

## MODELAGEM ANALÍTICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM REGIME PERMANENTE EM *FLOWLINES*

Maria Fernanda Oliveira Santos <sup>1</sup>  
Flávio Gustavo Ribeiro Freitas <sup>2</sup>

### RESUMO

As atividades de produção *offshore* da indústria petrolífera enfrentam desafios diários, associados a manutenção da garantia de escoamento dos fluidos presentes nos reservatórios. À medida que esses reservatórios se localizam em lâminas d'águas profundas e ultraprofundas, os dutos de produção também são instalados em grandes profundidades, sendo submetidos a condições de baixa temperatura da água do mar (~5°C). Tal condição propícia o resfriamento dos fluidos que escoam pelos dutos, fator primordial para probabilidade de ocorrência de deposição de parafina. Nesse trabalho foi construído uma modelagem matemática baseada em equações de transferência de calor para o dimensionamento de camada de isolante térmico que evite o escoamento do petróleo em temperaturas inferiores a Temperatura de Inicialização do Aparecimento de Cristais (TIAC) de parafinas. Foram analisados três casos, no primeiro o *flowline* sem isolamento térmico, os outros dois com aplicação de uma camada de polipropileno de 20 e 40 mm de espessuras, variou-se também a vazão de produção em 2400 m<sup>3</sup>/dia (início da produção) e 1200 m<sup>3</sup>/dia (reservatório maduro). Com os resultados dos perfis de temperatura do petróleo ao longo do escoamento da simulação 1 – 2, foi verificado que a operadora desse poço iria enfrentar problemas de incrustação de parafinas, desde o início da produção e ao longo da vida útil do poço, pois o petróleo atingiu temperaturas inferiores a TIAC em mais de 3 km de duto. Nas simulações 5 – 6 foi verificado que a espessura assegurava um escoamento com temperatura acima de 47 e 37 °C, ou seja, superiores a TIAC.

**Palavras-chave:** Dutos submarinos, *Flowline*, Transferência de calor, Parafinas.

### INTRODUÇÃO

As atividades de produção *offshore* da indústria petrolífera voltadas para exploração de poços em lâminas d'águas profundas e ultraprofundas, enfrentam desafios diários associados a manutenção da garantia de escoamento do petróleo nos dutos submarinos que demandam tecnologias, a fim de superar possíveis problemas que afetem o escoamento da produção (MACHADO JÚNIOR, 2008).

À medida que os reservatórios de petróleo e gás se localizam em profundidades maiores, a temperatura marinha tende a se aproximar de 4 a 5 °C, temperatura muito baixa, e, por consequência, acarretará no resfriamento dos fluidos que escoam no interior dos dutos submarinos, podendo ter a garantia de escoamento desses fluidos afetada devido a

<sup>1</sup> Mestrando do Curso de metrologia do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO, [mfernanda2202@hotmail.com](mailto:mfernanda2202@hotmail.com);

<sup>2</sup> Professor orientador: Doutor, Universidade Federal Sergipe - UFS, [flaviogus@hotmail.com](mailto:flaviogus@hotmail.com).

probabilidade de ocorrência de problemas operacionais como, por exemplo, a formação de hidratos e deposição de parafinas (FRAGA, 2017).

O decréscimo da temperatura do óleo ao longo do escoamento está associado aos fenômenos da transferência de calor que regem a dissipação da energia térmica entre os fluidos que escoam dentro da linha, o duto e o ambiente marinho (FRAGA, 2017).

O presente trabalho abordará conceitos, mecanismos e equações analíticas da transferência de calor em dutos submarinos necessários para a realização da modelagem matemática da transferência de calor de um duto rígido, classificado estruturalmente como *flowline*, para ser realizada simulações do comportamento do perfil de temperatura ao longo do escoamento nas condições de fluxo monofásico de petróleo, regime permanente e fluido incompressível. Alicerçado nisso, será analisado a necessidade da aplicação da camada de isolante térmico e a sua respectiva espessura que minimize riscos de deposição de parafinas.

## REFERENCIAL TEÓRICO

### 1. Dutos submarinos

A principal função dos dutos é realizar o transporte dos fluidos presentes no reservatório (petróleo, água e gás natural) até as instalações de tratamento (SOUZA, 2015). De acordo com Salgado e Azevedo (2016), os dutos encontram-se dispostos no sistema submarino em diferentes formas de configuração, sendo estas nomeadas como:

- *Jumper*: são trechos pequenos de dutos usados em aplicações dinâmicas ou estáticas.
- *Risers*: são trechos de dutos em suspensão que interligam um trecho horizontal (*flowline*) a Unidade Estacionária de Produção (UEP), estão sujeitos as cargas dinâmicas.
- *Flowline*: são trechos de dutos que está apoiado no leito marinho submetido apenas a pressão hidrostática da água do mar (carga estática), sofrendo apenas esforços cíclicos durante a fase de instalação.

