

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

ANDRÉ MAURÍCIO LIKES KREPCKI

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO DE
PARAFINA EM CAVIDADE CILÍNDRICAS CONTENDO ÓLEO
PARAFÍNICO ESTAGNADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

GUARAPUAVA

2016

ANDRÉ MAURÍCIO LIKES KREPCKI

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO DE
PARAFINA EM CAVIDADE CILÍNDRICAS CONTENDO ÓLEO
PARAFÍNICO ESTAGNADO**

Trabalho de Conclusão de Curso 2
apresentada como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharelado em
Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof. Dra. Raquel Da
Cunha Ribeiro Da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. André Damiani
Rocha

GUARAPUAVA

2016



TERMO DE APROVAÇÃO

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE DEPOSIÇÃO DE PARAFINA EM CAVIDADE CILÍNDRICAS CONTENDO ÓLEO PARAFÍNICO ESTAGNADO

por

André Maurício Likes Krepcki

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 01 de Dezembro de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Dra. Raquel da Cunha Ribeiro da Silva
Prof.(a) Orientador(a)

Prof. Msc. Paul Delgado
Membro titular

Prof. Msc. Renan Manozzo Galante
Membro titular

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço o apoio de toda a minha família, principalmente a minha mãe e irmão, Jussara e Bruno.

Agradeço a disponibilidade dos meus orientadores, Dra. Raquel Da Cunha Ribeiro Da Silva e Dr. André Damiani Rocha e pelo total apoio e ajuda neste trabalho.

Este agradecimento estende-se a todos os professores que fizeram parte da minha formação acadêmica.

RESUMO

A deposição de parafina em tubulações submarinas é um dos principais problemas que afeta a produção e a operação de sucção de petróleo, devido à troca de calor entre o óleo, tubulação e a água do mar. Com o decréscimo da temperatura ao longo do tempo, a solução começa apresentar pequenos cristais de parafina, onde deposita-se na parede das tubulações obstruindo o fluxo do fluido e conseqüentemente diminuindo seu diâmetro, acarretando um aumento de potência e custos operacionais às empresas petrolíferas. O presente trabalho visa analisar a distribuição de temperatura em um óleo parafínico considerando uma condição onde há uma parada da linha de produção. A geometria analisada é de formato cilíndrico e considera-se todas as propriedades termofísicas constantes e comprimento unitário. Para a obtenção dos resultados, realiza-se uma análise numérica através da utilização do método dos volumes finitos. Para a validação dos códigos os resultados foram comparados com trabalhos encontrados na literatura. O trabalho é de grande importância pois se insere na linha de pesquisa de Avaliação de Modelos de Deposição de Parafina, visando a redução dos custos envolvidos para sua retirada.

Palavra-chave

Método dos Volumes Finitos, Análise Numérica, Temperatura

ABSTRACT

The paraffin deposition in subsea pipelines is one of the main problems affecting the production and the oil suction operation, due to heat exchange between the oil pipe and seawater. With decreasing temperature over time, the solution begins to present small wax crystals, which deposits on the wall of the pipe obstructing the fluid flow and consequently reducing its diameter, resulting in an increase of power and operating costs oil companies. This study aims to analyze the temperature distribution a paraffinic oil considering a condition where there is a production line stopped. The analyzed geometry is cylindrical in shape and considered all the constant thermophysical properties and length unit. To obtain the results, carried out a numerical analysis using the finite volume method. For the validation of codes the results were compared to studies in the literature. The work is of great importance because it is within the line of Deposition Models Evaluation research Paraffin, aimed at reducing the costs involved in its removal.

Keywords

Finite Volume Method, Numerical Analysis, Temperature

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Esquema.....	32
Tabela 2 - Coeficientes dos pontos internos (2,...,N-1)	32
Tabela 3 - Coeficientes do ponto (1) da fronteira	33
Tabela 4 - Coeficientes do ponto (N) da fronteira.....	34
Tabela 5 – Dados de entrada para o programa (óleo leve)	36
Tabela 6 - Dados de comparação (óleo pesado)	36
Tabela 7 - Parâmetros da parede da tubulação	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tubulação afetada pela parafina.....	16
Figura 2 - Seção do tubo real	22
Figura 3 - Esquema dos métodos implícitos e explícitos (Poli USP).....	27
Figura 4 - Volume de controle em coordenadas cilíndricas	29
Figura 5 - Esquema para análise nodal (vista superior)	30
Figura 6 - Perfil de temperatura óleo leve	37
Figura 7 - Perfil de temperatura óleo pesado.....	37
Figura 8 - Perfil de temperatura óleo leve após balanço de energia	39

LISTA DE SÍMBOLOS

TIAC	Temperatura Instantânea de Aparecimento de Cristais
MVF	Método dos Volumes Finitos
EDP'S	Equações Diferenciais Parciais
k	Condutividade Térmica
C_p	Calor Específico
ρ	Massa Específica
T	Temperatura
v_r	Velocidade na direção radial
v_θ	Velocidade na direção angular
v_z	Velocidade na direção z
r	Raio
$\mu\Phi$	Dissipação Viscosa e Energia Mecânica
Δr	Espaçamento entre pontos da interface
s	Sul
n	Norte
N	Número N de pontos para representação da malha
TDMA	Tridiagonal Matrix Algorithm
CFD	Computational Fluid Dynamics
A_p	Coeficiente no ponto atual
A_s	Coeficiente no ponto sul
A_n	Coeficiente no ponto norte
A_p^o	Coeficiente no ponto anterior
Y_p^0	Variável qualquer em um tempo anterior ao atual
Y_p	Variável qualquer no tempo atual

