

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENGENHARIA QUÍMICA

AGNES BATOQUI COSTA E SILVA

**MODELO UNIDIMENSIONAL DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR
TRANSIENTE EM OLEODUTOS DURANTE PARADA DE PRODUÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

AGNES BATOQUI COSTA E SILVA

**MODELO UNIDIMENSIONAL DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR
TRANSIENTE EM OLEODUTOS DURANTE PARADA DE PRODUÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título Bacharel em Engenharia Química, do Departamento de Engenharia Química, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Everton Moraes Matos – UTFPR-PG

Co-orientador: Prof. Dr. André Damiani Rocha – UFABC

PONTA GROSSA

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

MODELO UNIDIMENSIONAL DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR TRANSIENTE EM OLEODUTOS DURANTE PARADA DE PRODUÇÃO

por

Agnes Batoqui Costa e Silva

Monografia apresentada no dia 13 de Agosto de 2018 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof.^a Dr.^a Erica Roberta Lovo da Rocha Watanabe
(UTFPR)

Bacharel Bruna Cassia da Silva
(UTFPR)

Prof. Dr. Everton Moraes Matos
(UTFPR)
Orientador

Prof.^a Dr.^a Juliana de Paula Martins
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia Química

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

Dedico este trabalho aos meus pais, Sueli e Marcos, aos meus irmãos, Ana e Arthur e ao meu namorado, Angelo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor André Damiani Rocha, que foi o maior incentivador e tutor do meu aprofundamento na modelagem numérica-computacional, tendo como motivadores problemas da Produção de Óleo e Gás, sempre disposto e solícito, sendo o principal colaborador para a conclusão deste trabalho.

Ao professor Everton Moraes Matos pela orientação no desenvolvimento das etapas finais do trabalho e por todos os ensinamentos como professor, orientador e amigo.

E por fim à minha família, ao meu namorado e aos meus amigos, que estiveram presentes e me apoiaram durante todas as etapas da graduação.

RESUMO

SILVA, Agnes B. C. **Modelo unidimensional da transferência de calor transiente em oleodutos durante parada de produção.** 2018. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

O petróleo é a principal fonte energética mundial e a representatividade da sua exploração em campos offshore em águas cada vez mais profundas vem crescendo, trazendo novos desafios à indústria do petróleo. Entre os maiores desafios está a deposição de parafina na parede dos dutos submarinos, processo que ocorre devido à transferência de calor entre o óleo e o ambiente marinho externo, esta deposição é intensificada durante paradas de produção. Neste trabalho tem-se como objetivo um estudo unidimensional do resfriamento do óleo em uma tubulação submarina após parada de produção. Através de modelagem matemática e modelagem numérica-computacional com discretização pelo Método dos Volumes Finitos, implementou-se um algoritmo no MATLAB®, para realizar simulação do resfriamento do sistema óleo-duto-mar e realizou-se a análise dos resultados obtidos. Diferentes casos de estudo foram analisados e com eles inicialmente comprovou-se a eficácia do método utilizado, a discrepância da variação de temperatura entre dutos sem isolamento e dutos do tipo *pipe-in-pipe* (com isolamento), e o principal, com a análise tem-se a previsão do tempo para que após uma parada na produção a parafina comece a ser depositada no duto. Previsão esta muito útil, uma vez que auxilia desde a etapa de desenvolvimento da produção nos campos *offshore*, até a determinação de intervenções na linha.

Palavras-chave: MATLAB®. Método de Volumes Finitos. Modelagem. Óleo. Transferência de calor.

ABSTRACT

SILVA, Agnes B. C. **One-dimensional model of transient heat transfer in oil pipelines during production stop**. 2018. 76 f. Undergraduate Thesis (Bachelor's Degree in Chemical Engineering) - Federal University of Technology - Paraná. Ponta Grossa, 2018.

Oil is the world's main energy source and the representativeness of its exploration on offshore fields has been growing, in increasingly deeper waters, bringing new challenges to the oil industry. Among the major challenges is the wax deposition on the pipe wall, a process that occurs due to the heat transfer heat between the oil and the external marine environment, this deposition is intensified during shutdowns. In this work, the objective is a one-dimensional study of the oil cooling in a subsea pipeline after shutdown. Through mathematical modeling and numerical-computational modeling with discretization by the Finite Volumes Method, an algorithm was implemented in MATLAB®, to simulate the cooling of the oil-pipe-seawater system and the results obtained were analyzed. Different case studies were analyzed, initially the efficiency of the method used was verified, then the discrepancy of the temperature variation between pipes without insulation and pipe-in-pipe were checked, and finally the analysis gives a forecast of the time necessary after a shutdown to the paraffin begins to be deposited in the pipeline. This prediction is very useful, as it helps from the development stage of oil production in offshore fields, to the determination of interventions in line.

Keywords: MATLAB®. Finite Volume Method. Modelling. Oil. Heat transfer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Duto quase totalmente obstruído por depósito de parafina.....	20
Figura 2 - Esquema de um sistema de produção marítima de petróleo	22
Figura 3 - Remoção de depósito de parafina durante limpeza	23
Figura 4 - Esquema do tubo tipo pipe-in-pipe no ambiente marinho	30
Figura 5 - Definições dos raios e das temperaturas no tupo pipe-in-pipe	32
Figura 6 - Propriedades físicas da água do mar no Oceano Atlântico	34
Figura 7 - Malha gerada a partir do Métoco B, em coordenadas cilíndricas: (a) esquema geral e, (b) nomenclatura dos pontos nodais e das interfaces dos volumes de controle.....	37
Figura 8 - Esquema da malha computacional simplificada – problema unidimensional	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Caso 1: Variação da temperatura ao longo do raio após 6h.....	49
Gráfico 2 – Caso 1: Variação da temperatura no tempo zero e após 1h.....	50
Gráfico 3 - Caso 2.1: Variação da temperatura ao longo do raio em diferentes tempos	52
Gráfico 4 - Caso 2.1: Gradiente de temperatura ao longo do raio em diferentes tempos	53
Gráfico 5 - Caso 2.1: Variação da temperatura média do óleo ao longo de tempo ...	54
Gráfico 6 - Caso 2.2: Variação da temperatura ao longo do raio em diferentes tempos	55
Gráfico 7 - Caso 2.2: Gradiente de temperatura ao longo do raio em diferentes tempos	56
Gráfico 8 - Caso 2.2: Variação da temperatura média do óleo ao longo de tempo ...	57
Gráfico 9 - Caso 3.1: Variação da temperatura ao longo do raio em diferentes tempos	60
Gráfico 10 - Caso 3.1: Gradiente de temperatura ao longo do raio em diferentes tempos	61
Gráfico 11 - Caso 3.1: Variação da temperatura média do óleo ao longo de tempo .	62
Gráfico 12 - Caso 3.2: Variação da temperatura ao longo do raio em diferentes tempos	64
Gráfico 13 - Caso 3.2: Gradiente de temperatura ao longo do raio em diferentes tempos	65
Gráfico 14 - Caso 3.2: Variação da temperatura média do óleo ao longo de tempo .	66
Gráfico 15 - Caso 3.3: Variação da temperatura ao longo do raio em diferentes tempos	67
Gráfico 16 - Caso 3.3: Gradiente de temperatura ao longo do raio em diferentes tempos	68
Gráfico 17 - Caso 3.3: Variação da temperatura média do óleo ao longo de tempo .	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise elementar em óleo cru típico (% em peso)	17
Tabela 2 - Composição química de um petróleo típico	17
Tabela 3 - Frações Típicas Obtidas pela Destilação do Petróleo.....	18
Tabela 4 - Caso 1: Parâmetros geométricos.....	48
Tabela 5 - Caso 1: Propriedades termofísicas	48
Tabela 6 - Caso 2: Parâmetros geométricos da parede do duto	50
Tabela 7 - Caso 2: Propriedades do óleo	51
Tabela 8 - Caso 2: Propriedades da parede do duto.....	51
Tabela 9 - Caso 2: Propriedades da água do mar.....	51
Tabela 10 - Caso 2: Condições iniciais	51
Tabela 11 - Caso 3: Parâmetros geométricos da parede do duto (aço e isolante)....	58
Tabela 12 - Caso 3: Propriedades do óleo	58
Tabela 13 - Caso 3: Propriedades do óleo pesado	58
Tabela 14 - Caso 3: Propriedades da parede do duto (aço e isolante)	58
Tabela 15 - Caso 3: Propriedades da água do mar.....	58
Tabela 16 - Caso 3: Condições iniciais	58

LISTA DE SIGLAS

AIAA	<i>American Institute of Aeronautics and Astronautics</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DFC	Dinâmica dos Fluidos Computacional
IEA	<i>International energy Agency</i>
MVF	Método de Volumes Finitos
TDMA	<i>Tri-Diagonal Matrix Algorithm</i>
TIAC	Temperatura Inicial de Formação de Cristais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 ENERGIA	16
3.2 PETRÓLEO	17
3.2.1 Parafinas	19
3.2.2 Desafios da Produção de Petróleo	20
3.2.2.1 Parada de produção	24
3.3 MECANISMOS DE DEPOSIÇÃO DE PARAFINA	25
3.3.1 Difusão Molecular	25
3.3.2 Difusão Browniana	26
3.3.3 Disperção por Cisalhamento	27
3.3.4 Deposição por Gravidade	28
4 MODELAGEM	29
4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA	29
4.1.1 Condições de Contorno	31
4.2 MODELAGEM NUMÉRICA-COMPUTACIONAL	35
4.2.1 Concepção do Domínio Computacional	36
4.2.2 Geração da Malha	36
4.2.3 Método Numérico para a Discretização das Equações Governantes	38
4.2.4 Resolvedor – <i>Solver</i>	39
4.2.5 Verificação e Validação dos Resultados	39
4.2.6 Discretização da Equação de Difusão de Calor pelo Método de Volumes Finitos 40	
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1 CASO 1 – TEMPERATURA CONHECIDA NA FRONTEIRA ESQUERDA	48
5.2 CASO 2 – DUTO SIMPLES COM CONVECÇÃO NA FRONTEIRA ESQUERDA 50	
5.2.1 Caso 2.1: Duto Simples com Convecção na Fronteira Esquerda – Tempo Total de 6h	51
5.2.2 Caso 2.2: Duto Simples com Convecção na Fronteira Esquerda – Tempo Total de 24h	55
5.3 CASO 3 – PIPE-IN-PIPE COM CONVECÇÃO NA FRONTEIRA ESQUERDA	57
5.3.1 Caso 3.1: Pipe-In-Pipe com Convecção na Fronteira Esquerda – Tempo Total de 6 horas	59
5.3.2 Caso 3.2: Pipe-In-Pipe com Convecção na Fronteira Esquerda – Tempo Total de 24 horas	63

5.3.3 Caso 3.3: Pipe-In-Pipe com Óleo Pesado e Convecção na Fronteira Esquerda – Tempo Total de 24 horas	66
6 CONCLUSÃO.....	70
REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

O petróleo continua a ser a principal fonte energética da sociedade, mesmo com as mudanças ocorridas na matriz energética mundial, que levaram ao aumento na representatividade das fontes renováveis. É a matéria-prima base de diversos produtos de larga utilização, sendo assim essencial ao desenvolvimento econômico atual.

Na indústria do petróleo, a deposição de parafina é um dos problemas mais graves que ocorre em diversas etapas do processamento do óleo bruto, como extração, armazenamento, transporte em dutos e paradas de produção. Uma significativa porção das reservas de petróleo da atualidade encontra-se afastadas da costa, ou seja, *offshore*, em águas profundas e ultraprofundas, o que aumenta a acumulação deste material.

Parafina deposita-se em campos de produção terrestre (*onshore*) submetidos a baixas temperaturas. E principalmente, durante o transporte de óleo em linhas *offshore* por longas distâncias, as quais estão em contato com a água do mar a temperaturas por volta de 5°C, enquanto o óleo escoava a temperaturas entre 60 e 80°C, o que diminui drasticamente a solubilidade das frações de parafina no óleo cru, pois esta solubilidade é uma função decrescente da temperatura.

A deposição de parafina ocorre tanto durante o escoamento do petróleo quanto em uma condição de estagnação, chamada na indústria do petróleo de *shutdown*, que são interrupções necessárias na produção devido a situações operacionais ou de emergência. Durante paradas de produção este fenômeno é agravado, pois as condições de escoamento para as quais o duto foi projetado, que geralmente incluem escoamento em regime permanente, são alteradas.

A deposição ocorrida durante paradas de produção relaciona-se com a temperatura e a concentração da parafina no óleo. O acúmulo só ocorre para temperaturas inferiores ao ponto de névoa ou à temperatura instantânea de aparecimento de cristais (TIAC).

Dentre os mecanismos que governam este problema tem-se a difusão molecular, difusão Browniana de cristais fora da solução, dispersão por cisalhamento e deposição gravitacional. No entanto a difusão molecular tem sido amplamente aceita como o mecanismo de deposição dominante, e adotada por grande parte dos autores como o fenômeno que regula a deposição de cera.

Enquanto houver uma diferença de temperatura entre a parede do duto e o óleo transportado, um gradiente de temperatura radial será estabelecido no fluido escoando. Este gradiente ocasiona um gradiente de concentração radial, que por sua vez promove um fluxo de transferência de massa radial da parafina na direção da superfície interior do duto, na qual a mesma precipita do óleo e adere à superfície, o que ocorre devido à difusão molecular.

O acúmulo de parafina depositada gera muitos prejuízos para a indústria do petróleo, pois provoca um aumento da perda de carga, elevando o consumo de energia da bomba, uma diminuição na vazão de óleo, e com o tempo pode provocar a obstrução da linha, causando perda de produção, podendo levar ao abandono definitivo da linha. Nesse contexto, é importante entender o problema de deposição de parafina em dutos de petróleo durante parada de produção.

O presente trabalho possui como finalidade a realização de uma modelagem unidimensional desse fenômeno físico, para que assim se tenha uma previsão do tempo para que após uma parada na produção a parafina comece a ser depositada no duto. Esta previsão da deposição de parafina ao longo das linhas seria uma informação muito útil, visto que auxiliaria desde a etapa de desenvolvimento da produção nos campos *offshore*, até a determinação de intervenções na linha de maneira a conservar o escoamento nos níveis de vazões pretendidos. Pois sabendo o tempo que leva para a deposição ter início e o tempo que leva para a espessura de deposição atingir um valor crítico, pode-se então tomar decisões de manutenção e intervenção.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho possui como objetivo geral realizar um estudo do resfriamento do óleo em uma tubulação submarina após a parada de produção.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar matematicamente a transferência de calor transiente, unidimensional, no conjunto fluido e tubulação;
- Discretizar as equações pelo Método de Volumes Finitos – MVF;
- Implementar um algoritmo que descreva o fenômeno físico no ambiente MATLAB®;
- Simular o resfriamento do sistema no ambiente MATLAB® e analisar os resultados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é apresentada uma revisão bibliográfica dos mecanismos envolvidos na deposição de parafina em dutos de petróleo com escoamento. Primeiramente é introduzido o tema energia, com o intuito de mostrar a importância do petróleo no panorama energético mundial. Em seguida o petróleo é descrito, assim como seu constituinte de interesse, a parafina, e por fim os desafios envolvidos na produção de petróleo a grandes distâncias da costa e na parada e retomada da produção. Para então expor os mecanismos de deposição propostos por Burger *et al.* (1981).

3.1 ENERGIA

A energia usada em conjunto com tecnologias modernas levou a mudanças qualitativas na vida humana, permitindo um aumento da produtividade econômica e do bem-estar da população (GOLDEMBERG; MOREIRA, 2005). Tornando-se essencial para o desenvolvimento, uma das aspirações fundamentais dos povos de todos os países (BARROS, 2007).

O mundo depende das fontes energéticas atuais, o petróleo, o carvão, o gás natural, a energia nuclear e a hidroeletricidade. Dentre elas, apenas a última é renovável, enquanto as demais tratam-se de fontes energéticas primárias não renováveis. E apesar das fontes renováveis de energia demonstrarem potencial para sustentar a economia mundial, os combustíveis fósseis e a eletricidade são hoje a base para o modelo tecnológico e para manter o estilo de vida contemporâneo (BARROS, 2007).

Segundo a IEA (International Energy Agency, 2015), a oferta mundial de energia primária por fonte energética distribuiu-se da seguinte maneira em 2013: petróleo (31,1%), carvão mineral (28,9%), gás natural (21,4%), energias renováveis (13,8%) e energia nuclear (4,8%). Com a maior participação na oferta energética, o petróleo deverá permanecer como a principal fonte de energia mundial até que haja restrição na oferta, após o atingimento do máximo de produção (WEIGMANN, 2002).

3.2 PETRÓLEO

O petróleo tem registros de estar presente na vida do homem desde os tempos bíblicos, no entanto teve sua exploração comercial iniciada em 1859, nos Estados Unidos, com um poço de apenas 21 metros de profundidade. Atualmente algumas unidades de perfuração operam em lâminas de água que ultrapassam 2000 metros de profundidade (THOMAS *et al.*, 2001).

No estado líquido é oleoso, inflamável, menos denso que a água, com cheiro característico e cor variando entre negro e castanho-claro. O petróleo, do latim *petra* (pedra) e *oleum* (óleo), é constituído por uma mistura de compostos químicos orgânicos (hidrocarbonetos) (THOMAS *et al.*, 2001).

Segundo Thomas *et al.* (2001), apesar de apresentar características variáveis de acordo com o campo produtor, e inclusive em um mesmo campo apresentar variações, todos os óleos apresentam análises elementares semelhantes às apresentadas na tabela 1.