Segundo Malta (2010), os dutos submarinos ainda podem ser classificados quanto a sua estrutura, sendo estas nomeadas como:

- Dutos flexíveis: caracterizados por apresentarem baixa rigidez a flexão e elevada rigidez axial. Tais características provem da sua configuração estrutural composto, fundamentalmente, por camadas de composições poliméricas e de materiais metálicos.

- Dutos rígidos: caracterizados por apresentarem alta resistência a cargas axiais, radiais e de flexão. Tais característica provem da sua estrutura composta por uma única camada de aço carbono, a qual exerce todas as funções mecânicas e de estanqueidade. Em geral, possui camadas internas/externas de revestimento anticorrosivos para conceder ao duto resistência a corrosão e camada externa de isolante para conceder resistência térmica (LIMA, 2017).

## 2. Transferência de calor em dutos submarinos

A transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido ao diferencial de temperatura entre dois corpos ou entre o corpo e a vizinhança, ocorrendo por meio de condução, convecção e radiação. Em dutos submarinos, a transferência de calor é tipicamente analisada na direção radial, devido ao diferencial de temperatura entre os fluidos que escoam no interior da linha e o ambiente externo, e descrita por fenômenos de condução e convecção (FRAGA, 2017; MACHADO JÚNIOR, 2008).

## 3. Análise térmica da transferência de calor em dutos submarinos

Segundo Silva (2014), a análise térmica da transferência de calor em dutos submarinos pode ser realizada através da analogia da resistência térmica que engloba diferentes variáveis da transferência de calor, sendo estas as: resistência a transferência de calor por termos convectivos ( $R_{conv}$ ) e por termos condutivos ( $R_{cond}$ ). O somatório das resistências preditas resultam na resistência equivalente do sistema ( $R_{eq}$ ) expressa pela Equação (1).

$$R_{eq} = R_{conv} + R_{cond} = \frac{1}{2\pi r L h} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_A} \quad (1)$$

onde  $L$  é o comprimento da linha [W/m.K],  $r_1$  é o raio referente a camada interna do duto [m],  $r_2$  é o raio referente a camada externa do duto [m],  $h$  o coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m<sup>2</sup>K],  $k$  é a condutividade do fluido [W/m.K].

O coeficiente de transferência de calor por convecção é calculado pela Equação (2) em função do número de Nusselt (ver Equação 3 e 4), o qual depende dos parâmetros adimensionais número de Reynolds ( $Re$ ) (ver Equação 5) e de Prandtl ( $Pr$ ) (ver Equação 6).

Coeficiente de transferência de calor por convecção  $h = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (2)$

Nusselt para escoamento externo cruzado em cilindro  $Nu = C Re_e^m Pr_e^{1/3} \quad (3)$

Nusselt para escoamento interno turbulento (Re > 2300)  $Nu = [(f/8)(Re - 1000)Pr] / \left[ 1 + 12,7 \left( \frac{f}{8} \right)^{1/2} \left( Pr^{2/3} - 1 \right) \right] \quad (4)$

Número de Reynolds  $Re = \frac{\rho u_{méd} D_h}{\mu} \quad (5)$

Número de Prandtl  $Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (6)$

onde  $u_{méd}$  é a velocidade média do escoamento [m/s],  $D_h$  é o diâmetro hidráulico,  $f$  é o fator de atrito (adimensional),  $C, m$  são constantes (expressa no Incropera et al. 2008),  $C_p$  é o calor específico (J/kg.K),  $\mu$  é a viscosidade dinâmica (Pa.s).

Conhecendo os parâmetros adimensionais, calcula-se o coeficiente de transferência de calor por convecção, determina-se a resistência equivalente do sistema e, por fim, estima-se a taxa de transferência de calor no duto rígido, através da Equação (7) (MOREIRA, 2019).

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{eq}} = \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_i} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_A} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_B} + \frac{1}{2\pi r_3 L h_e}} \quad (7)$$

#### 4. Perfil de temperatura do escoamento

A variação da temperatura do fluido interno ao longo do comprimento do duto é decorrente da dissipação da energia térmica do fluido para o meio externo ao longo do escoamento em regime permanente (SILVA; CÂMARA & NETO, 2020). A análise do decréscimo de temperatura pode ser feita através de um balanço de energia para um volume de controle<sup>3</sup> infinitesimal com entrada e saída de massa, como está representado na Figura 1.

