 1.

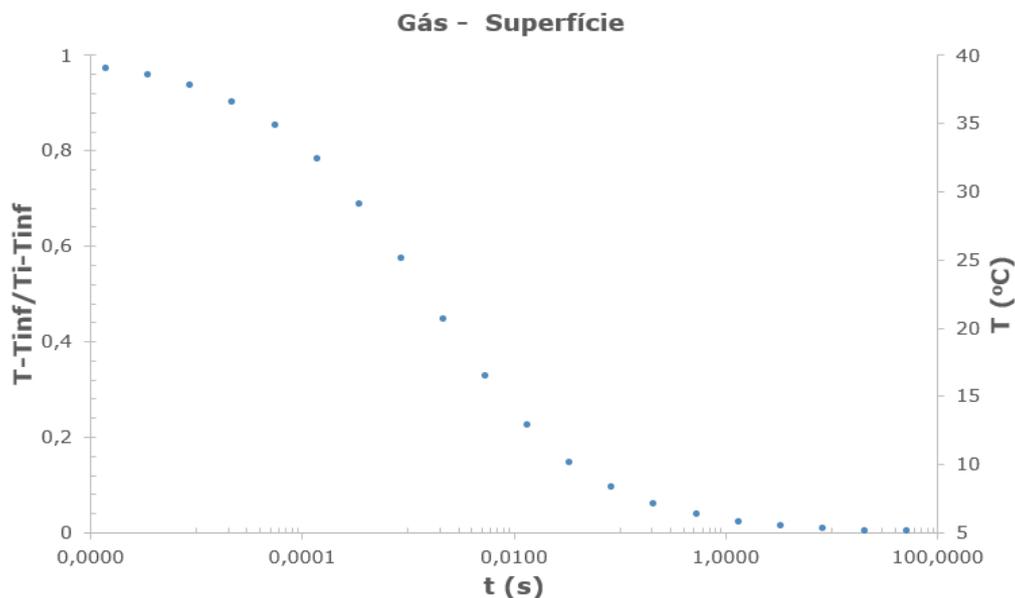


Figura 1: Gráfico do perfil de temperatura da superfície da esfera de gás a 200atm em função do tempo, em escala logarítmica.

A gota de óleo também apresentou decaimento abrupto de temperatura na superfície. Foram necessários 2,5 segundos para decair de 40 Graus Celsius para 6 Graus

Celsius. Após esse tempo, demorou-se 79 segundos para atingir a temperatura de equilíbrio com o meio externo. Estes resultados podem ser observados na Figura 2 e, numericamente, na Tabela 2 – ANEXO 1.

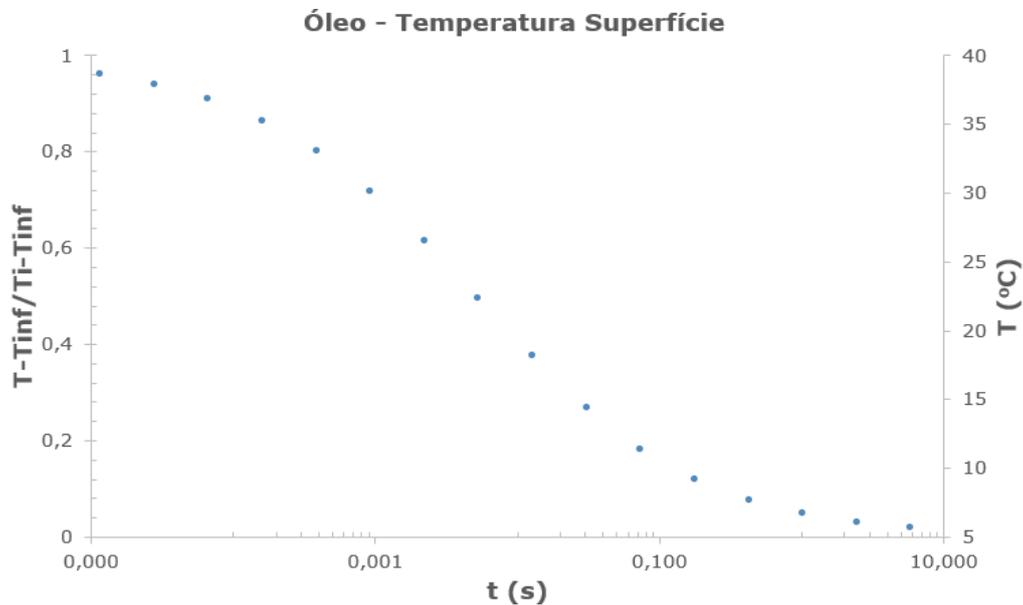


Figura 2: Gráfico do perfil de temperatura da superfície da esfera de óleo a 200atm em função do tempo, em escala logarítmica.