De acordo com Baldotto (2004), o petróleo cru costuma ser um sistema químico complexo que contém de centenas a milhares de compostos individuais, de simples n-alcanos, ou n-parafinas, de baixo peso molecular a hidrocarbonetos de alto peso molecular. Resinas, aromáticos, compostos asfáltênicos e compostos inorgânicos também fazem parte de sua composição (OLIVEIRA, 1998). A tabela 2 apresenta a composição química de um petróleo típico.

Tabela 1 – Análise elementar em óleo cru típico (% em peso)

Hidrogênio	11 - 14%
Carbono	83 - 87%
Enxofre	0,06 - 8%
Nitrogênio	0,11 - 1,7%
Oxigênio	0,1 - 2%
Metais	Até 0,3%

Fonte: Thomas *et al.* (2001)

Tabela 2 – Composição química de um petróleo típico

Parafinas normais	14%
Parafinas ramificadas	16%
Parafinas cíclicas (naftênicas)	30%
Aromáticos	30%
Resinas e asfaltenos	10%

Fonte: Thomas *et al.* (2001)

No refino do petróleo inicialmente realiza-se a destilação, visando separar o petróleo em frações de acordo com a volatilidade de seus componentes. Não é possível separar completamente os compostos individualmente por frações. Uma vez que mais de 500 diferentes compostos compõem o destilado de petróleo, com ponto de ebulição inferior a 200°C e muitos deles têm pontos de ebulição similares (LEIROZ, 2004). Assim, as frações obtidas apresentam misturas de alcanos de pontos de ebulição próximos, como mostrado na Tabela 3 (SOLOMONS; FRYHLE, 2001).

Tabela 3 – Frações Típicas Obtidas pela Destilação do Petróleo

Ponto de Ebulição (°C)	Nº de Átomos de Carbono por Molécula	Frações Típicas
Abaixo de 20	C-C4	Gás natural, GLP, Petroquímicos
20-60	C5-C6	Éter de petróleo, Solventes
60-100	C6-C7	Ligroína, Solventes
40-200	C5-C10	Gasolina
175-325	C12-C18	Querosene, Combustível de motor a jato
250-400	C12 e mais	Gasóleo, Óleo combustível, Óleo diesel
Líquidos não voláteis	C20 e mais	Óleo mineral refinado, Óleo lubrificante, Graxa
Sólidos não voláteis	C20 e mais	Parafina, Asfalteno, Alcatrão

Fonte: Solomons e Fryhle, 2001

3.2.1 Parafinas

Parafinas são ceras do petróleo constituídas em sua grande maioria por hidrocarbonetos chamados de alcanos, de fórmula química C_nH_{2n+2} , onde n é o número de carbonos presentes na molécula (OLIVEIRA, 1998). De acordo com Solomons e Fryhle (2001), o nome parafina é originário do latim *parum affinis*, que significa pouca afinidade, que é explicado pela baixa reatividade para vários reagentes.

No entanto, na indústria do petróleo, a denominação parafina tem um significado mais amplo, representando o depósito de material orgânico em geral, formado por parafinas, naftenos, resinas e materiais asfálticos. Nota-se uma tendência de atribuir o termo parafina a qualquer material orgânico na forma de depósito (BALDOTTO, 2004).

Segundo Oliveira (1998), a solubilidade das parafinas no óleo cru está relacionada com a composição química do óleo, pressão e temperatura. Em relação à temperatura sabe-se que à medida que o petróleo esfria, os componentes parafínicos tem suas solubilidades diminuídas, até que a cristalização se inicie pelos componentes de maior massa molecular. A temperatura na qual se dá o início da cristalização é conhecida como temperatura inicial de aparecimento de cristais de parafina (TIAC), ou ponto de névoa (BOTT, 1997).

Cristalização consiste no processo pelo qual uma estrutura sólida ordenada é originada a partir de uma fase desordenada. Costuma envolver dois estágios distintos, a nucleação (formação de núcleos estáveis) e o crescimento de cristais (agrupamento de moléculas aos núcleos), cada um dos estágios deve ser considerado separadamente (OLIVEIRA, 1998; BALDOTTO, 2004).

A cristalização das parafinas leva à formação de géis de matriz muito viscosa, morfologicamente complexos. Ao processo de formação dessa matriz dá-se o nome de gelificação. As características desse gel vão depender da morfologia e das estruturas das redes dos cristais, sendo função do cisalhamento e do histórico térmico durante a sua formação (SINGH *et al.*, 1999; SINGH *et al.*, 2000).

Esse gel é formado por fases sólida e líquida. A fase sólida é constituída pelos cristais de parafina, e a líquida é uma mistura saturada de óleo e parafina. A consistência desses géis sofre mudanças com o tempo de deposição. Devido ao envelhecimento, o depósito aumenta e endurece, com isso sua consistência

aumenta e sua remoção torna-se mais difícil (BURGER *et al.*, 1981; SARACENO, 2007).

3.2.2 Desafios da Produção de Petróleo

Cerca de metade das bacias sedimentares que oferecem boas possibilidades de produção de petróleo encontram-se no mar, distantes da costa. Atualmente as áreas de produção *offshore* que mais se destacam são o Golfo do México, Mar do Norte, Mar da China, costa oeste da África e a costa do Brasil. E a tendência é que a produção *offshore* ocorra em águas cada vez mais profundas, o que pode ser avaliado pela evolução dos recordes de produção submarina (MACHADO, 1999).

A produção *offshore* de petróleo enfrenta vários desafios, a obstrução dos dutos (figura 1) que transportam o petróleo partir da cabeça do poço no fundo do oceano, até a plataforma, é uma dos mais graves da indústria. O óleo entra no duto com uma temperatura de cerca de 60°C, enquanto a água do mar é muito mais fria, com temperaturas por volta de 5°C em águas profundas. Portanto, hidrocarbonetos pesados tornam-se suscetíveis a precipitar do óleo, uma vez que a solubilidade destes alcanos diminui à medida que a temperatura é reduzida (RIBEIRO *et al.*, 1997).

Figura 1 – Duto quase totalmente obstruído por depósito de parafina



Fonte: Botne (2011)

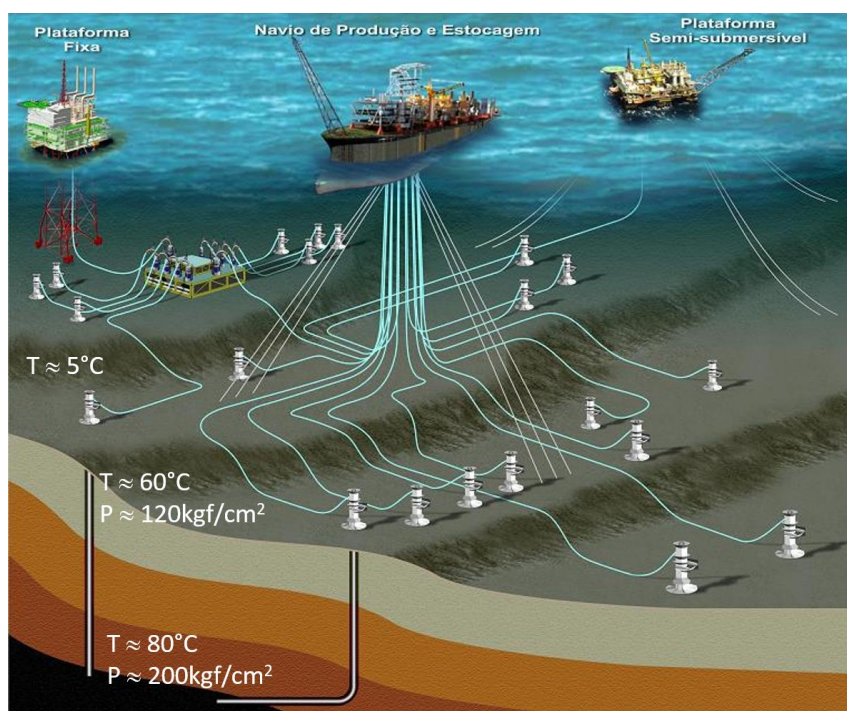
Nas condições de pressão e temperatura do reservatório, as parafinas encontram-se solúveis e estão em equilíbrio com o óleo cru. No entanto, quando o

poço começa a fluir, um gradiente de pressão é estabelecido através do reservatório, poço e cabeça do poço, e o equilíbrio sofre uma perturbação. Essa redução na pressão faz com que a capacidade de dissolução de parafinas pelas frações leves decresça. O que provoca a cristalização das frações mais pesadas, pois as frações leves agem como solventes naturais das parafinas (OLIVEIRA, 1998).

De acordo com Bott (1997), a distribuição da temperatura no duto, a qual depende das condições de escoamento, determina o local em que ocorrerá a precipitação. Se a região de sub-resfriamento for a interface óleo-água, ou seja, a parede do duto, é provável que os depósitos ocorram neste local. Os depósitos formados nesta região costumam ser os mais duros, pois na parede é onde ocorrem os maiores graus de sub-resfriamento. Caso o ponto de névoa se dê em outra região do duto, os cristais formados podem migrar para a parede, ou podem ser levados pelo escoamento a outras regiões nas quais a concentração da solução estaria abaixo do ponto de saturação e os cristais seriam redissolvidos antes de formarem depósitos.

A existência de cristais de parafina leva a um aumento na viscosidade efetiva do petróleo, o que pode vir a requerer potencial extra de bombeamento ou provocar a diminuição da vazão. Em uma parada do escoamento por razões operacionais ou emergências, a gelificação do petróleo causada pela precipitação dos cristais, pode causar sérios problemas para o recomeço do escoamento (LEIROZ, 2004).

A queda de pressão em conjunto com a diminuição da temperatura do óleo no interior da linha provoca durante a produção (figura 2) a precipitação de parafina nas paredes internas das válvulas, bombas, oleodutos, e equipamentos de superfície, podendo gerar depósitos de parafina que reduzem a capacidade de escoamento, diminuindo a produtividade do poço, e em casos mais graves, bloqueando completamente a linha (OLIVEIRA, 1998).

Figura 2 – Esquema de um sistema de produção marítima de petróleo

Fonte: adaptado de *Prospecção e Extração de Petróleo & Gás Natural, Diário do Pré-Sal (2007)*

A indústria utiliza métodos clássicos para prevenir ou remover depósitos de parafina, como mostrada na figura 3, a remoção de depósito de parafina durante um procedimento de limpeza. Tais métodos compreendem a remoção mecânica, aquecimento elétrico ou químico das linhas, utilização de inibidores químicos ou a combinação dos métodos anteriores. A seleção do método a ser utilizado costuma ser feita com base em experiências anteriores (MCCLAFLIN; WHITFILL, 1984; OLIVEIRA, 1998).

Figura 3 – Remoção de depósito de parafina durante limpeza

Fonte: Aske (2011)

A operação de um raspador mecânico que corta os depósitos da linha tem sido muito utilizada. Operações de *wireline* (uma ferramenta de limpeza é colocada no poço com o auxílio de um cabo de aço de pequeno diâmetro) e *pigging* (um dispositivo cilíndrico é colocado em uma linha com o intuito de mantê-la desobstruída) são exemplos de tratamento mecânico (OLIVEIRA, 1998).

Segundo Oliveira (1998), o método de tratamento com aquecimento, ou térmico, resume-se em adicionar calor externo ao sistema ou reduzir as perdas de calor por radiação. A circulação de água ou óleo quente com o intuito de fundir e aumentar a solubilidade da parafina na parede da linha, são exemplos de aplicação de calor. Isolamento e manutenção de maior pressão nas linhas, minimizando o resfriamento através da expansão do gás dissolvido, são exemplos de minimização de perdas de calor por radiação.

Já o controle químico ocorre quando um solvente é utilizado para dissolver o depósito formado ou quando se utilizam produtos químicos que inibem o crescimento do cristal de parafina ou a sua aderência a parede depois de formado. Os solventes costumam possuir alto teor de aromáticos, e muitos deles são aquecidos para sua utilização. Os modificadores de cristais de parafina inibem ou alteram o crescimento do cristal, e agem melhor em óleo cru livre de água (OLIVEIRA, 1998).

O custo do uso da aplicação destes métodos aumenta conforme a profundidade das lâminas d'água aumentam, e com isso pode se tornar uma

condição decisiva na viabilidade econômica de um campo de produção *offshore* (WEISPFENNING, 2001).

3.2.2.1 Parada de produção

Por diferentes razões, tais como análises (de surgência de poços, de garantia e de estabilidade de escoamento estratégicas), manutenção ou emergenciais, o sistema de produção precisa ser interrompido temporariamente. A parada na produção propicia uma exposição do sistema às baixas temperaturas por um tempo maior, e quanto maior for esse tempo de exposição, maior será a formação de cristais no fluido. Por consequência, o ponto de fluidez será atingido.

Segundo a norma da Sociedade Americana de Teste e Materiais (ASTM, do original *American Society for Testing and Materials*), ASTM D97-87, o ponto de fluidez (*pour point*) é a temperatura mínima na qual o óleo é capaz de fluir. Neste ponto a movimentação do líquido não será mais observada devido a alta densidade de cristais presentes, ou seja, uma condição estática será atingida. Se nenhum tipo de cisalhamento durante o resfriamento existir, considera-se que o ponto de fluidez corresponde ao ponto de gelificação (BADIN, 2012; KOK *et al.*, 1996).

Durante a parada, o gel viscoso se forma por toda a extensão do duto, complicando o processo de reinicialização do escoamento, já que o gel necessitaria ser deslocado a fim de retomar as operações normais. O aumento da viscosidade do óleo causa um acréscimo de consumo de energia para o seu bombeamento. (AIYEJINA *et al.*, 2011).

A transição de líquido para gel tem dramáticos efeitos no *shutdown* e reinício da produção. Neste sentido pode ser citado um caso da Lasmo Company, uma empresa britânica, que teve que abandonar uma plataforma com um prejuízo de cem milhões de dólares devido a problemas de deposição de parafinas nas tubulações (SINGH *et al.*, 2000).

3.3 MECANISMOS DE DEPOSIÇÃO DE PARAFINA

Muitos estudos foram realizados e vários métodos foram obtidos para tentar amenizar ou contornar a precipitação e a consequente deposição de parafina, alguns destes métodos foram apresentados anteriormente. No entanto, é necessário que este fenômeno seja melhor compreendido, para que se possa prever a deposição de parafina.

Para se modelar a deposição de parafina é necessário o entendimento dos mecanismos de responsáveis pelo transporte de parafina, seja no estado líquido ou no sólido, da região central à parede do duto. De acordo com Burger *et al.* (1981) os mecanismos que contribuem para a deposição de parafina são: difusão molecular, difusão Browniana, dispersão por cisalhamento e deposição gravitacional. Estes mecanismos são a força motriz para que a parafina dissolvida ou precipitada no óleo seja transportada para as paredes do tubo (BALDOTTO, 2004).

Estudos realizados, tais como o de Burger *et al.* (1981) e o de Ribeiro (1997), mostram que a difusão molecular é o principal mecanismo a ser considerado na deposição de parafina. A seguir são apresentados de maneira resumida os mecanismos propostos como contribuintes para a deposição de parafina em oleodutos.

3.3.1 Difusão Molecular

Primeiramente considerando-se o transporte dos componentes da parafina dissolvidos. E o óleo em fluxo laminar, para todas as condições de escoamento, ao longo da linha ou em uma subcamada laminar delgada adjacente à parede da linha. Durante o escoamento do óleo, quando a temperatura da superfície interna da linha é menor que a temperatura da mistura escoando, dá-se origem a um gradiente térmico. Este gradiente gera outro, de concentração de parafina dissolvida na fase líquida do óleo, decrescente na direção radial, atingindo seu valor mínimo na interface sólido/líquido. Se a temperatura da interface estiver abaixo da TIAC, moléculas de parafina irão precipitar da mistura até que a fase líquida e a fase sólida entrem e equilíbrio (BURGER, 1981; VELASQUEZ, 2005).

Uma vez que a solubilidade da parafina no óleo é decrescente em relação à temperatura, e assim o gradiente de temperatura gerado produzirá um gradiente de concentração da parafina líquida na solução. A menor concentração de parafina será junto à região mais fria, a parede, e isso fará com que a parafina seja transportada do centro para a parede do duto por difusão molecular, assim depósitos deste material serão formados na interface (BURGER, 1981; VELASQUEZ, 2005).

Burger *et al.* (1981) concluíram que a difusão molecular domina os demais mecanismos de deposição para maiores temperaturas e fluxo de calor. A seguir será apresentada a equação que modela a taxa de transporte de parafina para a parede em oleodutos.

A equação que modela a taxa de transporte da parafina para a parede do duto por difusão molecular é a lei de Fick, quando avaliada na interface entre a parafina e o óleo é representada pela equação (1) mostrada a seguir.

$$\frac{dm_p}{dt} = - \rho_m D_m A_d \left(\frac{\partial \omega}{\partial r} \right)_{int} \quad (1)$$

onde,

m_p é a massa de parafina depositada;

ρ_m é a massa específica da mistura;

$A_d = 2 \pi R dx$, é a área de deposição;

dx é o comprimento do volume elementar;

r é a coordenada do raio do oleoduto;

D_m é o coeficiente de difusão da parafina líquida na mistura;

ω é a fração volumétrica da parafina na solução.