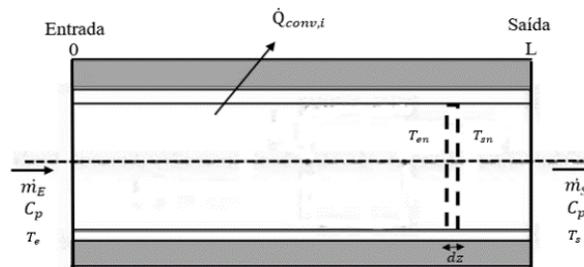


Figura 1. Perfil ilustrativo de um duto rígido com a representação de um volume de controle.

Fonte: Adaptado de Silva; Câmara & Neto (2020).

A temperatura na saída do volume de controle será obtida através da Equação (8):

$$T_{sn} = (T_{on} - T_a)e^{(-1/(\dot{m}C_p R_{eq}))} + T_a \quad (8)$$

onde  $T$  é a temperatura,  $\dot{m}$  é a vazão mássica,  $C_p$  é o calor específico, índice  $a$  representada a água, índice  $o$  representada o óleo e o índice  $s$  representada a entrada do volume de controle.

#### 5. Temperatura como fator para deposição de parafinas

De acordo com Azevedo e Teixeira (2003), a parafina é definida como uma cera orgânica solúvel, de alto peso molecular, presente no óleo cru nas condições termodinâmicas do reservatório, que se deposita nas paredes dos dutos de forma branda à medida que o óleo escoar sofrendo o decréscimo de temperatura para valores inferiores a Temperatura de Inicialização do Aparecimento de Cristais (TIAC) – valor crítico para o petróleo inicializar a solidificação dos primeiros cristais de parafinas.

<sup>3</sup> É um volume arbitrário no espaço através do qual o fluido escoar (INCROPERA et al. 2008).

Segundo Azevedo e Teixeira (2003), a deposição dos sólidos pode chegar a obstruir a seção do duto totalmente ou parcialmente conforme está ilustrado na Figura 2.

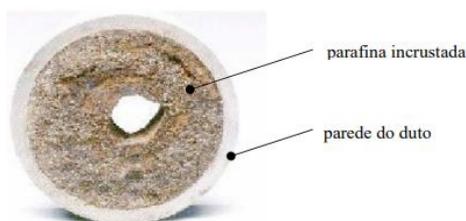


Figura 2. Duto com incrustação de parafina.

Fonte: AZEVEDO e TEIXEIRA (2003).

De acordo com Baldotto (2014), os principais métodos de controle ou remoção das parafinas são químicos (injeção de inibidores de parafinas), mecânicos (passagem PIG's de limpeza<sup>4</sup>, abrasivos ou raspadores para limpeza das linhas) e térmicos (adição da camada de isolante térmico). O isolamento térmico ainda é o mais usual na indústria do petróleo, sendo encontrado geralmente como material do tipo poliuretano e polipropileno (QUEIROZ, 2007).

## METODOLOGIA

### 1. Problema físico

O cenário deste trabalho é composto por uma plataforma de produção de petróleo interligada a uma árvore de natal (ANM) através de um duto rígido com trechos *riser* e *flowline*. A plataforma está instalada em uma lâmina d'água de 1000 m e o reservatório está localizado a 743 m do leito marinho. A temperatura do petróleo no reservatório é 80 °C e sua pressão estática é de 200 kgf/cm<sup>2</sup>. O fluido escoa do reservatório até árvore de natal molhada atingindo nesse ponto temperatura de 60 °C e pressão de 120 kgf/cm<sup>2</sup>, ilustrado na Figura 3.

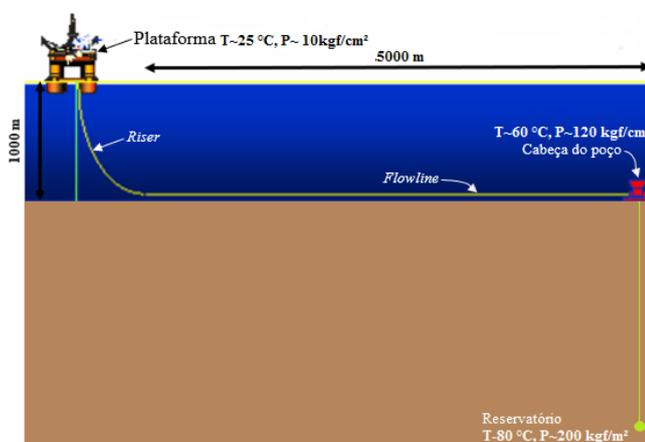


Figura 3. Esquema típico de produção.