Porém, para o centro da esfera, os fluidos apresentaram uma tendência diferente de comportamento, quando comparado à superfície, com um decaimento muito lento.

Para o gás atingir a temperatura de 6 Graus Celsius foi preciso 169 segundos, e depois mais 123 segundos para encontrar a temperatura de equilíbrio com o meio externo.

No total, são necessários 292 segundos para o centro da esfera resfriar, como mostra a Figura 3 juntamente aos resultados numéricos apresentados na Tabela 1 – ANEXO 2.

Para o centro do óleo ter um decaimento de temperatura de 40 Graus Celsius até 6 Graus Celsius demorou 175 segundos, depois foram necessários mais 142 segundos aproximadamente para entrar em equilíbrio térmico com o meio externo a 5°C.

No total, são necessários 318 segundos para o centro da esfera de óleo resfriar, como mostra a Figura 4 juntamente aos resultados numéricos apresentados na Tabela 2 – ANEXO 2.

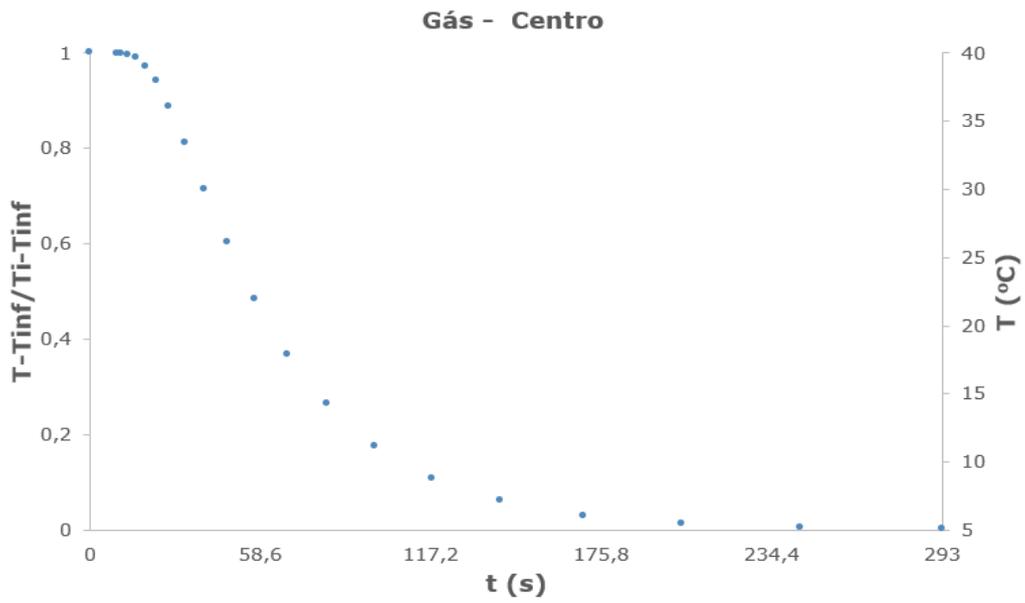


Figura 3: Gráfico do perfil de temperatura do centro da esfera de gás a 200atm em função do tempo.