S_u	Termo fonte
S_p	Termo fonte atual
Δt	Passo de tempo
θ	Parâmetro em relação ao explícito e implícito
r_p	Posição do raio do nó em relação ao ponto P
r_s	Posição da interface do volume de controle (sul)
r_n	Posição da interface do volume de controle (norte)
r_{sup}	Posição do raio do nó em relação ao ponto P (superfície)
R_{iso}	Raio do isolante
$R_{aço}$	Raio do aço
R_{in}	Raio interno da tubulação
h_{∞}	Coefficiente de transferência de calor na vizinhança
h_{in}	Coefficiente de transferência de calor interno
T_{in}	Temperatura Inicial
k_{iso}	Condutividade Térmica do Isolante
$k_{aço}$	Condutividade Térmica do Aço
T_m	Temperatura de Mistura
T_{sup}	Temperatura na Superfície da Tubulação
$T_{aço}$	Temperatura do aço
T_{iso}	Temperatura do Isolante
Nu	Nusselt
D	Diâmetro Interno da Tubulação
Re	Número de Reynolds
Pr	Número de Prandtl

\dot{m}	Vazão Mássica
Bi_{in}	Número de Biot Interno
Bi_{∞}	Número de Biot da Vizinhança
$e_{aço}$	Espessura do Aço
e_{iso}	Espessura do Isolante
V_{∞}	Velocidade da Corrente Marítima

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS	16
1.2. JUSTIFICATIVA	17
1.3. PROBLEMAS E PREMISSAS.....	17
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. CARACTERÍSTICA DA PARAFINA	19
2.2. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS	20
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	22
3.1. MODELAGEM MATEMÁTICA	22
3.1.1. Balanço de energia na tubulação	23
3.1.2. Equação da conservação da energia	26
4. SOLUÇÃO NUMÉRICA	27
4.1. MÉTODO EXPLÍCITO E IMPLÍCITO.....	27
4.2. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS EM COORDENADAS CILINDRICAS ..	29
4.2.1. Pontos internos	31
4.2.2. Pontos das fronteiras	32
5. RESULTADOS.....	36
5.1. PERFIL DE TEMPERATURA EM RELAÇÃO A TIAC.....	36
5.2. PERFIL DE TEMPERATURA APÓS BALANÇO DE ENERGIA.....	38
6. CONCLUSÃO	40
7. REFERÊNCIAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

O setor petrolífero é considerado o maior setor industrial existente, sendo uma potência global que disponibiliza centenas de milhares de empregos no mundo todo, bem como gerando centenas de bilhões de dólares a cada ano em todos os continentes, se tornando uma fonte essencial para a contribuição ao produto interno bruto de uma nação. O objetivo econômico principal no refino do petróleo, é maximizar o valor acrescentado na conversão de óleo bruto em produtos acabados. Destes, os combustíveis de transporte têm o valor mais elevado, óleos combustíveis e asfalto o valor mais baixo, muitos produtos refinados, como gasolina, são produzidos em vários graus de composição de hidrocarbonetos, para atender diferentes especificações e normas.

O petróleo, ainda é a matéria-prima para uma infinidade de produtos químicos, incluindo farmacêuticos, fertilizantes, solventes, plásticos e não somente para a obtenção de combustíveis, portanto é essencial para muitas indústrias que compõem a economia de um país. Porém, existe uma grande complexidade devido às características dos óleos crus provenientes de diferentes reservatórios e a alto custo de operação para sua extração.

Com o fornecimento de energia se esgotando cada vez mais, as indústrias estão sendo forçadas a olhar para uma conversão da fração mais pesada do petróleo, para atender à crescente demanda de energia ao redor do mundo, estas frações mais pesadas de óleo, no entanto, contém uma concentração significativa de parafinas, bem como inúmeras outras macromoléculas que necessitam de tratamento antes de ir para o mercado. Estas macromoléculas de petróleo têm a capacidade de causar graves estragos durante a produção, caso não sejam tratadas.

Segundo Luthi I.F. (2013) cada tipo de petróleo é constituído por uma mistura complexa de diferentes hidrocarbonetos podendo conter também quantidades pequenas de nitrogênio, oxigênio, compostos de enxofre e íons metálicos, o que acarreta uma difícil separação dos componentes existente na solução, sendo praticamente impossível de se obter uma separação completa

de todos os componentes. Assim, o petróleo é normalmente separado em classes de acordo com a faixa de ebulição dos compostos entre elas estão as:

- Merey: petróleo na sua forma bruta (sem refinamento)
- Light: petróleo leve, sem impurezas (refinado)
- Naftênico: petróleo com grande quantidade de hidrocarbonetos naftênicos.
- Parafínico (Albacora): petróleo com grande concentração de hidrocarbonetos parafínicos.
- Aromático: petróleo com grande concentração de hidrocarbonetos aromáticos.

(Thomas et al., 2001).

Dentre as divisões das classes que compõe o petróleo pode-se destacar a classe das parafinas que será estudado neste presente trabalho.

Óleos parafínicos são normalmente encontrados em várias partes do mundo. No entanto, devido às condições de temperatura e pressão dos reservatórios onde o óleo está armazenado, as parafinas existentes encontram-se solubilizadas ao óleo cru.