3.3.2 Difusão Browniana

Considerando-se o transporte lateral das partículas de parafina precipitadas suspensas no fluido em escoamento, para isso ocorrer alguma região do escoamento tem que estar a uma temperatura inferior à TIAC. Os cristais em suspensão serão bombeados continuamente por moléculas de óleo termicamente

agitadas, gerando um movimento randômico. Caso exista um gradiente de concentração destas partículas, o movimento Browniano levará a um transporte das mesmas, ou seja, estas partículas tenderão a se deslocar no sentido decrescente do perfil de concentração, depositando-se ao colidirem com a parede (BURGER *et al.*, 1987; VELASQUEZ, 2005).

Segundo Burger *et al.* (1987), tanto na natureza, quanto na descrição matemática, o movimento Browniano é semelhante à difusão. No entanto, os autores concluíram que a deposição por difusão Browniana é desprezível quando comparada a outros mecanismos.

3.3.3 Dispersão por Cisalhamento

Da mesma maneira que a difusão Browniana, a dispersão por cisalhamento é um mecanismo de transporte lateral de partículas sólidas em suspensão. Quando pequenas partículas estão em suspensão num fluido em movimento laminar, elas tendem a se mover na direção do fluido escoando. O movimento destas partículas depende de seus tamanhos, concentração e densidade relativa (BURGER *et al.*, 1981; VELASQUEZ, 2005).

Próximo à parede do tubo há cisalhamento do fluido, o que induz um movimento especial às partículas, conhecido como dispersão por cisalhamento. Tal movimento pode ser responsável pelo transporte de parafina precipitada no centro do duto para as paredes, formando depósitos (BALDOTTO, 2004).

No entanto há indícios de que o transporte lateral de partículas imersas em um escoamento cisalhante ocorre opostamente ao do gradiente da taxa de cisalhamento, o que causaria um movimento de cristais para longe da parede, onde o cisalhamento é máximo (VELASQUEZ, 2005).

Resultados experimentais, tal como o de Burger *et al.* (1981), mostraram que mesmo em condições de calor nulo, nas quais a difusão molecular não é possível, não há deposição de parafina. Com isso, pode-se concluir que a dispersão por cisalhamento não deve ser um mecanismo de deposição a ser considerado na deposição de parafina (VELASQUEZ, 2005).

3.3.4 Deposição por Gravidade

Uma vez que os cristais de parafina são mais densos que o óleo, eles poderiam, por ação gravitacional, se depositar no fundo dos dutos. Porém foi constatado por Burger *et al.* (1981) por meio de testes de deposição em dutos, que a contribuição deste mecanismo para a deposição de parafina é insignificante, e com isso a deposição por gravidade pode ser desprezada.

4 MODELAGEM

O objeto de estudo deste trabalho é a simulação do resfriamento do óleo em uma tubulação submarina após parada de produção, a ser realizada no ambiente MATLAB® (MATrix LABoratory), um software interativo de alto nível voltado para cálculo numérico, que resolve numericamente problemas matemáticos na forma matricial de forma rápida e eficiente.

Primeiramente será exposta a modelagem matemática da deposição de parafina em oleodutos, considerando parada de produção. Em seguida será mostrada a modelagem numérica-computacional, que compreende um conjunto de ferramentas matemáticas que descrevem o problema físico real.

4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

Um modelo matemático tem como objetivo descrever um fenômeno físico e, simultaneamente, proporcionar parâmetros para sua análise. Essa subseção descreve o modelo matemático utilizado na análise da transferência de calor em regime transiente do óleo estagnado, dentro de um *riser*, tubo que liga uma estrutura de produção offshore flutuante a um sistema submarino para fins produtivos, de petróleo do tipo *pipe-in-pipe*, na horizontal, localizado no leito marinho, interagindo com a água do mar.

O óleo é definido como estagnado considerando uma situação bastante comum na indústria que é a condição de parada de produção. Dessa forma, a velocidade axial do escoamento é nula. Nessa condição, é desejável que o óleo permaneça com uma temperatura acima da temperatura de deposição de parafina, que é de aproximadamente 39°C, e acima da temperatura de formação de hidrato de gás que é, tipicamente, por volta de 20°C (SU et al., 2005).

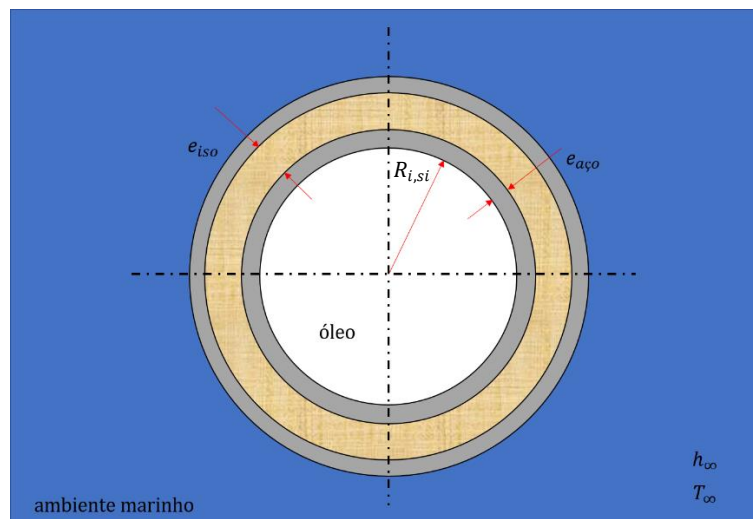
Mesmo na ausência de um campo de velocidade devido a ação de um agente externo (escoamento forçado), sabe-se que pode ser possível que o escoamento esteja ocorrendo devido ao gradiente de temperatura (escoamento livre ou natural). A primeira hipótese então do modelo matemático é assumir que não há transferência de calor por convecção natural. Dessa forma, o único mecanismo de

transferência de calor é a difusão de calor. Uma vez que a dimensão radial do problema é muitas vezes menor do que a dimensão axial, ou seja, o diâmetro do tubo é muito menor do que seu comprimento, uma hipótese é de que não há gradientes de temperatura significativos na direção axial, sobrando então as direções r (radial) e θ (circunferencial). O presente modelo matemático considera apenas a condução de calor radial. As outras hipóteses do modelo são:

- Fluido Newtoniano;
- Propriedades do fluido: constantes;
- Propriedades dos sólidos - tubo de aço e isolamento: constantes;
- Não há geração de calor;
- Não há transferência de calor por radiação;
- Coeficiente externo de transferência de calor é uniforme.

O tubo *pipe-in-pipe* é constituído de um tubo interno de raio $R_{i,si}$ e espessura $e_{aço}$. A tubulação é revestida com um isolante térmico de lã de vidro, de espessura e_{iso} . O tubo externo também é de aço e possui a mesma espessura do tubo interno. Um esquema da seção transversal do tubo é mostrado na figura 4.

Figura 4 – Esquema do tubo tipo *pipe-in-pipe* no ambiente marinho



Fonte: A autoria própria

Com essas hipóteses, o modelo matemático para a transferência de calor por condução, transiente, unidimensional, na direção radial é descrito como,

$$k_i \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = \rho_i c_{pi} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

onde k , ρ e c_p são, respectivamente, a condutividade térmica, a densidade e o calor específico à pressão constante. O índice i refere-se às regiões de análise: óleo, tubo e isolante.

4.1.1 Condições de Contorno

A equação (2) é uma equação diferencial parcial, de primeira ordem no tempo e de segunda ordem no espaço sendo, portanto, necessárias uma condição de contorno para o tempo e duas condições de contorno no espaço.

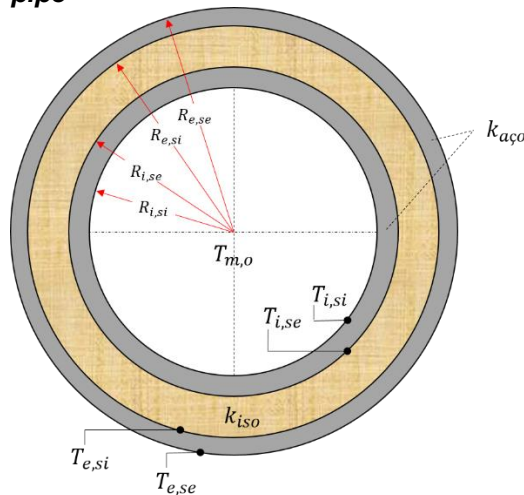
A condição de contorno relacionada ao tempo é chamada de condição inicial. A condição inicial do problema físico apresentado se inicia no momento da parada de produção. Considera-se que no instante infinitesimal antes da parada de produção, o fluido escoava em regime permanente na direção axial, sem nenhum movimento na seção transversal (as componentes de velocidade na direção radial e angular são nulas). Como a velocidade axial não é resolvida, a temperatura inicial do óleo é considerada uniforme e igual à temperatura média de mistura, $T_{o,in} = T_{m,o} = 60^\circ\text{C}$.

Para as paredes do tubo e para o isolamento, o perfil de temperatura inicial foi especificado com base na condição de regime permanente. Considera-se ainda continuidade da temperatura na interface aço-isolante e resistência de contato perfeitas. A figura 5 mostra as definições das temperaturas no tubo. No tubo interno, o perfil de temperatura é dado por,

$$T_{aço,i} = \frac{T_{i,si} - T_{i,se}}{\ln(R_{i,si}/R_{i,se})} \ln\left(\frac{r}{R_{i,se}}\right) + T_{i,se} \quad (3)$$

onde $T_{i,si}$ e $T_{i,se}$ são as temperaturas das superfícies interna e externa do tubo interno, $R_{i,si}$ e $R_{i,se}$ são os raios interno e externo do tubo interno e r é coordenada radial, $R_{i,si} \leq r \leq R_{i,se}$.

Figura 5 – Definições dos raios e das temperaturas no tupo *pipe-in-pipe*



Fonte: Autoria própria

No isolante, o perfil de temperatura é dado por,

$$T_{iso} = \frac{T_{i,se} - T_{e,si}}{\ln(R_{i,se}/R_{e,si})} \ln\left(\frac{r}{R_{i,se}}\right) + T_{e,si} \quad (4)$$

onde $T_{e,si}$ é a temperatura da superfície interna do tubo externo, $R_{e,si}$ é o raio interno do tubo externo e r é coordenada radial, $R_{i,se} \leq r \leq R_{e,si}$.

Por fim, o perfil de temperatura no tubo externo é dado por,

$$T_{aço,e} = \frac{T_{e,si} - T_{e,se}}{\ln(R_{e,si}/R_{e,se})} \ln\left(\frac{r}{R_{e,se}}\right) + T_{e,se} \quad (5)$$

onde $T_{e,se}$ é a temperatura da superfície externa do tubo externo, $R_{e,se}$ é o raio externo do tubo externo e r é coordenada radial, $R_{e,si} \leq r \leq R_{e,se}$.

Para se determinar as temperaturas nas interfaces, $T_{i,si}$, $T_{i,se}$, $T_{e,si}$ e $T_{e,se}$ é necessário conhecer a taxa de transferência de calor do tubo com o ambiente marinho na condição de regime permanente. Dessa forma, pode-se usar a analogia de circuito térmico para obter a taxa de transferência de calor, que é a razão entre, a

diferença de temperatura entre o óleo e a água do mar, e a soma das resistências térmicas.

$$q_r = \frac{T_{m,o} - T_{\infty}}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(R_{i,se}/R_{i,si})}{2\pi k_{aço} L} + \frac{\ln(R_{e,si}/R_{e,se})}{2\pi k_{iso} L} + \frac{\ln(R_{e,se}/R_{e,si})}{2\pi k_{aço} L} + \frac{1}{h_e A_e}} \quad (6)$$

onde, h_i e h_e são os coeficientes de transferência de calor interno e externo. As áreas A_i e A_e são definidas em relação aos seus respectivos raios, $R_{i,si}$ e $R_{e,se}$. $k_{aço}$ e k_{iso} são as condutividades térmicas do aço e do isolante, respectivamente.

O coeficiente de transferência de calor interno, h_i , para a condição inicial é calculado a partir do número de Nusselt, Nu_i , definido como,

$$Nu_i = \frac{h_i 2R_{i,si}}{k_o} \quad (7)$$

onde k_o é a condutividade do óleo.

Por sua vez, o número de Nusselt depende das condições do escoamento. Ele é dependente do número de Reynolds do escoamento (Re) e do número de Prandtl (Pr), definidos como,

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\mu\pi 2R_{i,si}} \quad (8)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (9)$$

onde, \dot{m} é a vazão em massa do escoamento e μ é a viscosidade dinâmica.

O número de Nusselt também depende da condição de contorno na parede do tubo. A literatura apresenta duas condições básicas: temperatura constante na parede e fluxo de calor constante na parede (INCROPERA *et al.*, 2011). É razoável considerar que a temperatura do tubo de transporte de óleo atinja uma temperatura constante na condição de regime permanente. Vários estudos da literatura mostram que a temperatura é aproximadamente constante (SU *et al.*, 2005; QUEIROZ, 2007). De acordo com Incropera *et al.* (2011), para escoamento laminar, completamente

desenvolvido, o número de Nusselt correspondente à condição de contorno de temperatura constante na parede, definido como,

$$Nu_i = 3,66 \quad (10)$$

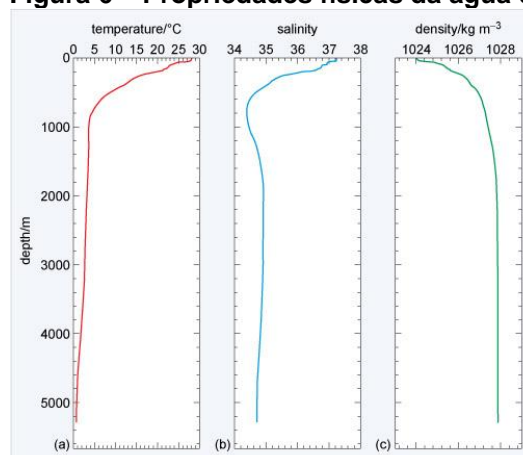
O coeficiente externo de transferência de calor por convecção, h_∞ , é calculado considerando um tubo deitado no leito marinho (KNUDSEN; KATZ, 1958), dada por,

$$Nu_\infty = \frac{h_\infty 2R_{e,ss}}{k_\infty} = 0,0266 Pr^{1/3} Re_\infty^{0,805} \quad (11)$$

onde, k_∞ é a condutividade térmica da água do mar e Re_∞ é o número de Reynolds baseado na máxima velocidade da corrente no fundo do mar e no raio externo do tubo.

A velocidade da corrente pode ser induzida por ventos, marés, tempestades e diferenças de pressão. O perfil de velocidades varia normalmente com a profundidade e reduz à medida que se aproxima do leito marinho (QUEIROZ, 2007). Em geral, a velocidade da corrente (V_∞) está compreendida entre 1,0 e 2,5m/s. A temperatura da água do mar no depende da profundidade e da salinidade. A figura 6 mostra a variação da temperatura, salinidade e densidade em função da profundidade. Para lâminas d'água maiores que 900m, a temperatura da água do mar é menor do que 5°C.

Figura 6 – Propriedades físicas da água do mar no Oceano Atlântico



Fonte: OpenLearn (2018)

Para completar as informações necessárias para resolver a equação (2), as duas condições de contorno no espaço são,

$$r = 0 \rightarrow \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=0} = 0 \quad (12)$$

$$r = R_{e,ss} \rightarrow -k_{aço} \frac{dT}{dr} = h_{\infty}(T - T_{\infty}) \quad (13)$$

A condição de contorno definida pela equação (12) representa o gradiente nulo de temperatura na linha de centro (simetria) do tubo. A condição de contorno dada pela equação (13) representa a transferência de calor por convecção entre o tubo e o ambiente marinho.

Uma grandeza que é importante e será utilizada na análise dos resultados é a temperatura média ou temperatura de mistura, T_m . Como o fluido está estagnado, a temperatura de mistura é calculada como a temperatura média na seção transversal.

$$T_m = \frac{1}{A_T} \int_A T dA \quad (14)$$

onde A_T é a área da seção transversal.

4.2 MODELAGEM NUMÉRICA-COMPUTACIONAL

A modelagem numérica compreende um conjunto de ferramentas matemáticas que devem descrever, da melhor maneira possível, um problema físico real. É através da modelagem numérica que o problema físico real é representado, com o simulador. A modelagem numérica de um problema físico qualquer passa, necessariamente, pelas seguintes etapas:

- Concepção do Domínio Computacional;
- Geração da Malha;

- Método Numérico para a Discretização das Equações Governantes;
- Resolvedor – *Solver*;
- Verificação e Validação dos Resultados.

4.2.1 Concepção do Domínio Computacional

O domínio computacional deve representar uma região de interesse do escoamento e deve também considerar as especificidades dessa região. No presente trabalho, o domínio computacional compreende o óleo estagnado dentro da tubulação, a tubulação de aço (tubo interno e externo) e o isolamento térmico, como mostrado anteriormente na figura 5.