<sup>4</sup> Dispositivo que percorre a região interna do duto de maneira a limpar o mesmo.

Esse trabalho foca na análise da transferência de calor apenas no trecho *flowline* de 5 km de extensão com diâmetro nominal de 6", fabricado de aço carbono, especificado tecnicamente pelos dados da Tabela 1. Esse trecho de duto está exposto a temperatura da água do mar de 4 °C nessa região e as propriedades da água do mar estão expressas na Tabela 2.

Tabela 1. Especificações técnicas e propriedades do material do duto.

Parâmetro	Valores
Diâmetro interno ( <i>mm</i> )	154,06
Diâmetro externo ( <i>mm</i> )	168,28
Espessura das paredes do duto ( <i>mm</i> )	7,11
Rugosidade superficial do duto novo ( <i>m</i> )	0,00015
Peso nominal das linhas vazias no mar ( <i>kg/m</i> )	28,26
Condutividade térmica do aço ( <i>J/kg.k</i> )	43

Tabela 2. Propriedades da água do mar para a modelagem.

Propriedades físicas	Fase contínua
Densidade ( <i>kg/m<sup>3</sup></i> )	994,12
Capacidade calorífica ( <i>J/kg.°C</i> )	4181,7
Viscosidade cinemática ( <i>kg/m.s</i> )	0,00108
Condutividade térmica ( <i>W/m.K</i> )	0,6069

Já as propriedades do petróleo que escoam no interior do *flowline*, foram estimadas a partir de correlações que são funções da temperatura e do grau API, conforme a Tabela 3. Com exceção da massa específica, que é constante e igual a 852,0 *kg/m<sup>3</sup>*, analisada experimentalmente a temperatura de referência de 57 °C (ANDRADE, 2018).

Tabela 3. Equações para o cálculo das propriedades físicas do petróleo.

Propriedades físicas	Equação	Nº	Fonte
Viscosidade (cP)	$\mu_{od} = [3,141(10^{10})](T_{ref} - 360)^{-3,444} [\log(API)]^a$ $a = 10,313[\log(T - 460)] - 36,447$	9	AHMED (1946)
Calor específico ( <i>J/kg.°C</i> )	$C_{po} = \frac{0,388 + 0,00045T_{ref}}{\sqrt{\gamma_o}} * 4186,798$	10	Ganbill (1957)
Condutividade térmica ( <i>W/m.K</i> )	$k_o = \frac{0,388 + 0,00045T_{ref}}{\sqrt{API}} * 1,7296$	11	Batista (2009)

Onde  $\mu_{od}$  é a viscosidade do óleo [cP],  $T_{ref}$  é a temperatura no ponto de estudo [°R],  $API$  é a gravidade API do óleo,  $a$  é um coeficiente adimensional,  $\gamma_o$  é a densidade relativa do óleo,  $C_{po}$  é o calor específico do óleo [j/kg.K],  $k_o$  é a condutividade térmica do óleo [W/m.K].

## 2. Requisitos de projeto

Neste trabalho foram empregados os princípios da conservação de massa, conservação da energia e da analogia termoelétrica considerando os fenômenos de:

- Convecção forçada no interior do *flowline* devido ao escoamento do petróleo;
- Condução de calor através da parede de aço carbono;
- Condução de calor através da parede de material isolante;
- Convecção forçada exterior do *flowline* devido a correnteza da água do mar.

Esta análise considerou uma modelagem bidimensional de um escoamento monofásico de petróleo, e para tal foram consideradas como hipóteses simplificadoras:

- Fluido incompressível e o escoamento em regime permanente;
- Variação da energia cinética e potencial desprezíveis ao longo do escoamento;
- Propriedade do duto e do isolante térmico constantes;
- Transferência de calor por radiação e condução axial desprezíveis.

### 3. Estudo de caso

O estudo abordará dois cenários de produção: o primeiro refere-se a fase inicial de produção do poço (vazão de 2400 m<sup>3</sup>/dia) e o segundo a fase onde o reservatório já está maduro (vazão de 1200 m<sup>3</sup>/dia). Na Tabela 4 estão descritos os dados de ambos os cenários.

Tabela 4. Dados de entrada: 1 – vazão de 2400 m<sup>3</sup>/dia; 2 – vazão de 1200 m<sup>3</sup>/dia.

Parâmetro	Valores
Vazão mássica 1 (kg/s)	23,67
Vazão mássica 2 (kg/s)	11,83
Velocidade do escoamento 1 (m/s)	1,50
Velocidade do escoamento 2 (m/s)	0,75
Velocidade da correnteza da água do mar (m/s)	1,20
TIAC do petróleo (°C)	30

Para tanto, este estudo de transferência de calor considerou o caso do duto sem e com isolante térmico com espessuras de 20 mm e 40 mm. Essas análises foram feitas dividindo o duto em 5 mil volumes de controle com 1 m de comprimento cada.