Porém quando ocorre a extração e transporte do petróleo, as condições de temperatura e pressão se alteram ao decorrer do tempo e distâncias percorridas em lamina da água (lamina=metros). Essas regiões são conhecidas como *offshore*, que seria a produção de petróleo longe da costa, podendo estar em contato com temperaturas tão baixas quanto 5°C, causando assim uma diminuição na solubilidade das frações das parafinas. Isso facilita a deposição das mesmas nas paredes internas da tubulação, reduzindo a capacidade de escoamento do fluido.

Em casos extremos a deposição afeta radicalmente o diâmetro do tubo bloqueando totalmente o escoamento, como mostra a Figura 1. O mesmo ocorre nos campos de produção terrestre conhecido como *onshore*, porém estes não são afetados por temperaturas tão baixas.

Pode-se dizer, no transporte de óleo parafínico, o processo de deposição depende principalmente do campo de temperatura da parafina no óleo. O processo de deposição de parafina somente ocorre para temperaturas inferiores ao ponto de névoa. Logo, a deposição só ocorre, se a temperatura da interface parafina-óleo for inferior à temperatura de névoa ou TIAC (Temperatura Instantânea de Aparecimento de Cristais).

Situações mais drásticas são relatadas quando ocorre paradas de produção, fase conhecida como *shutdown*, tanto por razões operacionais ou emergenciais, pois o óleo parafínico, em uma condição estática, pode ser resfriado abaixo do seu ponto de fluidez, formando uma estrutura gelificada, composta por cristais de parafina depositados em uma matriz viscosa, a qual bloqueia a linha de produção (Luthi I.F., 2013).

Na condição de *shutdown*, onde não há escoamento do óleo, o processo de deposição de parafina depende apenas do campo de temperatura e da concentração da parafina no óleo. Mas a principal análise se dá pelo perfil de temperatura real do problema da deposição e posteriormente a análise da concentração se torna viável.

O custo para a prevenção e remoção de depósitos de parafina são substanciais. Estudos da década de 90 mostraram que este custo representa cerca de 0,25% do PIB global (Mokhatab S, Towler B. 2009). Esses números têm aumentado desde então.

Devido à importância do problema da deposição de parafina para a indústria do petróleo, existe um significativo número de publicações que investiga este fenômeno (Burger et al., 1981; Brown et al., 1993; Azevedo e Teixeira, 2003; Baldotto, 2004). A maioria dos modelos disponíveis faz uso de constantes empíricas e fatores de correção que torna o modelo específico para um caso em particular. Estes modelos são utilizados por muitas companhias operadoras, que utilizam ferramentas de simulação para prever a percentagem da deposição de parafinas na tubulação. Estes modelos são ainda empregados no projeto de novas estações de transporte de óleo, onde o conhecimento da

probabilidade de ocorrência de deposição de parafinas é de fundamental importância, influenciando nas especificações da tubulação e o custo da futura instalação.

Uma avaliação mais rigorosa de deposição da parafina requer a utilização de modelos mais precisos, formulados a partir de equações básicas que regem os fenômenos de transferência de calor e de massa.

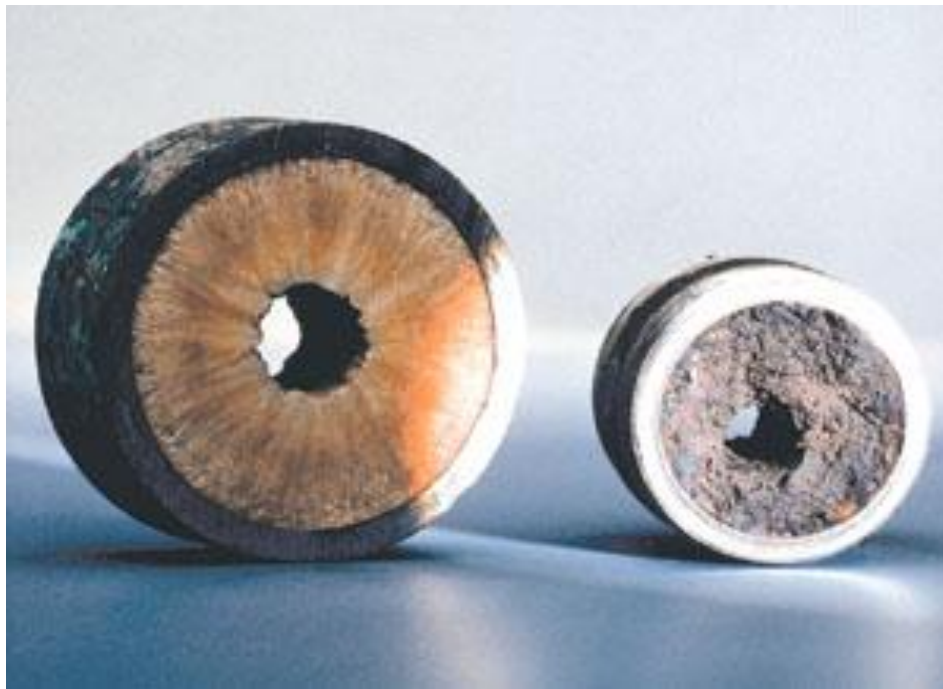


Figura 1 - Tubulação afetada pela parafina

Fonte: Offshore Magazine (cortesia: empresa Halliburton)

1.1. OBJETIVOS

O presente trabalho possui como objetivo entender como a distribuição de temperatura se comporta em um óleo parafínico (leve) estagnado no interior de uma tubulação de transporte de petróleo, considerando uma condição de *shutdown* da linha de produção, onde será comparado com um óleo dito pesado que tem dados experimentais na literatura.