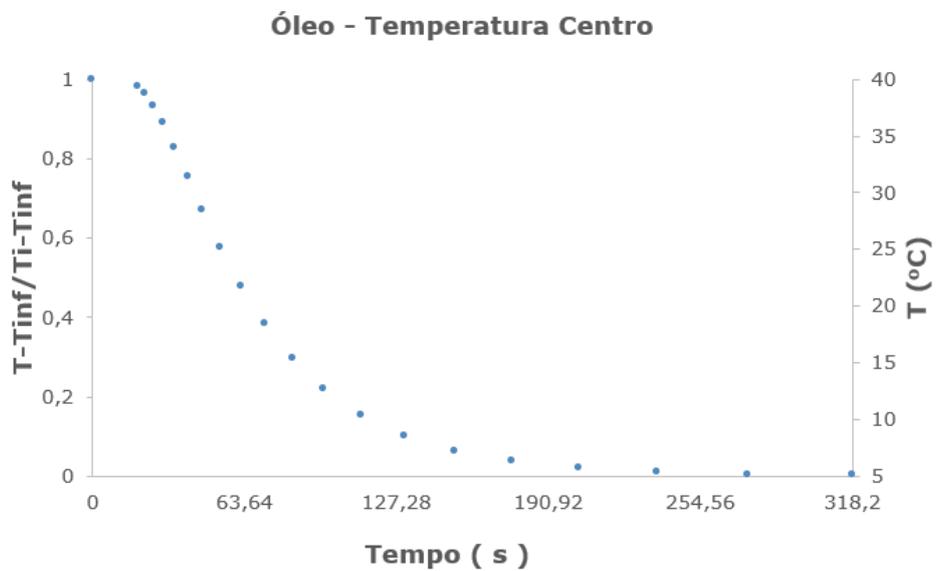


Figura 4: Gráfico do perfil de temperatura do centro da esfera de óleo a 200atm em função do tempo.

4. Conclusão

Os resultados encontrados mostram que os dois fluidos apresentam um tempo de resfriamento de 52,6 segundos para o centro da esfera de ar e 81,5 segundos para o centro da esfera de óleo. No centro das bolhas, esse tempo variou para 292 segundos para o ar e 317 segundos para o óleo.

A partir da análise dos dados e depois de ter encontrado os resultados apresentados na seção anterior, foi possível concluir que a utilização de um sensor térmico conseguirá detectar variações de temperatura para as substâncias trabalhadas.

Também seria a princípio viável acompanhar a trajetória de ascensão no centro da esfera de fluidos de gás e óleo, por causa do seu comportamento de perda de temperatura ser muito mais lento comparado à análise da superfície.

5. Próximas atividades

- 5.1 Realizar testes de laboratório para ratificar os resultados teóricos
- 5.2 Comparar os resultados obtidos com simulações em CFD

6. Referências Bibliográficas

[1] SCHMIDT, H. (1977b). Bubble formation and heat transfer during dispersion of superheated steam in saturated water – II – heat transfer from superheated steam bubbles to saturated water during bubble formation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 20 (6), p.635-646.

[2] ÇENGEL, Y.A.; GHAJAR, A.J. *Transferência de Calor e Massa – Uma abordagem prática*, 4ª ed. Porto Alegre: Mc Graw-hill, 2012.

[3] WHITAKER, S.: *Forced Convection Heat-Transfer Correlations for Flow in Pipes, Past flat Plates, Single Cylinders, Single Spheres, and Flow in Packed Beds and Tube Bundles*, *AIChEJ.*, vol. 18, p. 361, 1972.

7. Anexos

Anexo 1: Cálculo do perfil da temperatura da superfície da esfera**Tabela 1:** Tabela de cálculo do perfil de temperatura da superfície da esfera de gás 200 atm em função do tempo.

Forrier	t (s) - Superfície	T-Tinf/T0-Tinf	T (°C)
0,00E+00	0E+00	1	40
3,60E-09	0,000001	0,972	39,0
9,00E-09	0,000004	0,959	38,6
2,25E-08	0,000009	0,936	37,8
5,63E-08	0,000022	0,902	36,6
1,41E-07	0,000056	0,852	34,8
3,52E-07	0,000140	0,782	32,4
8,79E-07	0,000349	0,688	29,1
2,20E-06	0,000873	0,573	25,1
5,49E-06	0,002183	0,447	20,7
1,37E-05	0,005458	0,326	16,4
3,43E-05	0,013645	0,224	12,8
8,58E-05	0,034112	0,147	10,1
2,15E-04	0,085280	0,094	8,3
5,36E-04	0,213200	0,059	7,1
1,34E-03	0,533000	0,036	6,3
3,35E-03	1,332500	0,022	5,8
8,38E-03	3,331250	0,013	5,5
2,10E-02	8,328124	0,007	5,3
5,24E-02	20,820310	0,004	5,1
1,31E-01	52,05	0,001	5,0

Tabela 2: Tabela de cálculo do perfil de temperatura da superfície da esfera de óleo 200 atm em função do tempo.