O material selecionado como isolante térmico foi o polipropileno sintático, devido as características de baixa condutividade térmica, alta resistência à pressão hidrostática, insolubilidade em água e não degradar no envelope de temperatura do sistema.

Para estudar o comportamento do perfil de temperatura do óleo ao longo do escoamento nos dois cenários de produção, no duto sem e com isolante térmico, fez-se um estudo de caso considerando que haveria influência da temperatura nas propriedades do fluido, que causaria alterações nos parâmetros adimensionais e no coeficiente de convecção das simulações. Na Figura 4 está representado o fluxograma que ilustra as simulações dos estudos de caso proposto.

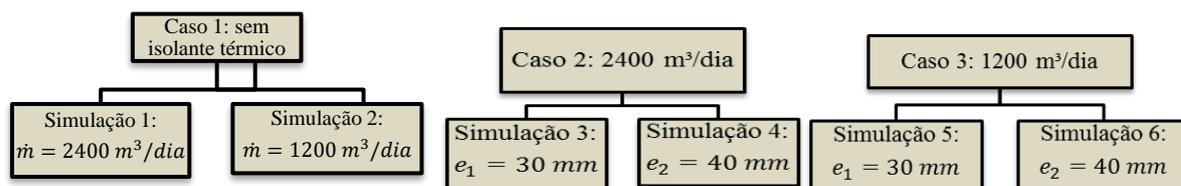


Figura 4. Esquema de simulação para os quatro casos definidos no estudo.

As simulações foram realizadas utilizando equações analíticas<sup>5</sup> de transferência de calor para cada volume de controle, sendo que o dado de temperatura na saída do primeiro volume de controle será o dado da entrada do próximo volume de controle e assim sucessivamente. Na Figura 5 está descrito o fluxograma sobre metodologia para obtenção dos perfis de temperaturas dos casos 1, 2 e 3.