Pretende-se realizar uma análise numérica através da discretização da equação da energia em coordenadas cilíndricas, utilizando o Método dos

Volumes Finitos (MVF), implementar o código em uma linguagem computacional, obter o perfil de temperatura com todas as propriedades termofísicas reais e validar os mesmos através de resultados existentes na literatura.

1.2. JUSTIFICATIVA

A crescente demanda de energia mantém o petróleo como uma importante fonte energética mundial, aumentando dessa forma a sua exploração, com o advento da tecnologia de perfuração e o aumento no consumo, tem-se a exploração em oceanos, buscando cada vez maiores profundidades em busca de petróleo, na exploração *offshore*. Devido a esta característica de produção em águas cada vez mais profundas, a indústria do petróleo tem se deparado com um grande desafio de garantia de escoamento destes fluidos.

O interesse de estudar a distribuição da temperatura dentro da tubulação é de grande importância, pois a demanda em melhor compreender como o tempo de parada de produção, afeta a obstrução da tubulação devido à deposição de cristais no interior da tubulação. Consequentemente com a validação do código, a distribuição de temperatura pode ser utilizada para estudos futuros, sobre os mecanismos responsáveis pela deposição de parafina nas tubulações de petróleo.

1.3. PROBLEMAS E PREMISSAS

A deposição de parafina dentro das linhas de transporte pode levar à perda da produção, incremento da potência de bombeamento, aumento dos custos de remediação e adicionalmente pode levar à perda da tubulação, quando esta é totalmente bloqueada, gerando a necessidade de procedimentos preventivos periódicos de limpeza, de forma a prevenir a necessidade de uma eventual substituição de seções da tubulação. Portanto, este é um problema crítico na indústria do petróleo, pois possui alto risco de perda de capital.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre a característica da parafina e método dos volumes finitos usado para a implementação deste trabalho. No capítulo 3 é apresentada a modelagem matemática sobre o problema estudado. No capítulo 4 contempla a solução numérica e o método numérico utilizado e no capítulo 5 é apresentado os resultados obtidos no estudo do caso. No capítulo 6 apresenta-se a conclusão do mesmo. No capítulo 7 temos as respectivas referências usadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica relacionada à característica da parafina e método de volumes finitos.

2.1. CARACTERÍSTICA DA PARAFINA

As parafinas são obtidas pela retirada de petróleo em alto mar, produção em terra e quando não há óleo escoando nas tubulações, etapa conhecida como *shutdown*, são compostas por uma longa cadeia de hidrocarbonetos saturados com um alto peso molecular onde estão sujeitas a altas temperaturas e pressões.

A medida em que o petróleo é retirado através de dutos submarinos, *offshore*, sob as condições de alta temperatura e pressão, tende-se a ser afetado termodinamicamente, o petróleo é afetado com a redução de temperatura, pressão e de hidrocarbonetos leves que solubilizam os hidrocarbonetos mais pesados, ocasionado pela diminuição da temperatura (solubilidade da parafina decresce drasticamente).

Assim ocorrendo a formação de pequenos cristais parafínicos onde posteriormente a deposição dos cristais que saem da solução. A temperatura onde ocorre o início da formação de cristais é também chamada de temperatura de névoa ou TIAC.

O fenômeno de formação de depósitos parafínicos é comum na indústria de petróleo e estão associados ao equilíbrio de fases dos compostos hidrocarbônicos e às condições fluidodinâmicas de escoamento, respectivamente. O aparecimento de uma fase sólida no petróleo e a subsequente deposição de parafina se manifesta devido à quebra deste equilíbrio, provocada pelo resfriamento do petróleo e/ou o desprendimento das frações mais leves, originalmente dissolvidas neste petróleo (Mello et al, 2006).

Segundo Thomas (2001), a parafina possui seus átomos de carbono organizados em cadeias abertas, formada por ligações simples, podendo ser cadeias normais ou ramificadas.

O controle dessas macromoléculas é um desafio constante para os engenheiros. Ao longo do tempo, os depósitos dos pequenos cristais parafínicos começam a incrustar-se na superfície interna dos tubos, reduzindo o seu diâmetro, fluxo e o rendimento global de toda a operação de extração, assim há um aumento na perda de carga e conseqüentemente um aumento de custos às empresas petrolíferas, podendo danificar permanentemente as linhas de escoamento.

2.2. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

A simulação numérica para solução de problemas de engenharia tem sido empregada de forma crescente pelas indústrias das mais diversas áreas: petróleo, análises estruturais, automotiva, aeronáutica, entre outras, visando a otimização de tempo e aumentando a precisão em projetos complexos, contribuindo positivamente para as tomadas de decisões, diminuição dos altos custos em equipamentos para experimentos em laboratório e rapidez em processos industriais.

Segundo (Maliska, 2004) a solução de problemas de engenharia envolvendo escoamento de fluidos requer a solução de um conjunto de equações diferenciais parciais não lineares acopladas, que expressam a conservação de massa, conservação de quantidade de movimento e conservação de energia.

O método de volumes finitos (MVF) é que resolve numericamente problemas como deformação de materiais, mecânica dos fluidos, transferência de calor e de massa, o qual, associado a uma discretização de equações diferenciais, dá-se uma geometria com malhas coincidentes com a fronteira do domínio.

O domínio de cálculo do MVF é subdividido em um número n de volumes de controle. Neste ponto de vista, cada volume é finito, representado por uma linha em 1D, uma área em 2D e um volume em 3D.