4.2.2 Geração da Malha

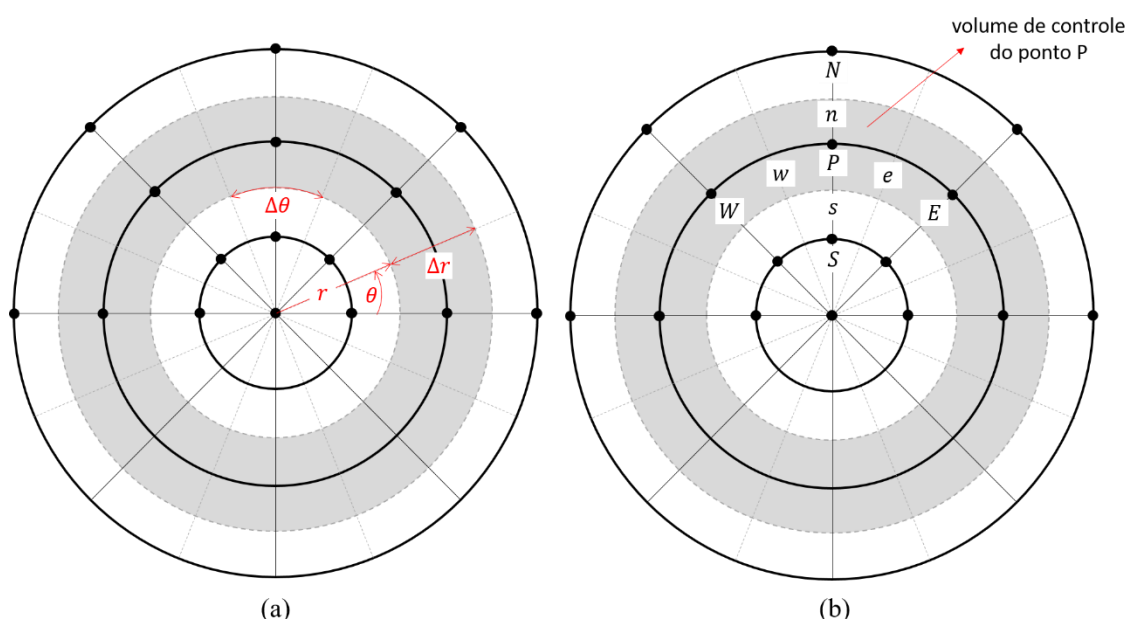
A geração da malha é um processo de subdivisão do domínio computacional e representa o domínio físico em um domínio discreto de pontos. Somente nesses pontos é que as soluções são obtidas. Ao conjunto de pontos discretos dá-se o nome de malha. Segundo Fortuna (2012) existem, basicamente, dois tipos de malhas: as estruturadas e as não estruturadas. As malhas estruturadas apresentam uma estrutura, ou regularidade, na distribuição espacial dos pontos. As malhas não estruturadas não possuem regularidade e permitem a discretização em domínios com geometrias complexas. Uma boa solução numérica para o escoamento depende de uma malha de pontos de boa qualidade, isto é, que seja refinada em regiões nas quais os gradientes das variáveis dependentes são elevados. A obtenção de uma malha adequada não é trivial e pode se tornar um problema mais complexo do que calcular o escoamento do fluido, principalmente em geometrias tridimensionais.

Segundo Patankar (1980) existem dois métodos para a geração da malha: Método A e Método B. O Método A consiste em distribuir os pontos da malha e definir um volume de controle ao redor de cada ponto nodal, especificando as faces dos volumes de controle a meia distância entre os pontos nodais. Na fronteira, é utilizado meio volume de controle. No Método B, distribui-se primeiro as faces dos volumes de controle e, em seguida, define-se um ponto nodal no centro de cada

volume de controle. Pontos nodais são acrescentados nas fronteiras, utilizando um volume de controle. No presente trabalho, optou-se por gerar a malha pelo Método B.

A figura 7 mostra o esquema de uma malha uniforme gerada pelo Método B, em coordenadas cilíndricas onde r é a coordenada radial e θ é a coordenada circunferencial. As nomenclaturas dos pontos nodais e das interfaces dos volumes de controle são diferentes. Os pontos nodais são denominados por letras maiúsculas enquanto as interfaces por letras minúsculas. Assim, um ponto nodal P possui pontos vizinhos a leste (E), a oeste (W), a norte (N) e a sul (S). O volume de controle do ponto P possui interfaces a leste (e), a oeste (w), a norte (n) e a sul (s).

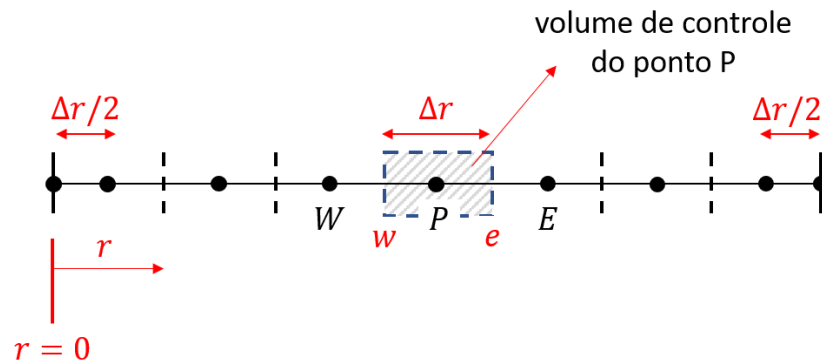
Figura 7 – Malha gerada a partir do Método B, em coordenadas cilíndricas: (a) esquema geral e, (b) nomenclatura dos pontos nodais e das interfaces dos volumes de controle



Fonte: Autoria própria

O presente trabalho considera que a transferência de calor por condução é unidimensional na direção do raio. Dessa forma, malha computacional, uniforme, pode ser representada como mostra a figura 8 a seguir.

Figura 8 – Esquema da malha computacional simplificada – problema unidimensional



Fonte: Autoria própria

A definição da malha é importante para o próximo passo da modelagem numérica que é o método de discretização da equação que representa o fenômeno físico. O método utilizado no presente trabalho é o método de volume de controle (ou volumes finitos) e é apresentado no próximo item.

4.2.3 Método Numérico para a Discretização das Equações Governantes

A literatura mostra que há três métodos básicos que podem ser aplicados para se obter a solução usando conceitos de DFC (dinâmica dos fluidos computacional). São eles: elementos finitos, diferenças finitas e volumes finitos (MALISKA, 1995). Existem outros métodos mais avançados que fogem do escopo do presente trabalho. No presente trabalho o método de volumes finitos foi utilizado.

A formulação do método de volumes finitos, é uma técnica de fácil compreensão e interpretação física (PATANKAR, 1980). Neste método, o domínio de cálculo é dividido em um número determinado de volumes, de tal forma que a vizinhança para cada ponto da malha é constituído de volumes de controle. As equações que governam o fenômeno físico são integradas sobre cada volume de controle. Como resultado, obtêm-se uma equação discretizada para um determinado número de pontos da malha.

O principal atrativo do método dos volumes finitos, é que a solução resultante satisfaz a conservação integral de massa, quantidade de movimento e energia nos volumes de controle em todo o domínio. Como no presente trabalho utiliza-se somente a equação de difusão de calor, a solução resultante deve

satisfazer a equação integral da energia. A aplicação do método leva a um conjunto de equações algébricas, gerando um sistema de equações.

4.2.4 Resolvedor – *Solver*

Para obter a solução do conjunto completo de equações algébricas, o sistema de equações precisa ser resolvido (do termo bem conhecido em inglês, *solver*). No presente trabalho, a aplicação do método gera sistema de equações lineares.

Existem diversas técnicas de solução para sistemas lineares (INCROPERA, 2011). Métodos diretos envolvem um número fixo e predeterminado de equações aritméticas e são convenientes para utilizar quando o número de equações é pequeno. Esses métodos exigem capacidade de memória computacional elevada e tempo maior de simulação. Exemplos de método direto são o método de inversão matricial e o método TDMA (*Tri-diagonal Matrix Algorithm*), também conhecido como algoritmo de Thomas. Os métodos iterativos são caracterizados por redução das exigências computacionais e são especialmente apropriados quando o número de equações é elevado. Um exemplo de método iterativo é o método Gauss-Seidel.

No presente trabalho, o sistema de equações algébricas foi resolvido utilizando o algoritmo de Thomas (TDMA).

4.2.5 Verificação e Validação dos Resultados

Uma parte fundamental da modelagem numérica é analisar se os resultados estão corretos e se traduzem a física do problema estudado. De acordo com o AIAA (1998), existem duas etapas básicas do simulador: verificação e validação. A verificação determina com que grau a implementação do modelo, representada por equações, parâmetros e métodos numéricos adotados, corresponde à descrição conceitual. Os resultados numéricos fornecidos pela implementação do modelo são comparados com soluções de referência podendo ser soluções analíticas, numéricas ou experimentais (FORTUNA, 2012). A verificação não leva em conta o grau de fidelidade entre o modelo e o fenômeno físico real e seu objetivo é avaliar se erros numéricos estão interferindo na solução.

A validação quantifica o grau de representatividade do modelo em relação ao fenômeno físico real e é realizada, normalmente, por comparações sistemáticas com resultados experimentais. A validação fornece evidências de que o modelo utilizado é representativo do fenômeno físico. É importante ressaltar que a verificação e a validação dependem de parâmetros fornecidos pelo usuário tais como: geometria do domínio computacional, modelo numérico adotado, qualidade da malha e implementação das condições de contorno.

4.2.6 Discretização da Equação de Difusão de Calor pelo Método de Volumes Finitos

Como já discutido na modelagem matemática, a equação que governa o fenômeno físico é a equação de difusão de calor, unidimensional, em regime transiente.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (15)$$

Considerando a condutividade térmica e o calor específico constantes, a equação pode ser escrita como,

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \frac{k}{\rho c} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (16)$$

Ou ainda,

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \alpha = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (17)$$

4.2.6.1 Integração da equação governante

A integração da equação (17) no tempo e no volume leva a,

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_V \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \alpha \right) dV dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_V \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) dV dt \quad (18)$$

Ao integrar o termo da direita da igualdade (o termo transiente) na equação (18), temos,

$$\begin{aligned}
 \int_t^{t+\Delta t} \int_V \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) dV dt &= \int_V \int_t^{t+\Delta t} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) dt dV = \int_V (T_p - T_p^o) dV \\
 \int_V (T_p - T_p^o) dV &= \int_V (T_p - T_p^o) r dr d\theta dz = \int_w^e (T_p - T_p^o) r dr d\theta dz = \\
 (T_p - T_p^o) \Delta\theta \Delta z \int_w^e r dr &= (T_p - T_p^o) \Delta\theta \Delta z \left(\frac{r^2}{2} \right)_w^e = \\
 (T_p - T_p^o) \Delta\theta \Delta z \left(\frac{r_e^2 - r_w^2}{2} \right) &= (T_p - T_p^o) \Delta\theta \Delta z \frac{1}{2} (r_e + r_w) (r_e - r_w) = \\
 (T_p - T_p^o) \Delta\theta \Delta z \frac{1}{2} (r_e + r_w) (r_e - r_w) &= (T_p - T_p^o) \Delta\theta \Delta z r_p \Delta r
 \end{aligned}$$

Então, o termo da direita da igualdade da equação (17) pode ser reescrito como,

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_V \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) dV dt = (T_p - T_p^o) r_p \Delta r \Delta\theta \Delta z \quad (19)$$

Ao integrar o termo da esquerda da igualdade na equação (18) no tempo e no volume, temos,

$$\begin{aligned}
 \int_t^{t+\Delta t} \int_V \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \alpha \right) r dr d\theta dz dt &= \\
 = \int_t^{t+\Delta t} \int_V \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \alpha \right) dr d\theta dz dt &= \alpha \int_t^{t+\Delta t} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right)_w^e \Delta\theta \Delta z dt \\
 = \alpha \int_t^{t+\Delta t} \left(\left[r \frac{dT}{dr} \right]_e - \left[r \frac{dT}{dr} \right]_w \right) \Delta\theta \Delta z dt &
 \end{aligned}$$

Fazendo,

$$\begin{aligned}
I_T &= \int_t^{t+\Delta t} T_p dt = [\beta T_p + (1 - \beta) T_p^o] \Delta t \quad (20) \\
&= \alpha \beta \left[r_s \frac{T_E - T_p}{\Delta r} - r_w \frac{T_p - T_W}{\Delta r} \right] \Delta \theta \Delta z \Delta t + \alpha (1 - \beta) \left[r_s \frac{T_E^o - T_p^o}{\Delta r} - r_w \frac{T_p^o - T_W^o}{\Delta r} \right] \Delta \theta \Delta z \Delta t
\end{aligned}$$

Onde,

$\beta = 1 \rightarrow$ Esquema Implícito

$\beta = 0 \rightarrow$ Esquema Explícito

$\beta = 0.5 \rightarrow$ Crank Nicholson

Escolhendo o Esquema Implícito de discretização temporal, $\beta=1$, a equação fica:

$$I_T = \alpha \left[r_s \frac{T_E - T_p}{\Delta r} - r_w \frac{T_p - T_W}{\Delta r} \right] \Delta \theta \Delta z \Delta t \quad (21)$$

Juntando as equações (19) e (21),

$$(T_p - T_p^o) r_p \Delta r \Delta \theta \Delta z = \alpha \left[r_s \frac{T_E - T_p}{\Delta r} - r_w \frac{T_p - T_W}{\Delta r} \right] \Delta \theta \Delta z \Delta t \quad (22)$$

$$\frac{(T_p - T_p^o) r_p \Delta r}{\Delta t} = \alpha \left[r_s \frac{T_E - T_p}{\Delta r} - r_w \frac{T_p - T_W}{\Delta r} \right] \quad (23)$$

Reescrevendo a equação (23), na forma geral dada por:

$$a_p T_p = a_w T_W + a_E T_E + b$$

Ficando,

$$\frac{r_p \Delta r}{\Delta t} T_p - \frac{r_p \Delta r}{\Delta t} T_p^o = \frac{\alpha r_s}{\Delta r} T_E - \frac{\alpha r_s}{\Delta r} T_p - \frac{\alpha r_w}{\Delta r} T_p + \frac{\alpha r_w}{\Delta r} T_W$$

$$\left(\frac{r_p \Delta r}{\Delta t} + \frac{\alpha r_e}{\Delta r} + \frac{\alpha r_w}{\Delta r}\right) T_p = \frac{\alpha r_e}{\Delta r} T_E + \frac{\alpha r_w}{\Delta r} T_W + \frac{r_p \Delta r}{\Delta t} T_p^o$$

Onde,

$$a_p = a_p^o + a_E + a_W - S_p r_p \Delta r$$

$$a_p^o = \frac{r_p \Delta r}{\Delta t}; a_E = \frac{\alpha r_e}{\Delta r}; a_W = \frac{\alpha r_w}{\Delta r}; b = a_p^o T_p^o + S_u r_p \Delta r$$

$$S_p = S_u = 0$$

4.2.6.2 Discretização da fronteira esquerda – Adiabática (Ponto 2, P = 2)

Fisicamente, a fronteira esquerda ($r = 0$) representa o centro do tubo onde o óleo está estagnado. Matematicamente, a condição de contorno é de derivada nula $dT/dr = 0$ que é equivalente, matematicamente falando, a uma condição adiabática.

Na fronteira esquerda temos,

$$r = 0 \rightarrow \frac{dT}{dr} = 0$$

Partindo da equação (23),

$$\frac{(T_p - T_p^o) r_p \Delta r}{\Delta t} = \alpha \left[r_e \frac{T_E - T_p}{\Delta r} \right]$$

$$a_p = a_p^o + a_E + a_W - S_p r_p \Delta r$$

$$a_p^o = \frac{r_p \Delta r}{\Delta t}; a_E = \frac{\alpha r_E}{\Delta r}; a_W = 0; b = a_p^o T_p^o + S_u r_p \Delta r$$

$$S_p = S_u = 0$$

4.2.6.3 Discretização da fronteira direita – Caso 1: Temperatura conhecida (Ponto L2)

A discretização da fronteira direita ($r = R$) será aqui dividida com base em dois casos básicas estudados. O primeiro caso estudado envolve um problema que possui solução analítica e servirá de validação numérica do presente trabalho. Esse caso (caso 1) considera a transferência de calor, unidimensional, transiente, de um cilindro maciço de óleo (sem paredes). A temperatura em ($r = R$) é uma temperatura T conhecida.

Para o ponto $P = N - 1$ e partindo da equação (23),

$$\frac{(T_p - T_p^o) r_p \Delta r}{\Delta t} = \alpha \left[r_E \frac{T_N - T_{N-1}}{\Delta r/2} - r_W \frac{T_{N-1} - T_{N-2}}{\Delta r} \right]$$

$$\frac{r_p \Delta r}{\Delta t} T_{N-1} - \frac{r_p \Delta r}{\Delta t} T_{N-1}^o = \frac{\alpha r_E}{\Delta r/2} T_N - \frac{\alpha r_E}{\Delta r/2} T_{N-1} - \frac{\alpha r_W}{\Delta r} T_{N-1} + \frac{\alpha r_W}{\Delta r} T_{N-2}$$

Mas,

$$T_N = T_{\text{superfície}}$$

Então,

$$\left(\frac{r_p \Delta r}{\Delta t} + \frac{\alpha r_W}{\Delta r} + \frac{\alpha r_E}{\Delta r/2} \right) T_{N-1} = \frac{\alpha r_W}{\Delta r} T_{N-2} + \frac{r_p \Delta r}{\Delta t} T_{N-1}^o + \frac{\alpha r_E}{\Delta r/2} T_{\text{sup}}$$

$$a_p = a_p^o + a_E + a_W - (S_p r_p \Delta r + S_{pad})$$

$$a_p^o = \frac{r_p \Delta r}{\Delta t}; a_E = 0; a_W = \frac{\alpha r_w}{\Delta r}; b = a_p^o T_p^o + S_u r_p \Delta r + S_{uad}$$

$$S_p = S_u = 0$$

$$S_{uad} = \frac{\alpha r_s}{\Delta r/2} T_{sup}; S_{pad} = -\frac{\alpha r_s}{\Delta r/2}$$

4.2.6.4 Discretização da fronteira direita – Caso 2: Convecção (Ponto L2)

O segundo caso de estudo (caso 2) considera a transferência de calor, unidimensional, transiente, do óleo e do tubo (sem isolamento) com o ambiente marinho que possui um coeficiente de transferência de calor e temperatura conhecidos. A parede externa do tubo externo é uma fronteira com a água do mar, caracterizada por uma fronteira de convecção térmica. Isso significa que é uma fronteira onde o coeficiente de transferência de calor (h_∞) é conhecido.