Tau	t (s) - Superfície	T-Tinf/T0-Tinf	T (°C)
0.00E+00	0E+00	1.0	40
1.19E-08	0.0000051	0.976	39.2
2.86E-08	0.0000123	0.963	38.7
6.88E-08	0.0000295	0.943	38.0
1.65E-07	0.0000709	0.915	37.0
3.96E-07	0.00017011	0.872	35.5
9.50E-07	0.00040827	0.813	33.5
2.28E-06	0.00097985	0.733	30.7
5.47E-06	0.00235164	0.632	27.1
1.31E-05	0.00564394	0.515	23.0
3.15E-05	0.01	0.394	18.8
7.57E-05	0.03	0.284	14.9
1.82E-04	0.08	0.194	11.8
4.36E-04	0.19	0.128	9.5
1.05E-03	0.45	0.082	7.9
2.51E-03	1.08	0.052	6.8
6.03E-03	2.59	0.032	6.1
1.45E-02	6.21	0.019	5.7
3.47E-02	14.9	0.010	5.4
8.33E-02	35.8	0.005	5.2
2.00E-01	85.9	0.001	5.0

Anexo 2: Cálculo do perfil da temperatura do centro da esfera

Tabela 1: Tabela de cálculo do perfil de temperatura do centro da esfera de gás 200 atm em função do tempo.

Forrier	t (s) - Centro	T-Tinf/T0-Tinf	T (°C)
0,00E+00	0	1	40
2,31E-02	9,2	0,99985984	39,995
2,77E-02	11,0	0,99921572	39,973
3,33E-02	13,2	0,99675573	39,9
3,99E-02	15,9	0,98956707	39,6
4,79E-02	19,0	0,97280044	39,0
5,75E-02	22,8	0,94046553	37,9
6,89E-02	27,4	0,8873628	36,1
8,27E-02	32,9	0,81126655	33,4
9,93E-02	39,5	0,71420191	30,0
1,19E-01	47,3	0,60222415	26,1
1,43E-01	56,8	0,48395093	21,9
1,72E-01	68,2	0,36859645	17,9
2,06E-01	81,8	0,26423112	14,2
2,47E-01	98,2	0,17664002	11,2
2,96E-01	117,8	0,10879117	8,8
3,56E-01	141,4	0,06078281	7,1
4,27E-01	169,7	0,03022364	6,1
5,12E-01	203,6	0,01306816	5,5
6,15E-01	244,3	0,00477809	5,2
7,38E-01	293,2	0,00142857	5,0

Tabela 2: Tabela de cálculo do perfil de temperatura do centro da esfera de óleo 200 atm em função do tempo.

Tau	t (s) - Centro	T-Tinf/T0-Tinf	T (°C)
0,00E+00	0	1	40
4,42E-02	18,97	0,98218297	39,4
5,12E-02	22,00	0,96362819	38,7
5,94E-02	25,52	0,93339348	37,7
6,89E-02	29,60	0,88893073	36,1
7,99E-02	34,34	0,82915443	34,0
9,27E-02	39,84	0,75487890	31,4
1,08E-01	46,21	0,66879787	28,4
1,25E-01	53,60	0,57505295	25,1
1,45E-01	62,18	0,47855983	21,7
1,68E-01	72,13	0,38429168	18,5
1,95E-01	83,67	0,29667437	15,4
2,26E-01	97,05	0,21916753	12,7
2,62E-01	112,58	0,15403164	10,4
3,04E-01	130,60	0,10224503	8,6
3,53E-01	151,49	0,06354488	7,2
4,09E-01	175,73	0,03659563	6,3
4,75E-01	203,85	0,01929402	5,7
5,50E-01	236,5	0,00918191	5,3
6,39E-01	274,3	0,00388012	5,1
7,41E-01	318,2	0,00142857	5,0

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Petrobras/Cenpes e da Agência Nacional de Petróleo – ANP.