As equações governantes são discretizadas de acordo com as hipóteses relacionadas ao problema. Assim representa-se a conservação das mesmas em forma de integral através de cada volume de controle da malha. Uma das principais características do método dos volumes finitos é a simplicidade da integração das EDP'S (Equações Diferenciais Parciais) e também pode-se ressaltar a facilidade de uma análise física das equações. A equação discretizada pelo método dos volumes finitos é simplesmente a representação finita da equação diferencial.

No método de discretização de volumes finitos tem aparecido diversos tipos de arranjo das malhas, sendo os mais conhecidos as malhas deslocadas e as malhas co-localizadas, e recentemente tem-se desenvolvido o método de elementos finitos baseados no método de volume de controle. Os esquemas de interpolação existentes na literatura são abundantes (Upwind, Híbrido, Power Law, Quick, etc), todos eles com objetivo de obter uma maior precisão e estabilidade da solução numérica que dependem dos tipos de condições de contorno (Maliska, 2004).

Os principais passos que devem ser realizados para o desenvolvimento e implementação de esquemas numéricos para solução de problemas de escoamento de fluidos incompressíveis são:

- Condições de contorno;
- A escolha adequada da localização das variáveis dependentes na malha;
- As equações governantes são integradas em cada volume de controle, resultando em um sistema de equações constituídos pelas variáveis localizadas na face dos volumes de controle;
- A obtenção da função de interpolação pois as variáveis localizadas na face dos volumes de controle não são conhecidas;
- O sistema algébrico ou diferencial resultante é resolvido através de uma escolha de um método numérico apropriado.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo será apresentada a equação da conservação da energia em coordenadas cilíndricas e a sua modelagem matemática.

3.1. MODELAGEM MATEMÁTICA

Considera-se a forma geométrica mostrada na Figura (2) sendo descrita como uma cavidade cilíndrica de comprimento unitário com espessura do aço $e_{aço}$ e espessura do isolante e_{iso} .

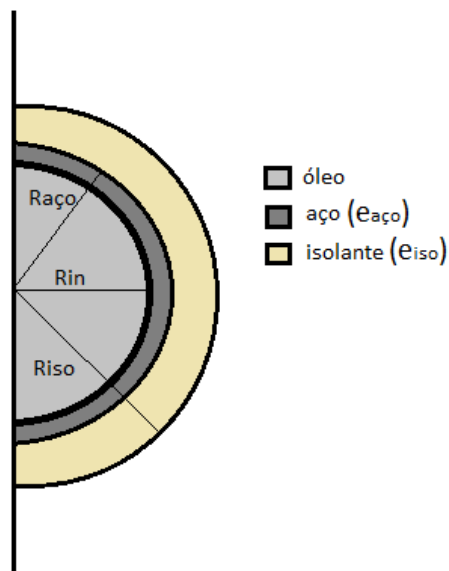


Figura 2 - Seção do tubo real

Fonte: autoria própria

Para modelar matematicamente as equações e assume-se as seguintes hipóteses:

- Assume-se que a condutividade térmica k , o calor específico c_p , massa específica ρ , viscosidade absoluta μ , constantes;
- Modelo unidimensional na direção radial;

- Considera-se fluido (petróleo) estagnado dentro da cavidade
- Dissipação viscosa desprezível
- Coeficiente externo de transferência de calor uniforme, h_{∞}
- Radiação desprezada (temperaturas baixas)
- Geração de calor nula

3.1.1. Balanço de energia na tubulação

Segundo Queiroz (2007) tem-se um balanço de energia geral realizado entre a tubulação que está no fundo do oceano, onde analisa-se o fluido que está sendo sugado do reservatório, espessura do aço e a espessura do isolante térmico, como visto na Figura 2, apresenta-se uma hipótese que a produção parou (*shutdown*), assim considera-se a situação de escoamento em regime permanente, hidrodinamicamente e termicamente desenvolvido.

As condições de contornos consideradas, supondo uma continuidade dos fluxos entre cada material (Queiroz,2007)

$$\bullet \quad r = R_{iso} \quad \text{tem-se} \quad -k_{iso} \frac{dT}{dr} = h_{\infty} (T - T_{\infty}) \quad (1)$$

$$\bullet \quad r = R_{aço} \quad \text{tem-se} \quad -k_{aço} \frac{dT}{dr} = -k_{iso} \frac{dT}{dr} \quad (2)$$

$$\bullet \quad r = R_{in} \quad \text{tem-se} \quad -k \frac{dT}{dr} = -k_{aço} \frac{dT}{dr} \quad (3)$$

onde os subscritos iso, aço e in, indicam isolante, aço e interno.