Assim, a discretização deve considerar a transferência de calor no óleo e no tubo de aço interno.

Para o ponto $P = N - 1$ e partindo da equação (23),

$$\frac{(T_p - T_p^o) r_p \Delta r}{\Delta t} = \alpha \left[r_s \frac{T_N - T_{N-1}}{\Delta r/2} - r_w \frac{T_{N-1} - T_{N-2}}{\Delta r} \right]$$

Para esse caso, é necessário realizar um balanço de energia na fronteira ($r = R$) de convecção. O calor que chega à fronteira por condução térmica é perdido para a água do mar por convecção térmica. Matematicamente o balanço de energia é descrito como,

$$q_{cond} = q_{conv}$$

$$-kA \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=R} = h_{\infty} A (T_s - T_{\infty})$$

Ou ainda,

$$kA \frac{T_{N-1} - T_N}{\Delta r/2} = h_{\infty} A (T_N - T_{\infty})$$

Como o valor de T_N não é conhecido, pode-se escrever que,

$$k \frac{T_{N-1} - T_N}{\Delta r/2} = h_{\infty} (T_N - T_{\infty}) = \frac{T_{N-1} - T_{\infty}}{\frac{\Delta r/2}{kA} + \frac{1}{h_{\infty}A}}$$

Substituindo essa definição,

$$\frac{(T_p - T_p^o) r_p \Delta r}{\Delta t} = \alpha \left[r_s \left(\frac{T_{\infty} - T_{N-1}}{\frac{\Delta r/2}{kA} + \frac{1}{h_{\infty}A}} \right) - r_w \frac{T_{N-1} - T_{N-2}}{\Delta r} \right]$$

$$\left(\frac{r_p \Delta r}{\Delta t} + \frac{r_s}{\rho c_p R_{eq}} + \frac{\alpha r_w}{\Delta r} \right) T_{N-1} = \frac{\alpha r_w}{\Delta r} T_{N-2} + \frac{r_s}{\rho c_p R_{eq}} T_{\infty} + \frac{r_p \Delta r}{\Delta t} T_{N-1}^o$$

$$a_p = a_p^o + a_E + a_W - (S_p r_p \Delta r + S_{pad})$$

$$a_p^o = \frac{r_p \Delta r}{\Delta t}; a_E = 0; a_W = \frac{\alpha r_w}{\Delta r}; b = a_p^o T_p^o + S_u r_p \Delta r + S_{uad}$$

$$S_p = S_u = 0$$

$$S_{uad} = \frac{r_s}{\rho c_p R_{eq}} T_{\infty}; S_{pad} = -\frac{r_s}{\rho c_p R_{eq}}$$

4.2.6.5 Discretização da fronteira direita – Caso 3: Convecção (Ponto L2)

O terceiro caso de estudo (caso 3) é o principal caso de estudo do presente trabalho. Ele considera a transferência de calor, unidimensional, transiente, do óleo e do tubo (com isolamento, tipo *pipe-in-pipe*) com o ambiente marinho que possui um coeficiente de transferência de calor e temperatura conhecidos.

Assim, a discretização deve considerar a transferência de calor no óleo, no tubo de aço interno, no isolamento térmico e no tubo de aço externo. Processo este análogo às discretizações dos casos 1 e 2 apresentadas anteriormente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando a condução de calor em regime transiente unidimensional num *riser* de petróleo, serão analisadas situações com diferentes condições em que o óleo estagnado no interior de um *riser* na horizontal, devido a uma parada de produção, troca calor do com a água do mar.

5.1 CASO 1 – TEMPERATURA CONHECIDA NA FRONTEIRA ESQUERDA

Realizou-se primeiramente uma simulação no MATLAB® considerando-se uma situação hipotética em que o ocorre uma troca de calor por condução. Com o intuito de comparar a solução numérica obtida com a solução analítica, para uma validação do ponto de vista matemático. A tabela 4 apresenta os dados geométricos utilizados, enquanto que as propriedades termofísicas encontram-se na tabela 5.

Tabela 4 – Caso 1: Parâmetros geométricos

Dimensões	(m)
Diâmetro interno do duto (D_o)	0,5
Raio interno do duto (R_o)	0,25

Fonte: Aatoria própria

Tabela 5 – Caso 1: Propriedades termofísicas

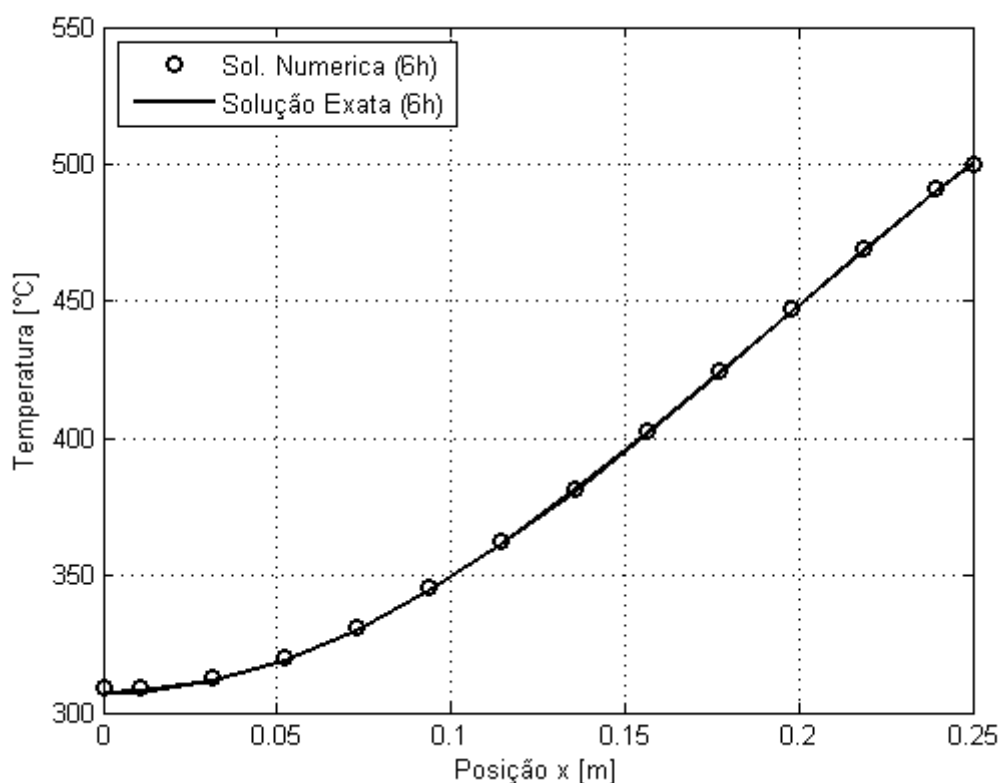
Propriedades	
Coefficiente convectivo (h)	10 W/(m ² .K)
Temperatura inicial (T_o)	20°C
Temperatura do fluido (T_∞)	500°C
Temperatura da superfície (T_s)	500°C
Massa específica (ρ)	2300 kg/m ³
Calor específico (c)	880 J/(kg.K)
Condutividade (κ)	1,4 W/(m.K)
Difusividade térmica (α)	$\kappa/(\rho*c)$ m ² /s

Fonte: Aatoria própria

A solução numérica foi gerada pela divisão do domínio L (raio) em quatorze volumes de controle iguais e calculada usando o passo de tempo de 0,1s e com um tempo total de 6h.

Obteve-se, como pode ser visto no gráfico 1, uma solução numérica que converge para a solução analítica. Além disso, no gráfico 1 nota-se em ambas as soluções um aumento da temperatura ao longo do raio do duto (Posição x), que inicialmente era de 20°C , o que confirma a troca de calor com o fluido externo que encontrava-se a 500°C .

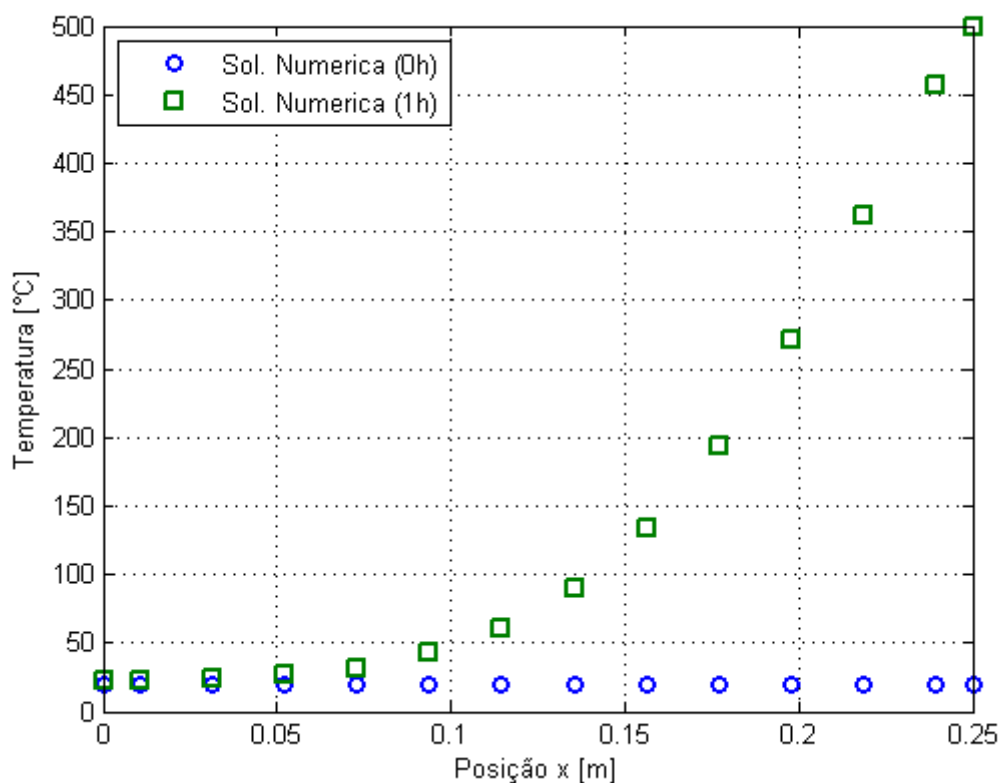
Gráfico 1 – Caso 1: Variação da temperatura ao longo do raio após 6h



Fonte: Autoria própria

Enquanto que no gráfico 2 pode-se notar a influência da condução na temperatura ao longo do raio após 1h, comparando-se a distribuição da temperatura no tempo zero em toda a extensão do raio, que é de fato a temperatura inicial de 20°C , com após a temperatura após 1h, que aumenta ao longo do raio.

Gráfico 2 – Caso 1: Variação da temperatura no tempo zero e após 1h



Fonte: Autoria própria

5.2 CASO 2 – DUTO SIMPLES COM CONVECÇÃO NA FRONTEIRA ESQUERDA

Realizaram-se simulações no MATLAB® considerando-se um duto simples (sem isolamento) com fronteira de convecção com o ambiente marinho. A tabela 6 apresenta os dados geométricos utilizados, as propriedades termofísicas do óleo, do aço e da água do mar encontram-se, respectivamente, nas tabelas 7, 8 e 9, enquanto que as condições iniciais estão na tabela 10.

Tabela 6 – Caso 2: Parâmetros geométricos da parede do duto

Dimensões	(m)
Raio interno do duto ($R_{i,si}$)	0,1524
Espessura do aço ($e_{aço}$)	0,0127
Raio total ($R_{i,se}$)	$R_{i,si} + e_{aço}$

Fonte: Autoria própria

Tabela 7 – Caso 2: Propriedades do óleo

Propriedades	Óleo
Condutividade κ [W/(m.K)]	0,13129
Massa específica ρ (kg/m ³)	882,7
Calor específico à pressão constante c_p [J/(kg.K)]	1830
Difusividade térmica α (m ² /s)	8,13E-08

Fonte: Autoria própria

Tabela 8 – Caso 2: Propriedades da parede do duto

Propriedades	Aço
Condutividade κ [W/(m.K)]	60
Massa específica ρ (kg/m ³)	7850
Calor específico à pressão constante c_p [J/(kg.K)]	440
Difusividade térmica α (m ² /s)	1,74E-05

Fonte: Autoria própria

Tabela 9 – Caso 2: Propriedades da água do mar

Propriedades	Água do mar
Condutividade κ [W/(m.K)]	0,59
Massa específica ρ (kg/m ³)	1055
Viscosidade absoluta μ [kg/(s.m)]	1,08E-03
Número de Prandtl Pr	8,81

Fonte: Autoria própria

Tabela 10 – Caso 2: Condições iniciais

Condições iniciais	
Temperatura inicial	60°C
Velocidade do fluido	0,2 m/s
Temperatura do fluido	5°C

Fonte: Autoria própria

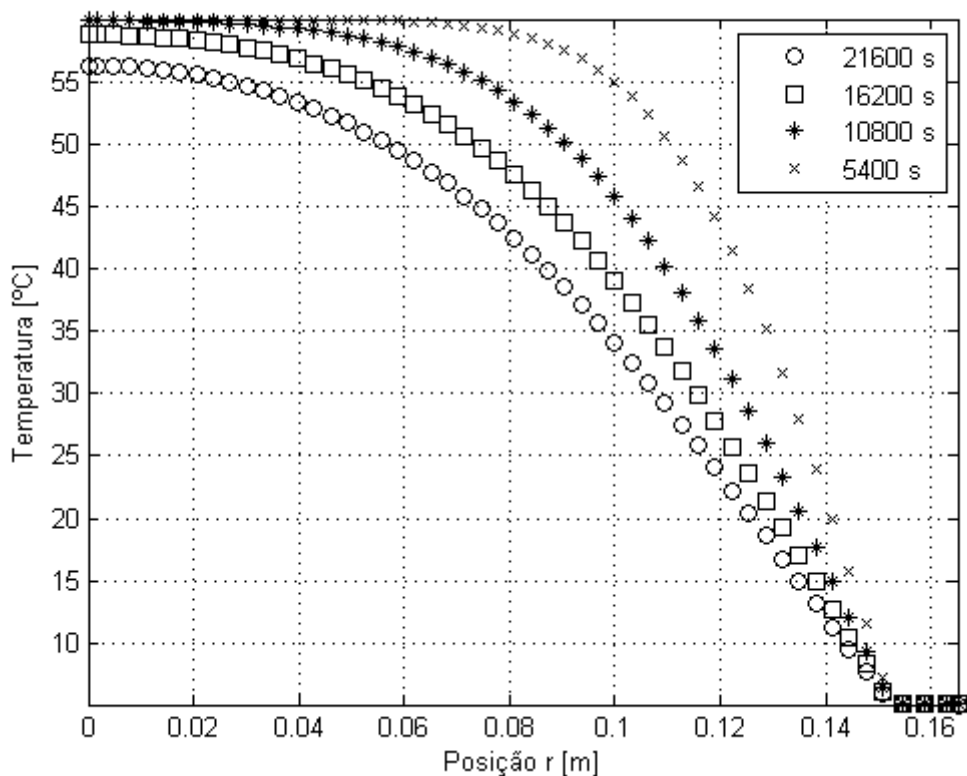
5.2.1 Caso 2.1: Duto Simples com Convecção na Fronteira Esquerda – Tempo Total de 6h

A solução numérica foi calculada com malha temporal com passo de tempo de 10s e com um tempo total de 6h. A malha computacional para o óleo foi gerada pela divisão do domínio L_o (raio) em cinquenta volumes de controle iguais. Enquanto que a malha computacional para o aço foi gerada pela divisão do domínio $L_aço$ (comprimento) em cinco volumes de controle iguais.

No gráfico 3 pode-se ver a variação da temperatura devido à condução ao longo do raio após 1,5h, 3h, 4,5h e 6h, notando-se, como esperado, uma diminuição da temperatura ao longo do raio, devido à baixa temperatura do ambiente marinho (externo ao duto), e uma diminuição da temperatura com o passar do tempo.

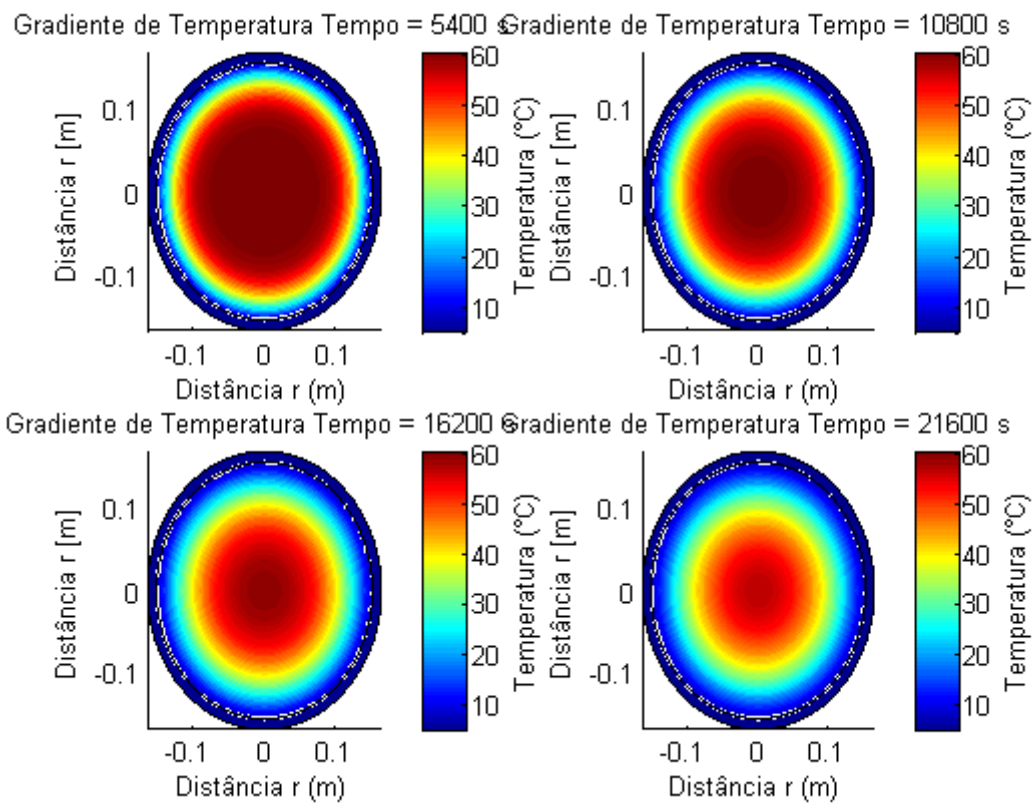
Enquanto que no gráfico 4 a mesma variação pode ser observada numa distribuição do gradiente de temperatura ao longo do raio num corte transversal no duto. A diminuição da temperatura média do óleo devido à troca de calor por condução com a água do mar ao longo de 6h pode ser observada no gráfico 5.