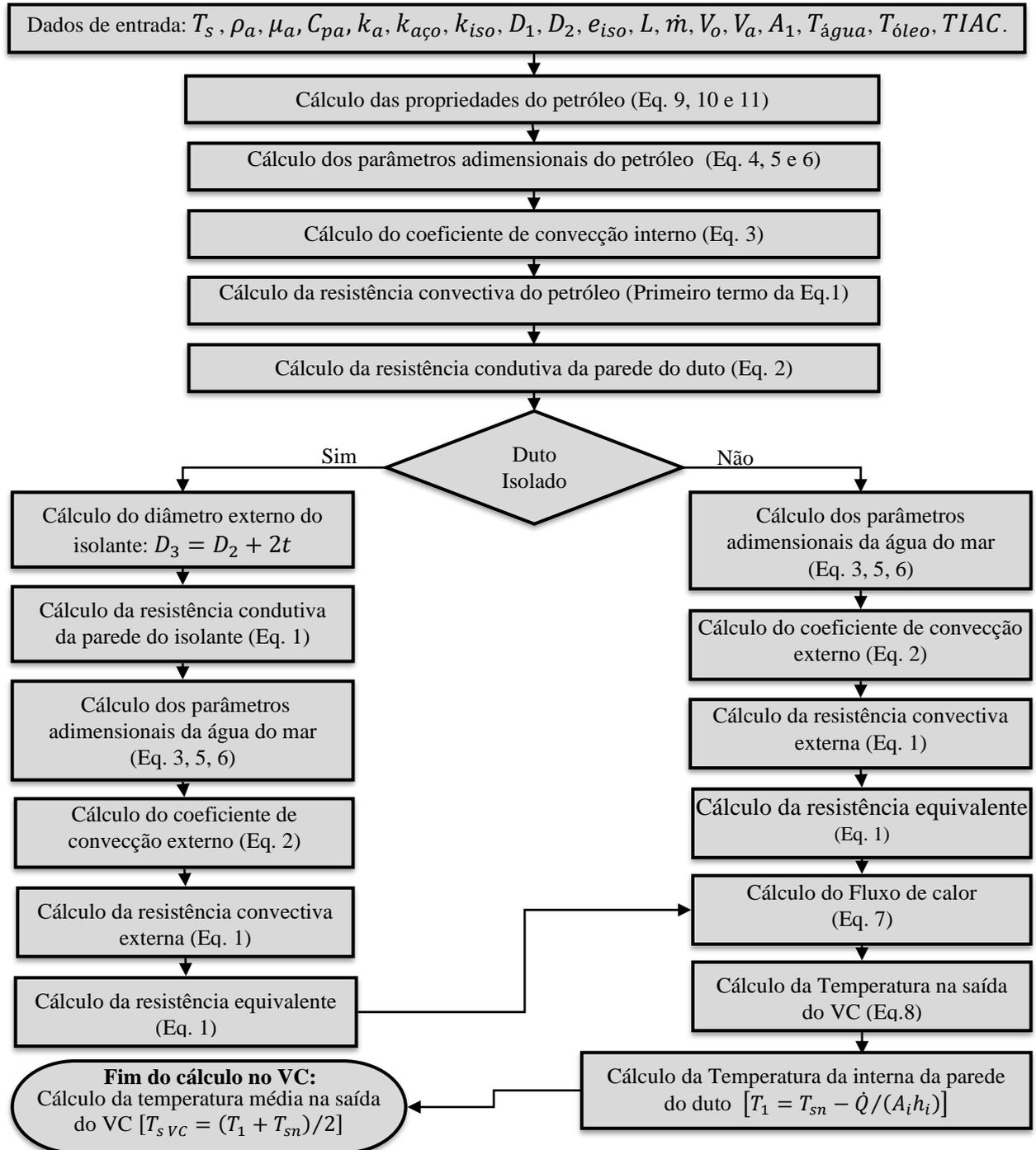


Figura 5. Metodologia para cálculo da temperatura média de saída no volume de controle.

<sup>5</sup> Possuem desvios na faixa de 5 – 15%, então, foi aplicado um coeficiente de segurança de 10% no valor final da taxa de transferência de cada volume de controle.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 1. Caso 1: *flowline* sem isolamento térmico

As primeiras análises realizadas foram para o duto sem isolamento térmico, os resultados referente ao coeficiente de convecção interno, resistência térmica equivalente, e temperatura média do óleo estão expressos na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados dos parâmetros da transferência de calor obtidos nas simulações 1 e 2.

Resultados gerais	Entrada do duto		Saída do duto	
	2400 m <sup>3</sup> /dia	1200 m <sup>3</sup> /dia	2400 m <sup>3</sup> /dia	1200 m <sup>3</sup> /dia
Coeficiente de convecção interno	3377	1684	1171	498
Resistência térmica equivalente	0,00153	0,00215	0,00269	0,00508
Temperatura média do petróleo	60	60	13	10

O decréscimo da temperatura expresso na Tabela 5 pode ser melhor visualizados graficamente em função do comprimento da linha conforme ilustrado na Figura 6.

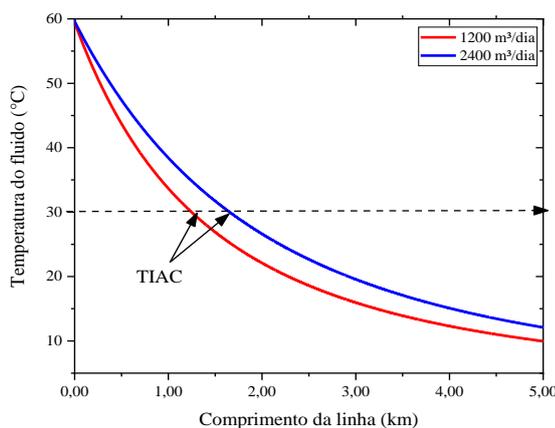


Figura 6. Perfil de temperatura para o caso do duto sem isolante térmico.

Na Figura 6 foi visualizado que a temperatura ao longo do comprimento do duto é reduzida para valores muito inferiores a TIAC, em ambos os cenários de produção, mais de 3,5 km de comprimento do duto. Os baixos valores de temperatura estão associados ao duto ser construído de um material altamente condutivo (aço carbono), o qual prover baixo valor de resistências térmicas favorecendo a troca mais efetiva de calor com o meio externo.

### 2. Caso 2 e caso 3: *flowline* com isolamento térmico

Nessa análise foi adicionada uma camada externa de isolante térmico de polipropileno com condutividade térmica igual a 0,16 (j/kg. K), visando promover proteção térmica ao duto. Na Tabela 6 está apresentado os valores da resistência condutiva para cada espessura especificada.

Tabela 6. Resultados dos parâmetros da transferência de calor do escoamento externo.