Para a região do fluido (in) especificou-se uma temperatura inicial aproximada, uniforme, igual à temperatura de mistura $T_{in} = T_m = 60^{\circ}C$, que é a temperatura do óleo na saída do reservatório e entrando na tubulação, para ser transportado as bases de exploração no nível do mar (Barrera, J. J,2005). Já para as camadas das paredes, especificou-se o perfil de temperatura, através da solução da equação de condução de calor presente na literatura.

$$T_{aço} = C_1 \ln(r) + C_2 \quad (4)$$

$$T_{iso} = C_3 \ln(r) + C_4 \quad (5)$$

As constantes C_1 a C_4 podem ser obtidas, considerando a continuidade da temperatura na interface aço-isolante, $T_{aço} = T_{iso}$ e aplica-se as condições de contornos (1) e (2), juntamente com a equação da interface entre o fluido e o aço.

$$\bullet \quad r = R_{in} \quad \text{tem-se} \quad h_{in}(T_m - T_{sup}) = -k_{aço} \frac{dT}{dr} \quad (6)$$

Onde o h_{in} é o coeficiente de transferência de calor interno ao interior da tubulação e T_{sup} é a temperatura na superfície do duto. Portanto, através da literatura, as constantes resultantes são:

$$C_1 = \frac{T_\infty - T_{in}}{\frac{k_{aço}}{k_{iso}} \left(\frac{1}{Bi_\infty} + \ln \frac{R_{iso}}{R_{in}} \right) + \frac{1}{Bi_\infty} + \ln \frac{R_{aço}}{R_{in}} \left(1 - \frac{k_{aço}}{k_{iso}} \right)} \quad (7)$$

$$C_2 = T_{in} - C_1 \left[\ln(R_{in}) - \frac{1}{Bi_{in}} \right] \quad (8)$$

$$C_3 = \frac{k_{aço}}{k_{iso}} C_1 \quad (9)$$

$$C_4 = C_1 \left(1 - \frac{k_{aço}}{k_{iso}} \right) \ln(R_{aço}) + C_2 \quad (10)$$

Sendo que os números de Biot internos e da vizinhança são iguais a:

$$Bi_{in} = \frac{h_{in} R_{in}}{k_{aço}} \quad (11)$$

$$Bi_{\infty} = \frac{h_{\infty} R_{iso}}{k_{iso}} \quad (12)$$

O coeficiente de transferência de calor interno h_{in} , igual ao coeficiente de convecção natural é calculado através de Nusselt (Incropera, 2011):

$$Nu_{in} = \frac{h_{in} D}{k} \quad (13)$$

onde $D = 2R_{in}$ é o diâmetro interno do duto e o número de Nusselt, depende do número de Reynolds Re e do número de Prandtl Pr (Incropera, 2011):

$$Re_{in} = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (14)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (15)$$

onde \dot{m} é a vazão mássica no interior da tubulação.

O número de Nusselt foi especificado correspondendo a condição de contorno de temperatura constante na parede e considera-se regime laminar $Re < 2300$ (Incropera, 2011).

$$Nu_{in} = 3,66 \quad (16)$$

o h_{∞} é calculado através da correlação existente na literatura, para um duto submerso em águas profundas (Knudsen e Kates, 1958).

$$Nu_{\infty} = \frac{h_{\infty} D_e}{k_{\infty}} \quad (17)$$

$$Nu_{\infty} = 0,0266 Pr_{\infty}^{\frac{1}{3}} Re_{\infty}^{0,805} \quad (18)$$

onde o número de Reynolds e Prandtl para a vizinhança são:

$$\text{Re}_\infty = \frac{\rho_\infty V_\infty D_e}{\mu_\infty} \quad (19)$$

$$\text{Pr}_\infty = 8,81 \quad (20)$$

sendo ρ_∞, k_∞ e μ_∞ , a massa específica, condutividade térmica e a viscosidade absoluta da vizinhança. V_∞ é a velocidade da corrente marítima e D_e é o diâmetro externo do duto com as respectivas espessuras do aço e isolante, $D_e = 2(R_{in} + e_{aço} + e_{iso})$.

3.1.2. Equação da conservação da energia

A equação governante da conservação da energia encontrada na literatura (Bird,2002):

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \mu \Phi \quad (21)$$

Aplicando-se as hipóteses relacionadas no tópico 3.1 na equação (21) torna-se:

- Equação da conservação da energia, após aplicações das hipóteses:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(\alpha r \frac{dT}{dr} \right) = \frac{dT}{dt} \quad (22)$$

Onde $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$

Assim, a equação 22 será discretizada utilizando o método dos volumes finitos para obtenção de coeficientes que serão implementados em linguagem C, para obter o perfil de temperatura proposto no trabalho.

4. SOLUÇÃO NUMÉRICA

Neste capítulo será apresentada o método numérico utilizado para obter o perfil de temperatura em um duto de petróleo.

4.1. MÉTODO EXPLÍCITO E IMPLÍCITO

As soluções numéricas são muitas vezes referidas como sendo explícita ou implícita para a obtenção de soluções dependentes do tempo, de equações diferenciais ordinárias e parciais.

Quando calcula-se diretamente as variáveis dependentes através de uma quantidade de termos conhecidos, ou seja, dada as condições iniciais e analisando os resultados em um passo de tempo anterior, o cálculo é dito como explícito. Quando as variáveis dependentes são definidas por um conjunto de equações acopladas, e uma matriz ou técnica iterativa é necessária para obter a solução aproximada do problema, método dito como implícito. Pois em dinâmica de fluidos computacionais, as equações que regem são não-lineares, assim o número de variáveis desconhecidas é muito grande.

As iterações são utilizadas para a solução avançar através de uma sequência de passos de um estado inicial a um final, até a convergência do resultado.