Gráfico 3 – Caso 2.1: Variação da temperatura ao longo do raio em diferentes tempos

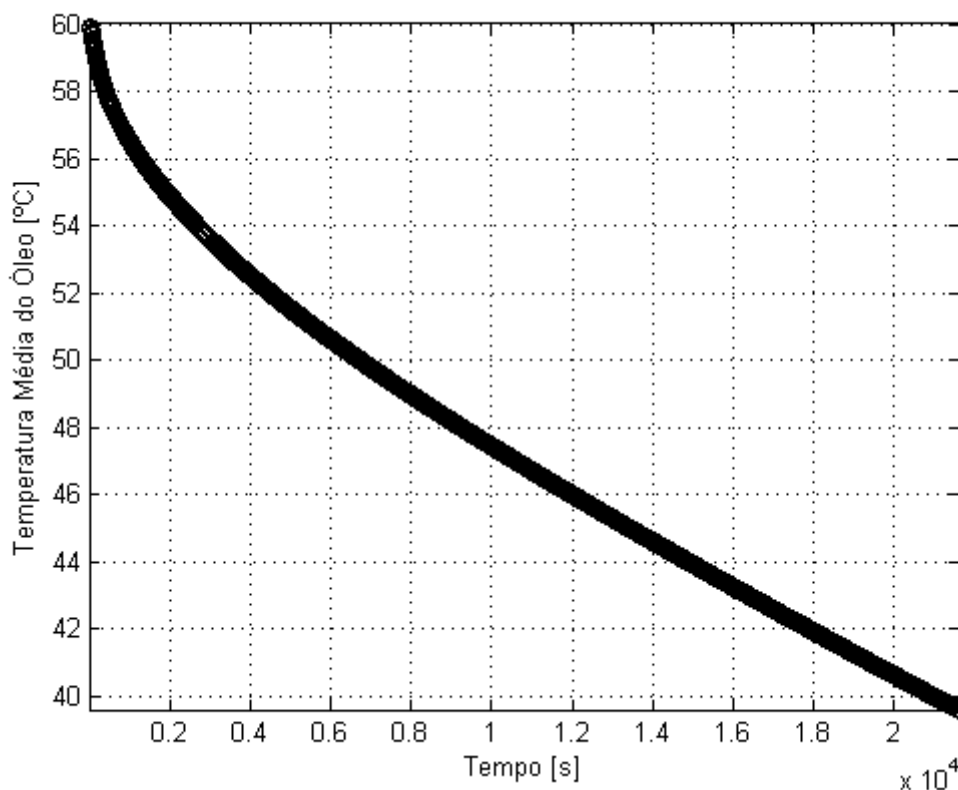


Fonte: Autoria própria

Gráfico 4 – Caso 2.1: Gradiente de temperatura ao longo do raio em diferentes tempos



Fonte: Autoria própria

Gráfico 5 – Caso 2.1: Variação da temperatura média do óleo ao longo de tempo

Fonte: Autoria própria

Vários autores da literatura informam que a temperatura de aparecimento de cristais (TIAC) para um óleo parafínico é de aproximadamente 39°C (SU, 2005). Outros autores indicam que a TIAC pode ser menor ainda, aproximadamente 25°C (AIYEJINA *et al*, 2001). Essa diferença de valores de TIAC é devido às diferentes características dos óleos parafínicos.

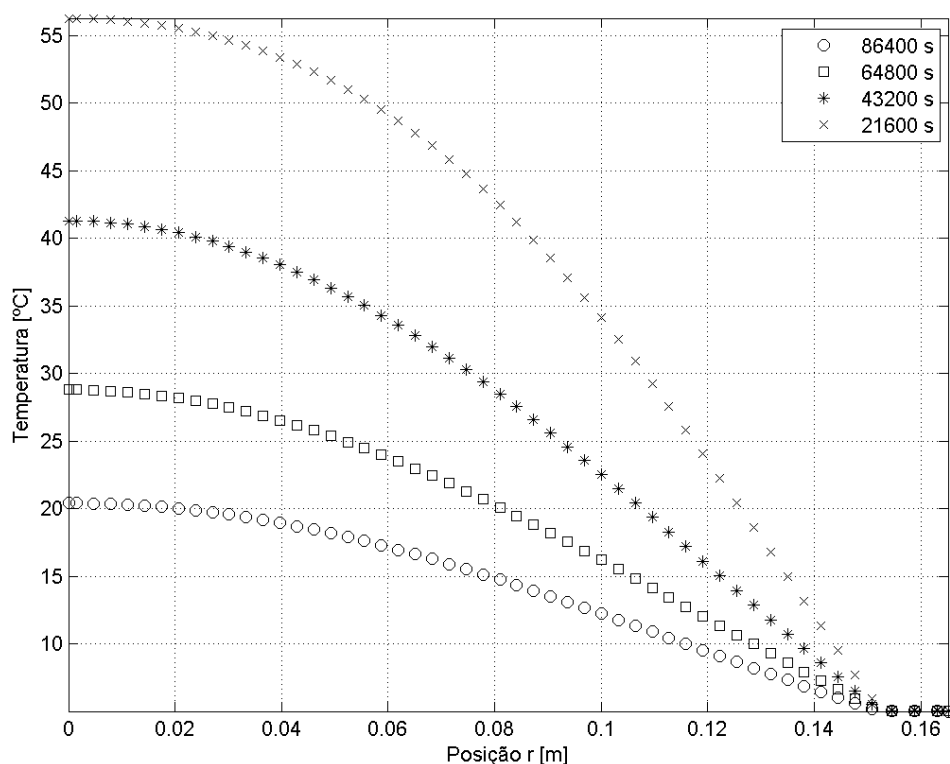
Com os resultados apresentados nos gráficos 3, 4 e 5, é possível notar que a temperatura do óleo, após 6h, possui um valor mínimo de aproximadamente 10°C e máximo de 60°C. Após esse período de tempo, o óleo contido entre $0 \leq r \leq 0,08\text{m}$ está com uma temperatura acima de 40°C. Para posição radial acima de 0,08m, a temperatura do óleo atingiria a TIAC.

5.2.2 Caso 2.2: Duto Simples com Convecção na Fronteira Esquerda – Tempo Total de 24h

Analogamente, calculou-se a solução numérica com malha temporal com passo de tempo de 10s e com um tempo total de 24h. As malhas computacionais para o óleo e para o aço foram geradas da mesma maneira descrita no caso 02.1.

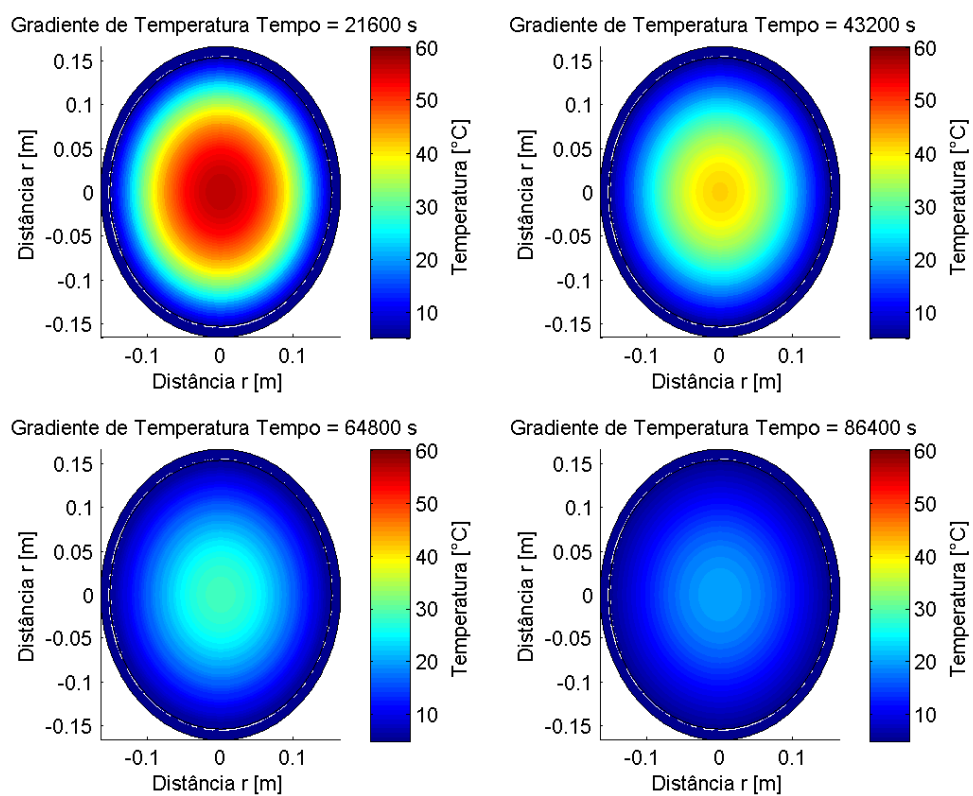
No gráfico 6 pode-se ver a variação da temperatura devido à condução ao longo do raio após 6h, 12h, 18h e 24h, notando-se mais uma vez a diminuição da temperatura ao longo do raio e com o passar do tempo. Enquanto que no gráfico 7 a mesma variação pode ser observada na distribuição do gradiente de temperatura ao longo do raio num corte transversal no duto. A diminuição da temperatura média do óleo devido à troca de calor por condução com a água do mar ao longo de 24h pode ser observada no gráfico 8.

Gráfico 6 – Caso 2.2: Variação da temperatura ao longo do raio em diferentes tempos



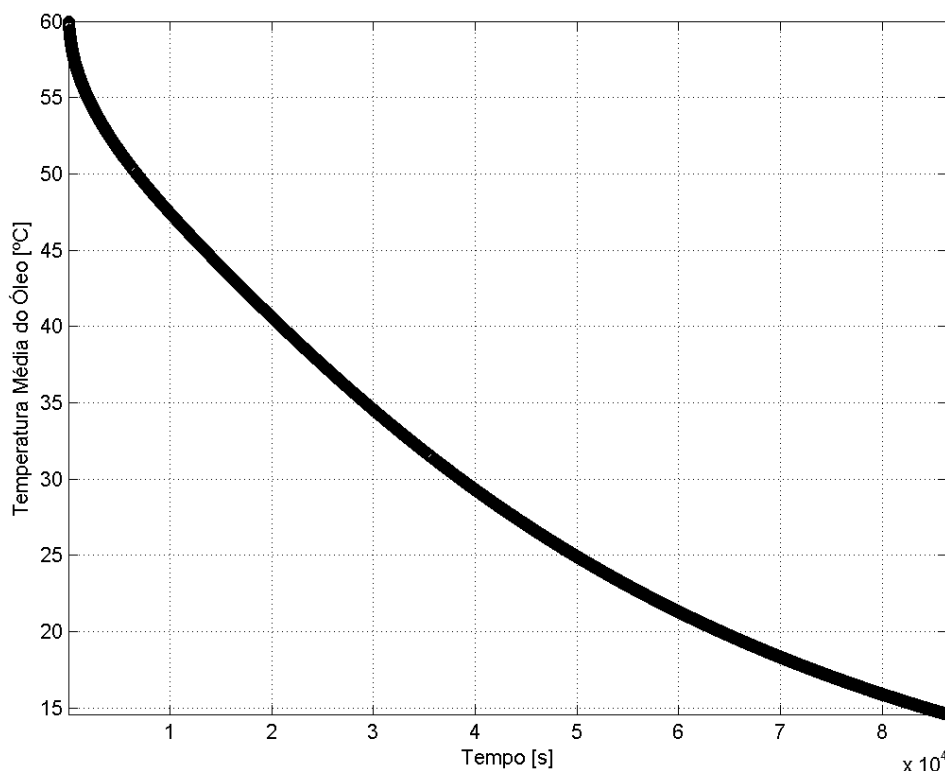
Fonte: Autoria própria

Gráfico 7 – Caso 2.2: Gradiente de temperatura ao longo do raio em diferentes tempos



Fonte: Autoria própria

Gráfico 8 – Caso 2.2: Variação da temperatura média do óleo ao longo de tempo



Fonte: Autoria própria

Com os resultados apresentados nos gráficos 6, 7 e 8, é possível notar que a temperatura do óleo, após 24h, possui um valor mínimo de aproximadamente 10°C e máximo de 20°C. Após esse período de tempo, o óleo contido entre todo o raio está com uma temperatura abaixo de 20°C, ou seja, a temperatura de todo o óleo atingiria a TIAC.

5.3 CASO 3 – PIPE-IN-PIPE COM CONVECÇÃO NA FRONTEIRA ESQUERDA

Por fim, realizaram-se simulações no MATLAB® considerando-se a situação real de um tudo pipe-in-pipe (com isolamento) com temperatura variável na superfície do cilindro, malha completa gerada pelo método B e perfil de temperatura inicial em regime permanente, com fronteira de convecção com o ambiente marinho.

A tabela 11 apresenta os parâmetros geométricos do duto utilizados, as propriedades termofísicas do óleo leve, do óleo pesado, do aço e da água do mar encontram-se, respectivamente, nas tabelas 12, 13, 14 e 15, enquanto que as condições iniciais estão na tabela 16.

Tabela 11 – Caso 3: Parâmetros geométricos da parede do duto (aço e isolante)

Dimensões	(m)
Raio interno do tubo interno ($R_{i,si}$)	0,1524
Espessura do aço ($e_{aço}$)	0,0127
Raio externo do tubo interno ($R_{i,se}$)	$R_{i,si} + e_{aço}$
Espessura do isolante (e_{iso})	0,2
Raio do isolante (R_{iso})	$R_{i,se} + e_{iso}$
Raio externo do tubo externo ($R_{e,se}$)	$R_{iso} + e_{aço}$

Fonte: Autoria própria

Tabela 12 – Caso 3: Propriedades do óleo

Propriedades	Óleo
Condutividade κ [W/(m.K)]	0,13129
Massa específica ρ (kg/m ³)	882,7
Calor específico à pressão constante c_p [J/(kg.K)]	1830
Difusividade térmica α (m ² /s)	8,13E-08

Fonte: Autoria própria

Tabela 13 – Caso 3: Propriedades do óleo pesado

Propriedades	Óleo
Condutividade κ [W/(m.K)]	0,12170
Massa específica ρ (kg/m ³)	952,0
Calor específico à pressão constante c_p [J/(kg.K)]	1762
Difusividade térmica α (m ² /s)	7,25E-08

Fonte: Autoria própria

Tabela 14 – Caso 3: Propriedades da parede do duto (aço e isolante)

Propriedades	Aço	Isolante
Condutividade κ [W/(m.K)]	60	0,38
Massa específica ρ (kg/m ³)	7850	52
Calor específico à pressão constante c_p [J/(kg.K)]	440	657
Difusividade térmica α (m ² /s)	1,74E-05	1,11E-05

Fonte: Autoria própria

Tabela 15 – Caso 3: Propriedades da água do mar

Propriedades	Água do mar
Condutividade κ [W/(m.K)]	0,59
Massa específica ρ (kg/m ³)	1055
Viscosidade absoluta μ [kg/(s.m)]	1,08E-03
Número de Prandtl Pr	8,81

Fonte: Autoria própria

Tabela 16 – Caso 3: Condições iniciais

Condições iniciais	
Temperatura inicial	60°C
Velocidade do fluido	0,2 m/s
Temperatura do fluido	5°C

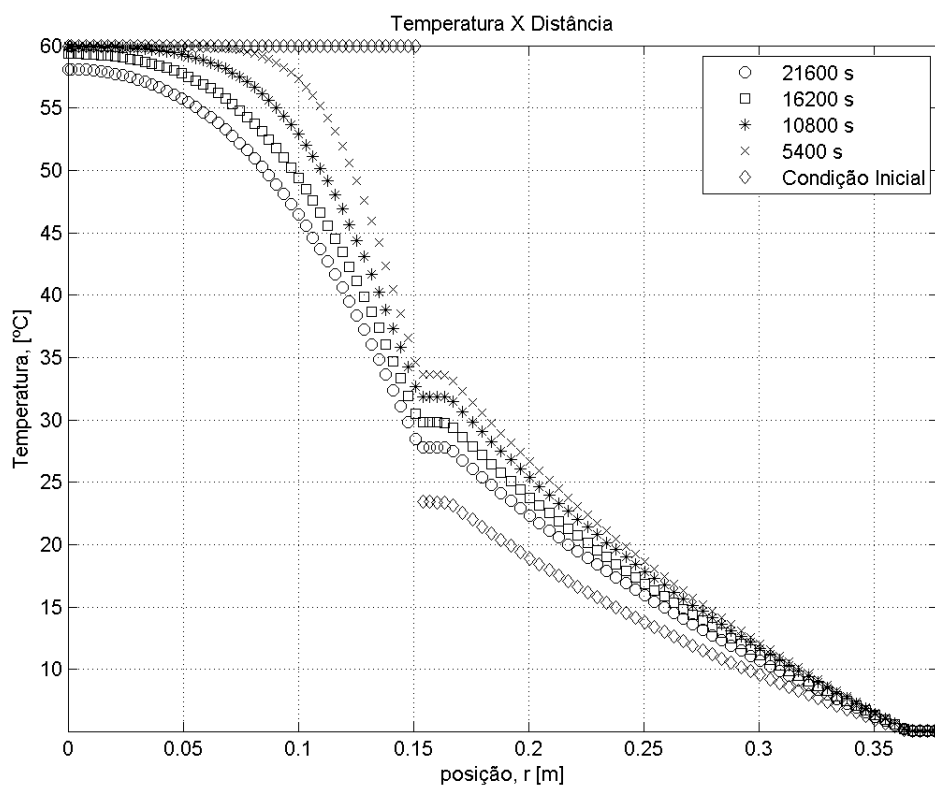
Fonte: Autoria própria

5.3.1 Caso 3.1: Pipe-In-Pipe com Convecção na Fronteira Esquerda – Tempo Total de 6 horas

A solução numérica foi calculada com malha temporal com passo de tempo de 10s e com um tempo total de 6h. A malha computacional para o óleo foi gerada pela divisão do domínio L_o (raio) em cinquenta volumes de controle iguais. Enquanto que a malha computacional para o aço foi gerada pela divisão do domínio L_a (comprimento) em seis volumes de controle iguais.