Dados	Espessura do isolante térmico (mm)	
	20	40
Coefficiente de convecção externo ( $W/m^2 \cdot K$ )	3182	3075
Resistência a condução do isolante térmico (m. K/W)	0,214	0,389
Resistência a convecção externa ( $10^{-4}$ m. K/W)	4,8	4,17

A adição da camada de isolante térmico aumenta o diâmetro externo do duto, portanto, haverá variação nos parâmetros adimensionais referentes ao escoamento externo cruzado da água do mar sobre o duto que acarretará em diferentes coeficientes de convecção externos e de resistência a convecção da água do mar, conforme resultados expressos na Tabela 8.

Os resultados referentes aos parâmetros da transferência de calor das simulações 3 e 5 estão expressos na Tabela 7 e os referentes as simulações 4 e 6 expressos na Tabela 7.

Tabela 7. Resultados dos parâmetros da transferência de calor das simulações 3 e 5.

Resultados gerais	Entrada do duto		Saída do duto	
	2400 m <sup>3</sup> /dia	1200 m <sup>3</sup> /dia	2400 m <sup>3</sup> /dia	1200 m <sup>3</sup> /dia
Coefficiente de convecção ( $W/m^2 \cdot K$ )	3656	1823	2360	810
Resistência térmica equivalente (m. K/W)	0,214	0,213	0,217	0,212
Temperatura média do petróleo (°C)	60	60	37	23

Tabela 8. Resultados dos parâmetros da transferência de calor das simulações 4 e 6.

Resultados gerais	Entrada do duto		Saída do duto	
	2400 m <sup>3</sup> /dia	1200 m <sup>3</sup> /dia	2400 m <sup>3</sup> /dia	1200 m <sup>3</sup> /dia
Coefficiente de convecção ( $W/m^2 \cdot K$ )	3656	1823	2843	1120
Resistência térmica equivalente (m. K/W)	0,387	0,387	0,388	0,389
Temperatura média do petróleo (°C)	60	60	47	37

Na Figura 7 (A) e (B) estão ilustradas as curvas referentes aos perfis de temperatura em função do comprimento do duto conforme os dados das Tabelas 7 e 8, respectivamente.

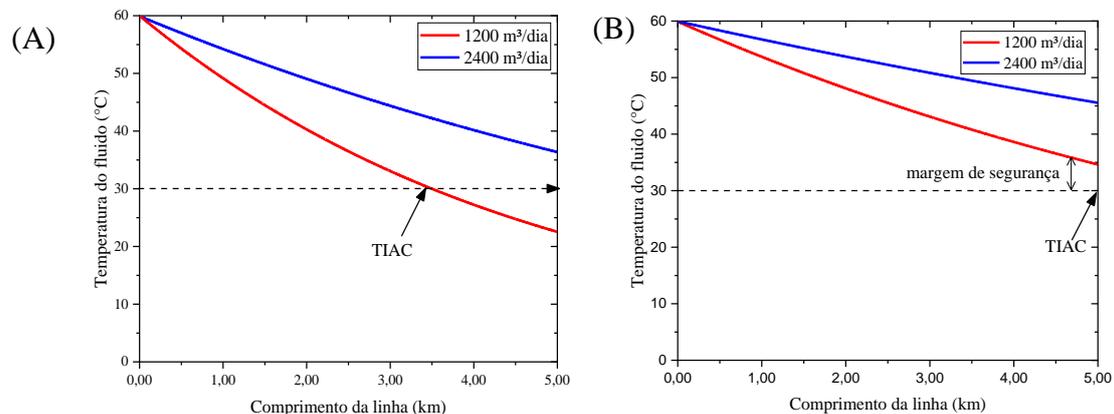


Figura 7. Perfis axiais da temperatura: (A) Simulações 3 e 5; (B) Simulações 4 e 6.

Através da análise do perfil de temperatura ilustrado na Figura 15 (A) foi possível visualizar que a aplicação da espessura de isolante térmico de 20 mm só se mostra efetiva no início da produção quando o poço está com vazão de 2400 m<sup>3</sup>/dia, entretanto, ao ocorrer a depleção, esta espessura não assegurará que o óleo flua ao longo de todo o duto com temperatura acima da TIAC, atingindo ao final da linha temperatura de aproximadamente 23°C, aumentando a probabilidade da deposição dos cristais de parafinas de alto peso molecular.