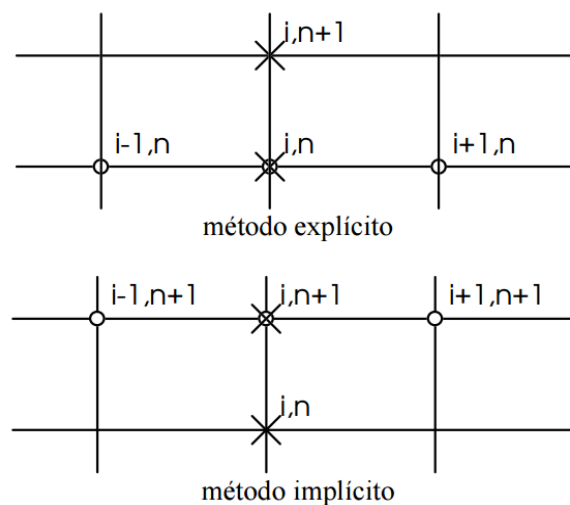


Figura 3 - Esquema dos métodos implícitos e explícitos (Poli USP)

Para obter a equação das discretizações, depende-se do valor de θ :

$$I_T = \int_t^{t+\Delta t} T_P dt = [\theta Y_P + (1 - \theta)Y_P^0]\Delta t \quad (23)$$

onde Y_P , pode ser qualquer variável que está sendo estudada no ponto atual, como neste trabalho.

Portanto, o esquema explícito tem-se $\theta = 0$, resultando em uma equação da forma:

$$I_T = Y_P^0 \Delta t \quad (24)$$

$$A_P Y_P = A_S Y_S^0 + A_n Y_n^0 + [A_P^0 - (A_S + A_n)]Y_P^0 + Su \quad (25)$$

$$A_P = A_P^0 \quad (26)$$

E para o esquema implícito tem-se $\theta = 1$ resultando em uma equação da forma:

$$I_T = Y_P \Delta t \quad (27)$$

$$A_P Y_P = A_S Y_S + A_n Y_n + A_P^0 Y_P^0 + Su \quad (28)$$

$$A_P = A_P^0 + A_S + A_n - Sp \quad (29)$$

Onde A_P, A_S, A_n, Su e Sp são coeficientes resultantes da discretização da equação governante pelo método dos volumes finitos.

Ambos métodos como o explícito e implícito, são tradicionais quando se trata em resoluções de problemas numéricos, o explícito estabelece um limite máximo para o tamanho de passo de tempo, onde o esquema se torna eficiente para o cálculo de problemas com condução simples, mas não muito apropriado para problemas transientes (Versteeg H.K., Malalasekera W.,1995).

O implícito é estável para qualquer passo de tempo em seu domínio, contornando o problema de passo que o método explícito demonstra. Com a utilização do implícito, optou-se por utilizar TDMA (Tridiagonal Matrix Algorithm)

método direto para problemas unidimensionais, mas pode ser aplicado para n-dimensões, e o algoritmo de Thomas, como também é conhecido, é amplamente utilizado em CFD (Computational Fluid Dynamics).

O TDMA é a forma simplificada de eliminação gaussiana que pode ser usada para resolver o sistema de equações tridiagonal da forma (Paulunimuenster,1996):

$$a_i x_{i-1} + b_i x_i + c_i x_{i+1} = y_i \quad i = 1, \dots, n \quad (30)$$

ou pode-se considerar na forma matricial:

$$\begin{pmatrix} b_1 & c_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & a_3 & b_3 & c_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & c_{n-1} & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & a_n & b_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{pmatrix} \quad (31)$$

4.2. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS EM COORDENADAS CILÍNDRICAS

A equação governante (22) será discretizada através do método dos volumes finitos, consiste em dividir o domínio em uma quantidade n de volumes de controle e aplicar a equação discretizada resultante em cada um dos volumes.

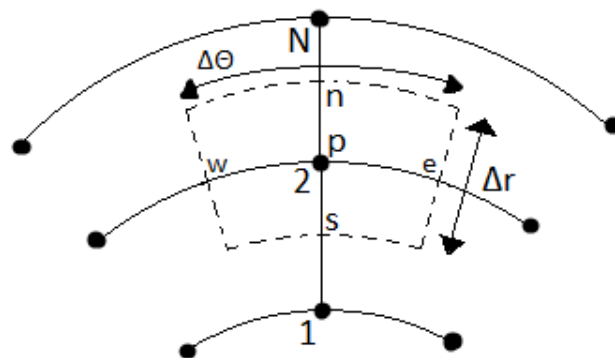


Figura 4 - Volume de controle em coordenadas cilíndricas

Fonte: autoria própria

A Figura 4 é a forma que será analisada a discretização, onde considera-se um ponto p e suas fronteiras n e s, onde respectivamente são norte e sul.

A análise da temperatura será feita em uma tubulação onde considerada sem espessura e sem isolamento, pode-se dizer, um duto maciço, onde só analisa-se o fluido em questão, o óleo está saindo do reservatório subterrâneo a uma temperatura T_{in} uniforme e para o tempo superior a zero, é imposta uma temperatura superficial T_{sup} menor que a temperatura T_{in} ($T_{sup} < T_{in}$). As espessuras mencionadas no tópico 3.1.1 é somente para a obtenção da temperatura de superfície real T_{sup} .