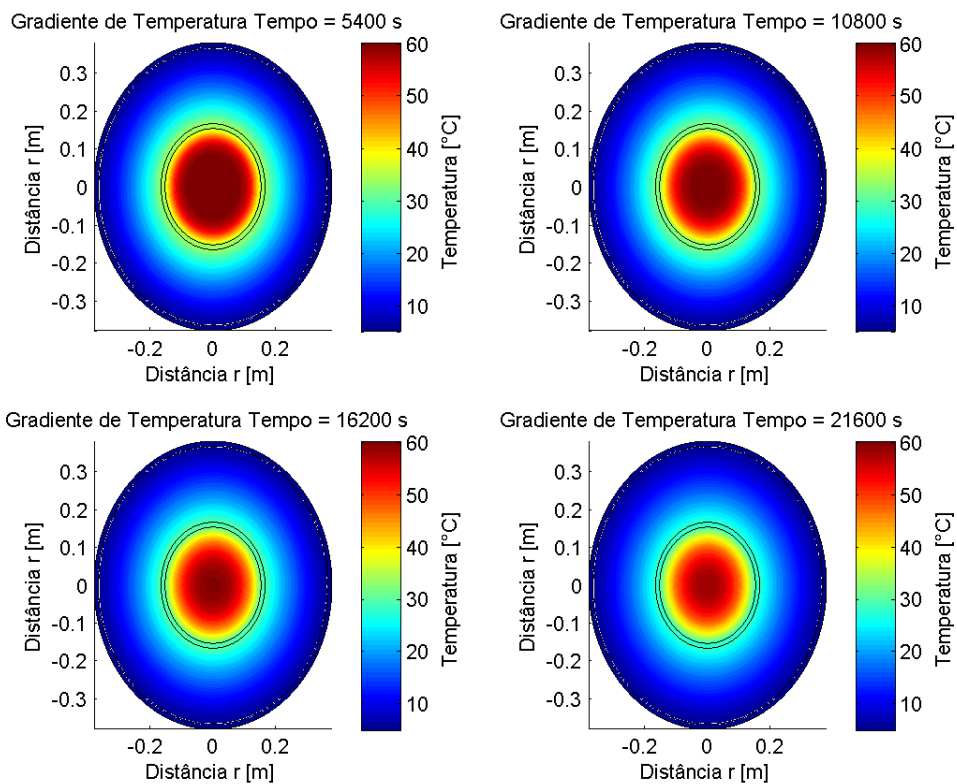
No gráfico 9 pode-se ver a variação da temperatura devido à condução ao longo do raio após 1,5h, 3h, 4,5h e 6h, assim com a distribuição de temperatura ao longo do raio nas condições iniciais, nota-se uma diminuição da temperatura ao longo do raio, devido à baixa temperatura do ambiente marinho, e uma diminuição da temperatura em toda a extensão do raio com o passar do tempo. Enquanto que no gráfico 10 a mesma variação pode ser observada numa distribuição do gradiente de temperatura ao longo do raio num corte transversal no duto. A diminuição da temperatura média do óleo devido à troca de calor por condução com a água do mar ao longo de 6h pode ser observada no gráfico 11.

Gráfico 9 – Caso 3.1: Variação da temperatura ao longo do raio em diferentes tempos



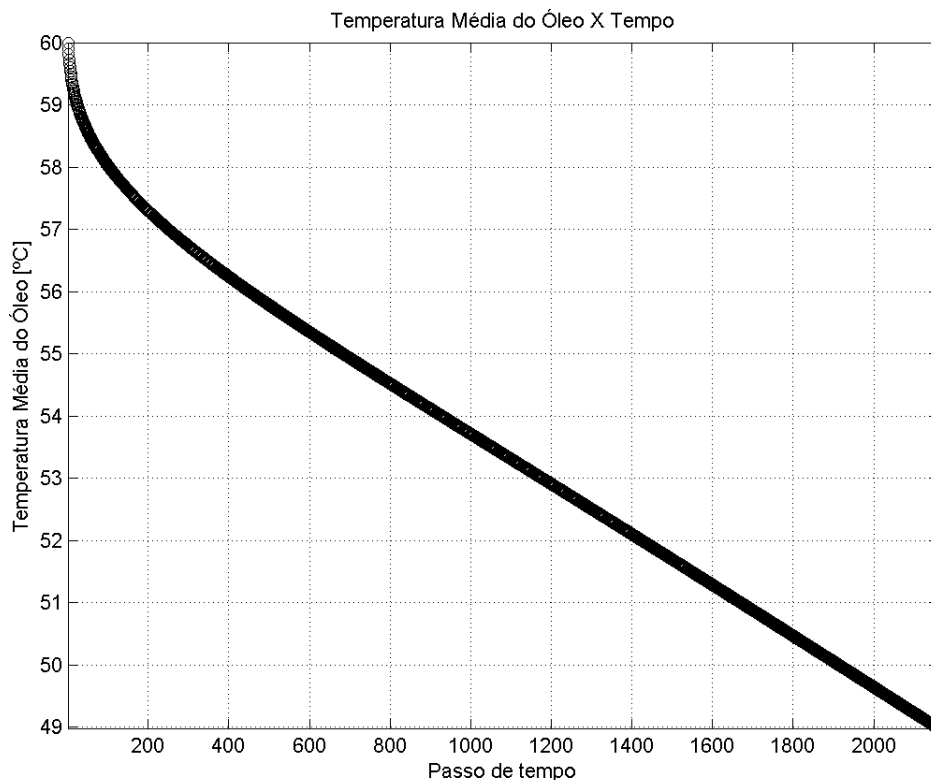
Fonte: Autoria própria

Gráfico 10 – Caso 3.1: Gradiente de temperatura ao longo do raio em diferentes tempos



Fonte: Autoria própria

Gráfico 11 – Caso 3.1: Variação da temperatura média do óleo ao longo de tempo



Fonte: Autoria própria

Uma vez que a temperatura de aparecimento de cristais (TIAC) para um óleo parafínico pode variar entre 39°C (SU, 2005) e 25°C (AIYEJINA *et al*, 2001), de acordo com as diferentes características dos óleos parafínicos, a análise do resfriamento do óleo e consequente formação de cristais ao longo do raio irá considerar o limite superior arredondado da TIAC, de 40°C.

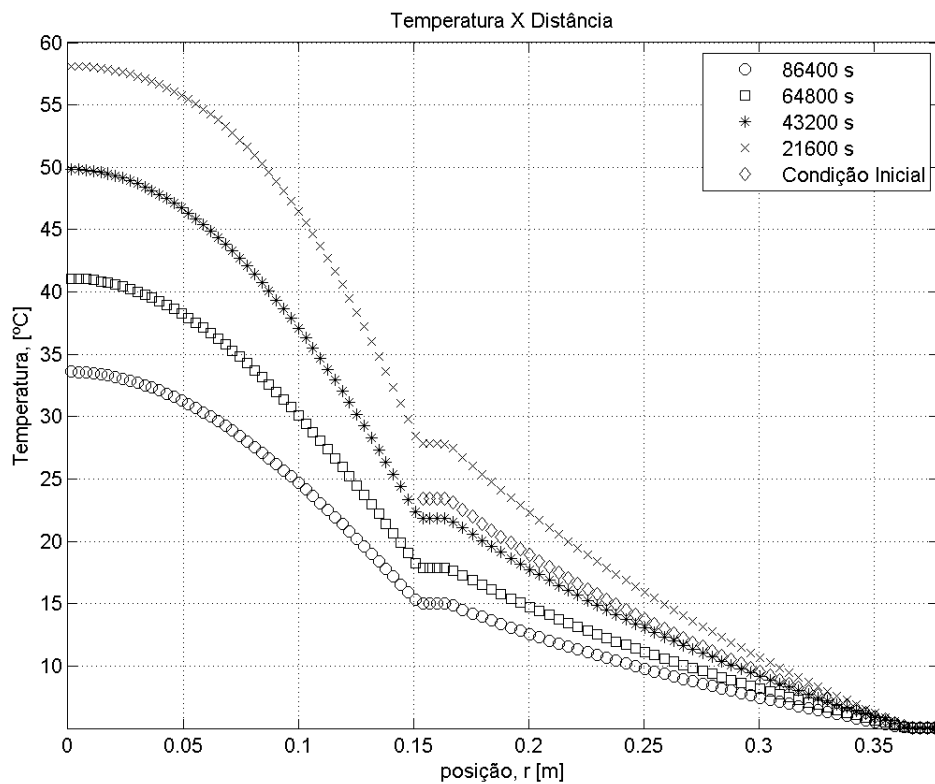
Com os resultados apresentados nos gráficos 9, 10 e 11, é possível notar que a temperatura do óleo, após 6h, possui um valor mínimo de aproximadamente 10°C e máximo de 60°C. Após esse período de tempo, o óleo contido entre $0 \leq r \leq 0,15\text{m}$ está com uma temperatura acima de 40°C. Para posição radial acima de 0,15m, a temperatura do óleo atingiria a TIAC.

5.3.2 Caso 3.2: Pipe-In-Pipe com Convecção na Fronteira Esquerda – Tempo Total de 24 horas

A solução numérica foi calculada com malha temporal com passo de tempo de 10s e com um tempo total de 24h. A malha computacional para o óleo foi gerada pela divisão do domínio L_o (raio) em cinquenta volumes de controle iguais. Enquanto que a malha computacional para o aço foi gerada pela divisão do domínio L_a (comprimento) em seis volumes de controle iguais.

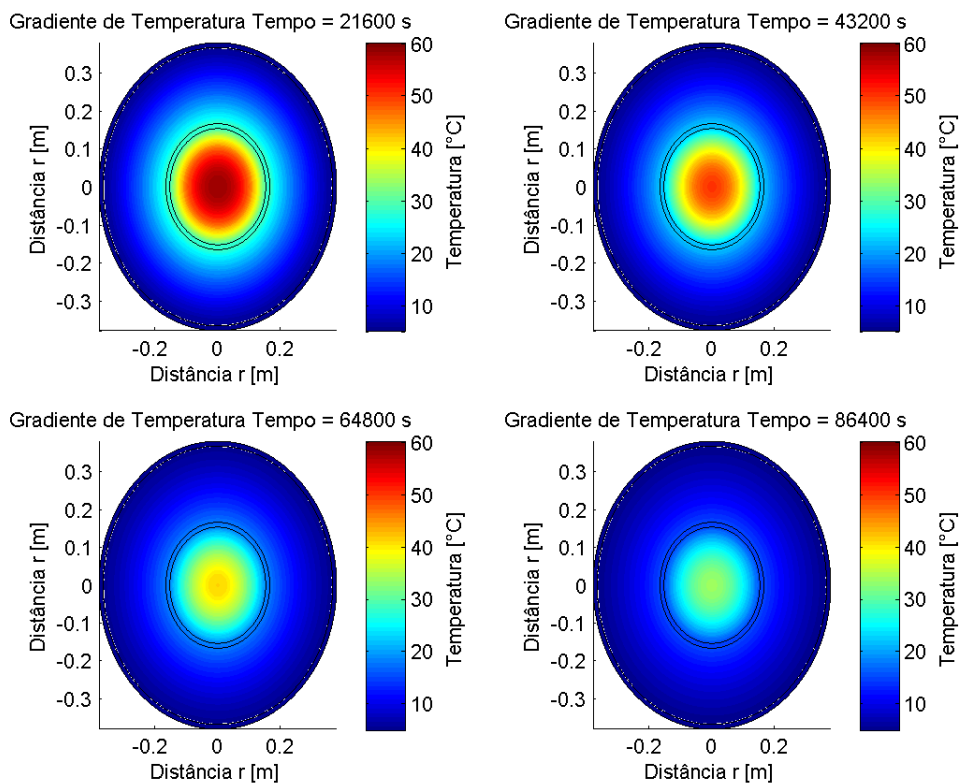
No gráfico 12 pode-se ver a variação da temperatura devido à condução ao longo do raio após 6h, 12h, 18h e 24h, assim com a distribuição de temperatura ao longo do raio nas condições iniciais, nota-se uma diminuição da temperatura ao longo do raio, devido à baixa temperatura do ambiente marinho, e uma diminuição da temperatura em toda a extensão do raio com o passar do tempo. Enquanto que no gráfico 13 a mesma variação pode ser observada numa distribuição do gradiente de temperatura ao longo do raio num corte transversal no duto. A diminuição da temperatura média do óleo devido à troca de calor por condução com a água do mar ao longo de 24h pode ser observada no gráfico 14.

Gráfico 12 – Caso 3.2: Variação da temperatura ao longo do raio em diferentes tempos



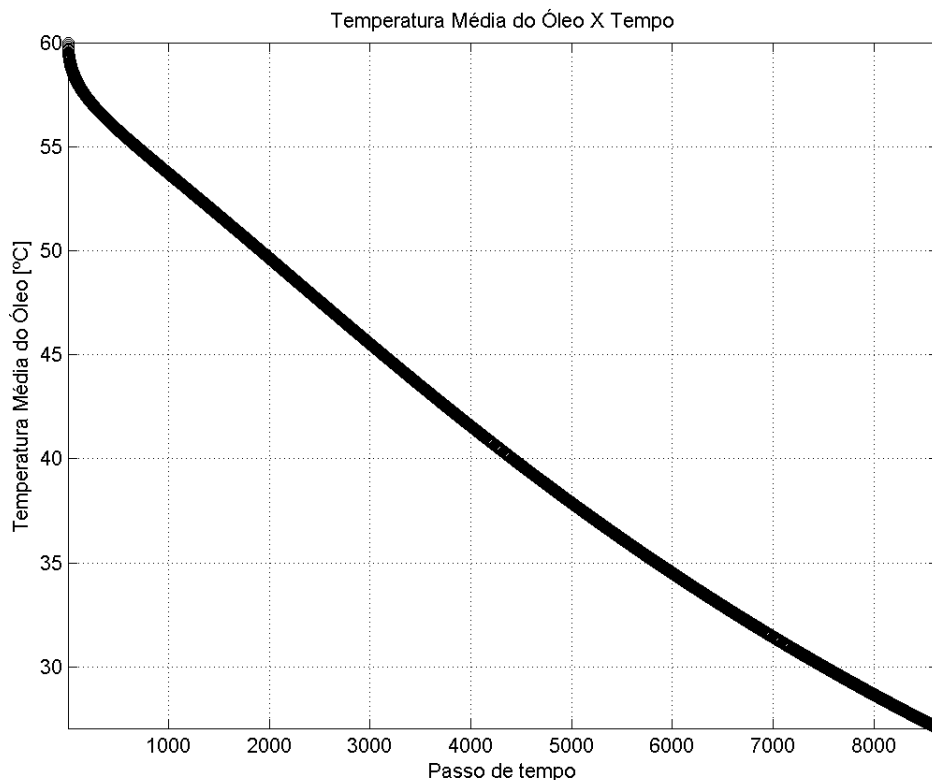
Fonte: Autoria própria

Gráfico 13 – Caso 3.2: Gradiente de temperatura ao longo do raio em diferentes tempos



Fonte: Autoria própria

Gráfico 14 – Caso 3.2: Variação da temperatura média do óleo ao longo de tempo



Fonte: Autoria própria

Analisando-se o resfriamento do óleo e a formação de cristais ao longo do raio, com uma TIAC de 40°C, nota-se, com os resultados apresentados nos gráficos 12, 13 e 14, que a temperatura do óleo, após 24h, possui um valor mínimo de aproximadamente 10°C e máximo de 35°C. Com isso, após esse período de tempo, o óleo contido em toda a extensão do raio está com temperatura abaixo de 40°C e portanto atingiria a TIAC.