Na Figura 7 (B) a qual representa os perfis de temperatura para espessura de isolante térmico de 40 mm foi possível visualizar que essa espessura se mostrou efetiva em ambos os cenários de produção, visto que assegurará uma perda de calor a qual não reduzirá a temperatura de escoamento em valores inferiores a TIAC, portanto, manterá a parafina dissolvida no óleo ao longo de todo escoamento, mesmo no cenário de depleção do poço.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

- a) No caso 1, representado pelas simulações sem isolamento térmico, é nítido que a operadora desse poço irá enfrentar problemas de incrustação de parafinas desde o início da produção e ao longo da vida útil desse poço, visto que o petróleo atingiu temperaturas inferiores a TIAC em mais de 3 km de trecho de duto, chegando no final da linha com temperaturas iguais a 13 °C e 10 °C nos cenários 1 e 2, respectivamente. Portanto, conclui-se que é recomendado a aplicação do isolamento térmico.
- b) A simulação 3 e 5, as quais aplicaram espessuras de isolante térmico de 20 mm, não se mostraram eficientes, visto que essas espessuras mantiveram o fluxo de calor em patamares os quais permitiram a redução da temperatura para valores abaixo da TIAC, imprimindo ao escoamento, trechos nessa condição para o segundo cenário de produção.
- c) As simulações 4 e 6 se mostraram eficientes para o estudo de caso, visto que a aplicação da espessura de 40 mm reduziu a transferência de calor para magnitudes suficientes para garantir o escoamento do petróleo com valores de temperaturas acima de 46°C e 37°C, respectivamente, ou seja, superiores a TIAC.

## REFERÊNCIAS

- AHMED, T. H. **Reservoir Engineering Handbook**. Second edition. 1 Gulf Professional Publishing. ISBN 0-88415-770-9 (alk. paper). 1946, Vol. 291, pp. 136–137.
- ANDRADE, L. L. de P. R. de. **Propriedades Físico-Químicas de Fluidos de Reservatórios**. Rio de Janeiro, 2018. Tese DSc – Escolas de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2018.

AZEVEDO, L. F. A.; TEIXEIRA, A. M. **A critical review of the modeling of wax deposition mechanisms.** *Journal of Petroleum Science and Technology*, n. 3 e 4, v. 21, p. 393-408, 2003.

BATISTA, E. da S. **Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para Aplicação no Método de Elevação por Bombeio Centrífugo Submerso.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, Brasil, 2009.

FRAGA, V. S. **Análise Fluidodinâmica Computacional Do Gradiente De Temperatura E Da Estabilidade Em Dutos Submarinos.** Monografia De Graduação, Universidade Federal Fluminense – Departamento De Engenharia Química e de Petróleo, Niterói/RJ, Brasil, 2017.

GABRIEL, P. Dutos submarinos. TecPetro, 2015.

INCROPERA, F. P De WITT, DP B., TL Lavine, AS. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 6. Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2008.

LIMA, F. De O. **Avaliação de alternativas de isolamentos térmicos para prevenção de corrosão sob isolamento aplicado à indústria Offshore.** Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC/Rio, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2017.

MACHADO JUNIOR, P. R. S. **Isolamento térmico de equipamentos submarinos de exploração e produção de óleo e gás.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2008.

MALTA, E. R. **Projeto de um riser flexível para águas ultraprofundas.** 92p. Trabalho de Formatura, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2010.

MOREIRA, J. R S. **Processos de Transferência de Calor.** Escola politécnica da USP – Departamento de Engenharia Mecânica SISEA, São Paulo/SP, Brasil, 2005. Disponível em: [www.pme.poli.usp.br/sisea](http://www.pme.poli.usp.br/sisea). Acesso 9 de Fevereiro de 2019.

QUEIROZ, D. L., N., A., **O. Influência da Convecção Natural no Resfriamento de Dutos Submarinos de Petróleo e Gás.** Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2007.

QUITES, E. E. C.; LIA, L. R. B. **Introdução À Transferência De Calor.** Disponível em: <http://www.portaldoeletrodomestico.com.br/redesocial/wp-content/uploads/group-documents/11/1323531498-APOSTILA-TRANSFERENCIA-DE-CALOR.pdf>. Acesso: 29 de abril de 2020.

SALGADO, A. L. P; AZEVEDO D. A. G. **Corrosão nas estruturas metálicas de tubos flexíveis utilizados para exploração de petróleo offshore.** Trabalho (Conclusão de Curso) – Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Universidade Federal Fluminense, Niterói/RJ, 2016.

SILVA, T. P. **Projeto de trocador de calor e estudo experimental da influência da redução da temperatura do ar de admissão no consumo de combustível para turbinas a gás.** Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2014.

SILVA, G. R. da; CÂMARA, L. D. T.; NETO, A. J. da S. **Otimização de Espessuras de Isolamento de Dutos de Petróleo Em Condições Submarinas.** Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo/RJ, Brasil. REUCP, Petrópolis, Volume 8, n° 2, P. 47-55 ISSN 2318-0692.

SOUZA, M. H. C. **Lançamento de dutos: comparação entre uma ferramenta analítica e modelos em elementos finitos.** Projeto de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Naval e Oceânica – Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2015.

parcialmente ou