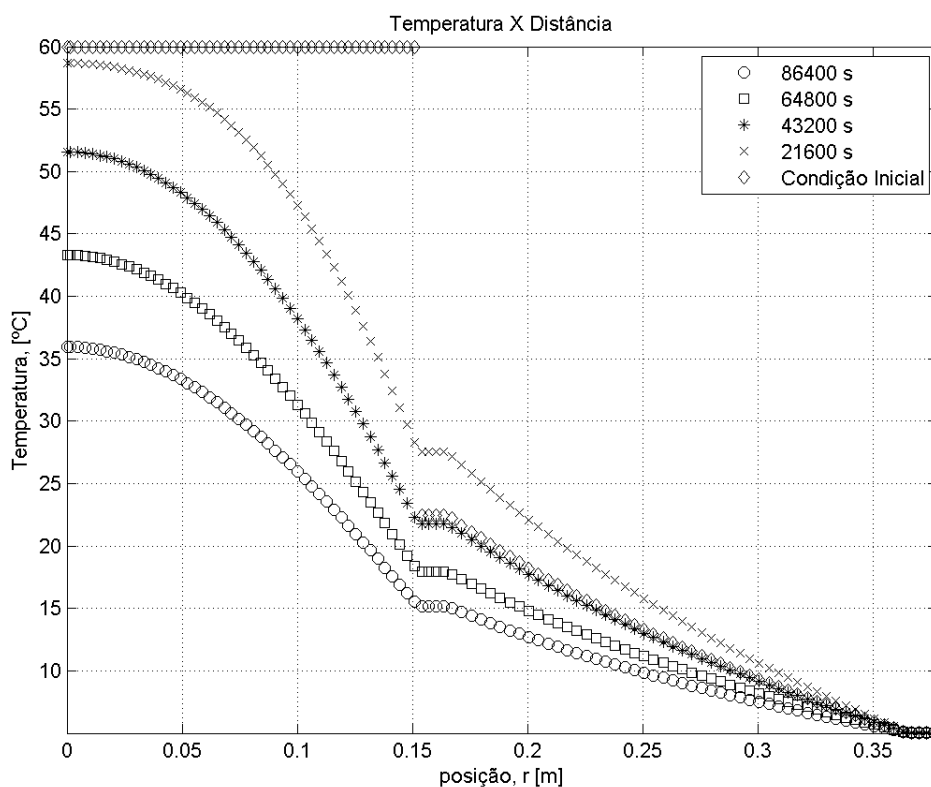
5.3.3 Caso 3.3: Pipe-In-Pipe com Óleo Pesado e Convecção na Fronteira Esquerda – Tempo Total de 24 horas

A solução numérica foi calculada com malha temporal com passo de tempo de 10s, com um tempo total de 24h e agora considerando as propriedades de um óleo pesado. A malha computacional para o óleo foi gerada pela divisão do domínio Lo (raio) em cinquenta volumes de controle iguais. Enquanto que a malha

computacional para o aço foi gerada pela divisão do domínio Laço (comprimento) em seis volumes de controle iguais.

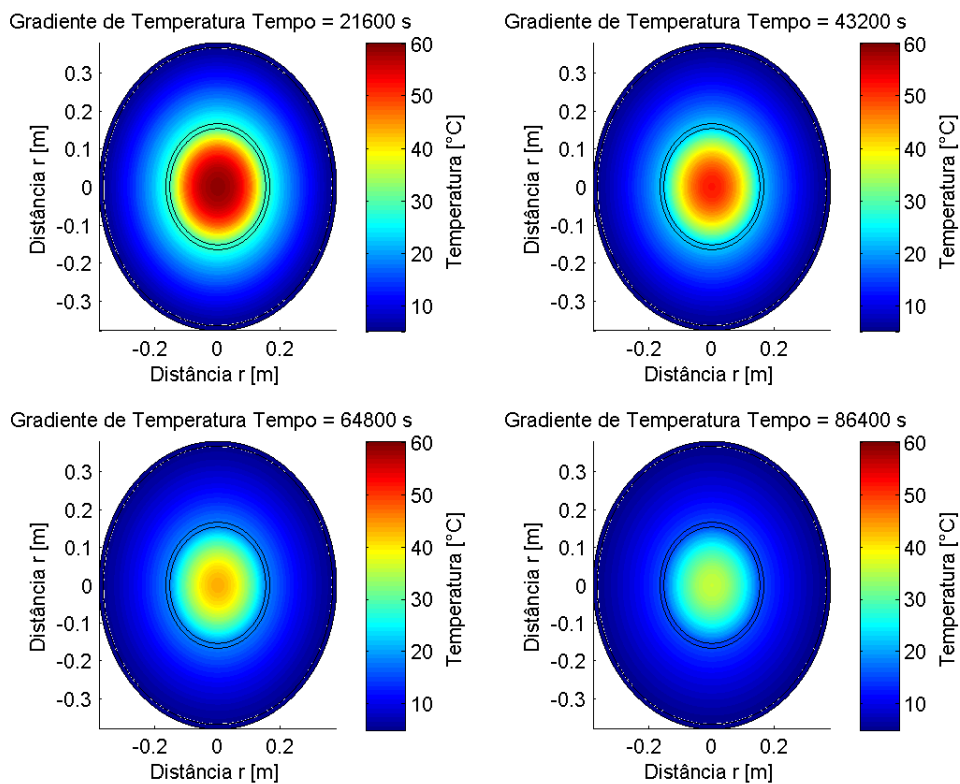
No gráfico 15 pode-se ver a variação da temperatura devido à condução ao longo do raio após 6h, 12h, 18h e 24h, assim com a distribuição de temperatura ao longo do raio nas condições iniciais, nota-se uma diminuição da temperatura ao longo do raio, devido à baixa temperatura do ambiente marinho, e uma diminuição da temperatura em toda a extensão do raio com o passar do tempo. Enquanto que no gráfico 16 a mesma variação pode ser observada numa distribuição do gradiente de temperatura ao longo do raio num corte transversal no duto. A diminuição da temperatura média do óleo devido à troca de calor por condução com a água do mar ao longo de 24h pode ser observada no gráfico 17.

Gráfico 15 – Caso 3.3: Variação da temperatura ao longo do raio em diferentes tempos



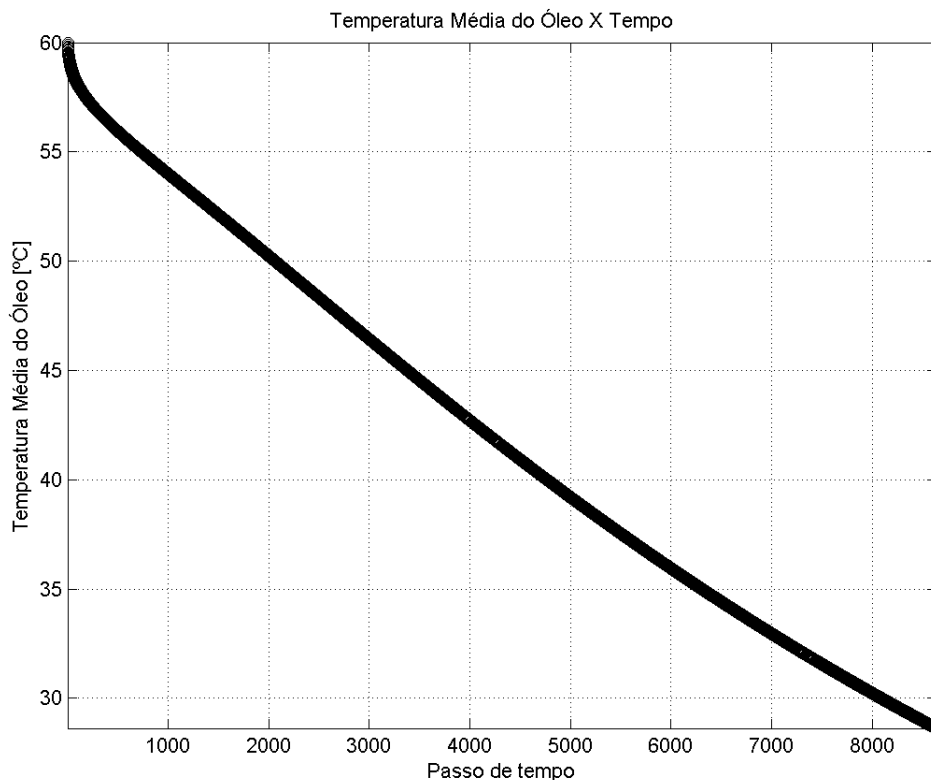
Fonte: Autoria própria

Gráfico 16 – Caso 3.3: Gradiente de temperatura ao longo do raio em diferentes tempos



Fonte: Autoria própria

Gráfico 17 – Caso 3.3: Variação da temperatura média do óleo ao longo de tempo



Fonte: Autoria própria

Analisando-se o resfriamento do óleo e a formação de cristais ao longo do raio, com uma TIAC de 40°C, nota-se, com os resultados apresentados nos gráficos 12, 13 e 14, que a temperatura do óleo, após 24h, possui um valor mínimo de aproximadamente 10°C e máximo de 39°C. Com isso, após esse período de tempo, o óleo contido em toda a extensão do raio está com temperatura abaixo de 40°C e portanto atingiria a TIAC.

6 CONCLUSÃO

De relevância tanto para a indústria atual, que está em constante evolução trazendo problemas cada vez mais complexos, quanto para o meio acadêmico, que possui grande espaço para trabalhos de simulação computacional, este trabalho mostra sua importância para toda a sociedade.

No presente trabalho foi proposto um estudo do resfriamento do óleo em uma tubulação submarina após parada de produção. Neste sentido 3 casos de estudo foram modelados, simulados no MATLAB® e seus resultados analisados.

O primeiro caso (caso 1) visava a validação do problema do ponto de vista matemático, numa situação hipotética em que um tubo maciço troca calor por condução com o ambiente externo, notou-se a efetividade da troca de calor e ao comparar a solução numérica obtida com a solução analítica comprovou-se a convergência da primeira com a solução exata.

Evoluindo para o caso 2, em que o problema considera um duto simples (sem isolamento) contendo óleo estagnado com fronteira com o ambiente marinho. Notou-se claramente a variação da temperatura ao longo do raio do tubo e sua diminuição ao longo do tempo. Comparando-se o caso 2.1 com o caso 2.2 é possível observa-se o quão grande é a influência tempo, uma vez que após 6 horas (caso 2.1) a parte do óleo contido no duto encontrava-se na forma líquida, enquanto que após 24 horas todos óleo havia atingido a TIAC.

O caso 3, que considera o tubo *pipe-in-pipe* (com isolamento) contendo óleo estagnado com fronteira com o ambiente marinho, permite a análise da eficácia do isolante. Ao comparar este caso com o anterior é óbvia a eficiência do isolante, após 6 horas o resultado do caso 2.1 mostrou que apenas o óleo contido entre $0 \leq r \leq 0,08\text{m}$ encontrava-se acima da TIAC, enquanto que no caso 3.1 o óleo compreendido entre $0 \leq r \leq 0,15\text{m}$ estava acima dos 40°C . Após 24 horas o resultado no caso 2.2 apresentou que todo o óleo havia atingido a TIAC e todo ele estava a uma temperatura abaixo de 20°C , enquanto que no caso 3.2 o óleo estava com uma temperatura máxima de 35°C .

Ainda no caso 3, pode-se avaliar a diferença entre o óleo leve e o óleo pesado, com o caso 3.3 onde é considerado o óleo pesado, diferente dos casos

anteriores, a temperatura máxima após 24 horas é de 39°C, com isso temos que o óleo pesado demora mais tempo para resfriar, em comparação com o óleo leve.

Este trabalho alcançou as metas propostas, possibilitando a análise do problema de deposição de parafinas em oleodutos submarinos durante parada de produção sob diferentes situações e pontos de vistas. Com os resultados obtidos e aqui expostos é possível entender a dimensão do problema e tempo necessário para ação em casos reais deste problema.

Em trabalhos futuros o problema aqui analisado pode evoluir ainda mais, com casos de análise considerando diferentes materiais isolantes e espessuras distintas. Além da oportunidade de realização do estudo da troca de calor entre oleodutos e o ambiente marinho durante a produção.

REFERÊNCIAS

AIAA. **Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations**. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 1998.

AIYEJINA, Ararimeh et al. Wax formation in oil pipelines: a critical review. **International Journal of Multiphase Flow** **37**, p.671-694, 2011.

ASKE, Narve. Wax control. **Statoil**, mar. 2011. Disponível em: <<http://www.ipt.ntnu.no/~jsg/undervisning/prosessering/gjester/LysarkAske2011.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2016

BALDOTTO, Husdonil A. **Avaliação da temperatura de início do aparecimento dos cristais (TIAC) e composição do primeiro cristal no fenômeno de precipitação parafínica em petróleos – método simplificado**. 2004. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Macaé, 2004.

BARROS, Evandro V. A matriz energética mundial e a competitividade das nações: bases de uma nova geopolítica. **Engevista**, Niterói (RJ), v. 9, n. 1, p. 47-56, jun. 2007.

BOTNE, Kjetil. K. **Modeling wax deposition release models**. 2001. 38 f. Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, 2011.

BOTT, T. R. Aspects of Crystallization Fouling. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 14, p. 356-360, mai. 1997.

BURGER, E. D. *et al.* Studies of Wax Deposition in the Trans Alaska Pipeline. **Journal of Petroleum Technology**, SPE 8788, p. 1075-1086, jun. 1981.

FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmicas dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Edusp, 2012.

GOLDEMBERG, José; MOREIRA, José R. Política energética no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo (SP), v. 19, n. 55, p. 215-228, dez. 2015.

INCROPERA, Frank P. *et al.* **Fundamentos da Transferência de Calor e Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics**. IEA, 2015. Disponível em: <www.iea.org>. Acesso em: 24 mai. 2016.

KNUDSEN, James G.; KATZ, Donald L. **Fluid Dynamics and Heat Transfer**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1958.

LEIROZ, Andrea T. **Estudo sobre a Deposição de Parafina em Linhas de Petróleo**. 2004. 159 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

LUTHI, Ivana F. **Caracterização reológica de um óleo parafínico e estudo experimental da repartida de uma linha horizontal bloqueada com um óleo parafínico gelificado**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo na área de Exploração, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2013.

MACHADO, André L. C. **Estudo da Influência de Copolímeros de Etileno-Acetato de Vinila (EVA) sobre as Propriedades de Escoamento de Petróleo e na Inibição da Deposição de Parafinas**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1999.

MALISKA, Clovis. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Rio de Janeiro: LTC, 1995.

MCCLAFIN, G. G.; WHITFILL, D. L. Control of Paraffin Deposition in Production Operations. **Journal of Petroleum Engineering**, SPE 12204, p. 1965-1970, nov. 1984.

OLIVEIRA, Alexandre P. **Estudo experimental e modelagem termodinâmica da precipitação de parafinas em sistemas modelos**. 1998. 248 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1998.

OPENLEARN. The ocean, 2018. Disponível em: <<http://www.open.edu/openlearn/ocw/mod/oucontent/view.php?id=20129&printable=1>>. Acesso em 20 jun. 2018.

PATANKAR, Suhas V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. 1. ed. United States of America: CRC Press, 1980.

PROSPECÇÃO e Extração de Petróleo & Gás Natural. Diário do Pré-Sal, 2007. Disponível em: < <https://diariodopresal.wordpress.com/petroleo-e-gas/>>. Acesso em: 15 mai. 2016.

QUEIROZ, Deni L. **Influência da Convecção Natural no Resfriamento de Dutos Submarinos de Petróleo e Gás**. 2007. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

RIBEIRO, Flávio S. *et al.* Obstruction of pipelines due to paraffin deposition during the flow of crude oils. **Journal Heat Mass Transfer**, Great Britain, v. 40, n. 18, p. 4319-4328, fev. 1997.

SARACENO, Alessandra da S. P. **Estudo do Fenômeno de Parafinação a partir de um Óleo Cru**. 2007. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Corpo Docente Do Instituto Alberto Luiz Coimbra De Pós-Graduação e Pesquisa De Engenharia (Coppe), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SINGH, Probjot *et al.* Prediction of the Wax Content of the Incipient Wax-Oil Gel in a Pipeline: An Application of the Controlled-Stress Rheometer. **Journal of Rheology**, 43, p.1437-1459, 1999.

SINGH, Probjot *et al.* Formation and Agind of Incipient Thin Film Wax-Oil Gels. *Aiche Journal*, v. 46, n. 5, mai. 2000.

SOLOMONS, Graham; FRYHLE, Craig B. **Química Orgânica 1**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

SU, Nan-Jay *et al.* LJFL and EFL relationships for the billfishes caught by the Taiwanese offshore and coastal fisheries. **1st Joint Intercessional Meeting of Swordfish and Marlin Working Groups of ISC**. Shimizu, Japan, sep. 2005.

THOMAS, José E. *et al.* **Fundamento de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

VELASQUEZ, Mao. I. R. **Avaliação do Mecanismo de Difusão Molecular para a Modelagem de Deposição de Parafina em Dutos de Petróleo**. 2005. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computacional Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. 2. ed. Loughborough: Pearson, 2007.

WEIGMANN, Paulo R. Um enfoque empreendedor e as implicações que o tema transversal e as práticas interdisciplinares afetam na conservação de energia no CEFET/SC. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA ELÉTRICA. Rio de Janeiro, 2002.

WEISPFENNING, Klaus. Advancements in Paraffin Testing Methodology. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON OILFIELD CHEMISTRY. Houston (Texas): Society of Petroleum Engineers, fev. 2001, p. 13-16.