Com relação de simetria demonstrada na Figura (5), no ponto 1 temos $r=0$ e no ponto N tem-se $r=R$, portanto as condições iniciais e de contorno são:

$$T = \begin{cases} T_{sup}, & r = R \\ T_{in}, & 0 \leq r < R \end{cases} \quad (32)$$

$$T(r, t) = T_{sup}; \quad r = R; \quad t > 0 \quad (33)$$

$$dT/dr = 0; \quad r = 0; \quad t > 0 \quad (34)$$

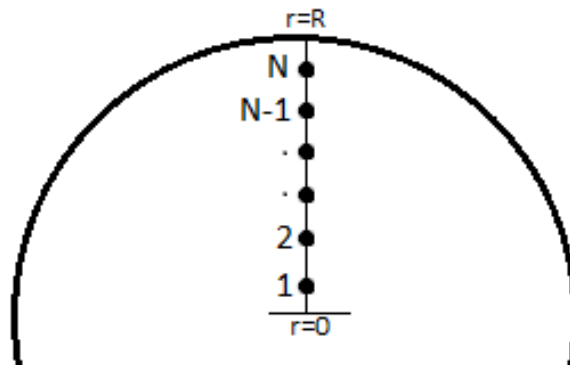


Figura 5 - Esquema para análise nodal (vista superior)

Fonte: autoria própria

A Figura 5 mostra como será analisado a discretização em pontos nodais. A discretização da equação através do método dos volumes finitos tende ser analisada em duas formas, pontos internos e pontos das fronteiras.

4.2.1. Pontos internos

Para a equação da energia, equação (22), a discretização é realizada em relação aos pontos internos (2,...,N-1) mostrados na Figura 5.

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{cv} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(\alpha r \frac{dT}{dr} \right) dV dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{cv} \frac{dT}{dt} dV dt \quad (35)$$

Onde tem-se que $dV = r dr d\theta$, e portanto tem-se:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{r_s}^{r_n} \int_{\theta_w}^{\theta_e} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(\alpha r \frac{dT}{dr} \right) r d\theta dr dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{r_s}^{r_n} \int_{\theta_w}^{\theta_e} \frac{dT}{dt} r d\theta dr dt \quad (36)$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{r_s}^{r_n} \int_{\theta_w}^{\theta_e} \frac{dT}{dt} r d\theta dr dt = r_p \Delta_r \Delta_\theta (T_P - T_P^o) \quad (37)$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{r_s}^{r_n} \int_{\theta_w}^{\theta_e} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(\alpha r \frac{dT}{dr} \right) r d\theta dr dt = \Delta_\theta \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(\alpha r \frac{dT}{dr} \right)_n - \left(\alpha r \frac{dT}{dr} \right)_s \right] dt \quad (38)$$

E analisa-se os pontos em regiões norte e sul da discretização Figura 5:

$$\left(\frac{dT}{dr} \right)_n \approx \frac{T_n - T_P}{\Delta_r}; \left(\frac{dT}{dr} \right)_s \approx \frac{T_P - T_s}{\Delta_r} \quad (39)$$

$$\Delta_\theta \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(\alpha r \frac{dT}{dr} \right)_n - \left(\alpha r \frac{dT}{dr} \right)_s \right] dt = \Delta_\theta \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(\alpha r_n \frac{T_n - T_P}{\Delta_r} \right) - \left(\alpha r_s \frac{T_P - T_s}{\Delta_r} \right) \right] dt \quad (40)$$

Juntando-se as equações (37 e 40) e aplicando $\Delta_\theta = 1$ tem-se:

$$r_p \Delta_r \Delta_\theta (T_P - T_P^o) = \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(\alpha r_n \frac{T_n - T_P}{\Delta_r} \right) - \left(\alpha r_s \frac{T_P - T_s}{\Delta_r} \right) \right] dt \quad (41)$$

Neste momento, generaliza-se abordagem por meio de um parâmetro, equação (23), a discretização resulta-se em:

$$\frac{r_p \Delta_r (T_P - T_P^o)}{\Delta t} = \theta \left[\left(\alpha r_n \frac{T_n - T_P}{\Delta_r} \right) - \left(\alpha r_s \frac{T_P - T_s}{\Delta_r} \right) \right] + (1 - \theta) \left[\left(\alpha r_n \frac{T_n^o - T_P^o}{\Delta_r} \right) - \left(\alpha r_s \frac{T_P^o - T_s^o}{\Delta_r} \right) \right] \quad (42)$$

Os subscritos estão abordados na lista de nomenclaturas.

Tabela 1 - Esquema

θ	0	1
I_T	$\left(\alpha r_n \frac{T_n^o - T_P^o}{\Delta_r} \right) - \left(\alpha r_s \frac{T_P^o - T_s^o}{\Delta_r} \right)$	$\left(\alpha r_n \frac{T_n - T_P}{\Delta_r} \right) - \left(\alpha r_s \frac{T_P - T_s}{\Delta_r} \right)$

Como mencionado no capítulo anterior, o método escolhido será o implícito $\theta = 1$, conseqüentemente a equação (41), torna-se:

$$\frac{r_p \Delta_r (T_P - T_P^o)}{\Delta t} = \left(\alpha r_n \frac{T_n - T_P}{\Delta_r} \right) - \left(\alpha r_s \frac{T_P - T_s}{\Delta_r} \right) \quad (43)$$

$$\frac{r_p \Delta_r T_P}{\Delta t} = \frac{\alpha r_n T_n}{\Delta_r} - \frac{\alpha r_n T_P}{\Delta_r} - \frac{\alpha r_s T_P}{\Delta_r} + \frac{\alpha r_s T_s}{\Delta_r} + \frac{r_p \Delta_r T_P^o}{\Delta t} \quad (44)$$

Utiliza-se a equação (28) para obter os coeficientes da discretização da equação da energia.

Tabela 2 - Coeficientes dos pontos internos (2,...,N-1)

$A_P = A_P^0 + A_s + A_n - S_p$	$A_s = \frac{\alpha r_s}{\Delta_r}$	$A_n = \frac{\alpha r_n}{\Delta_r}$	$A_P^0 = \frac{r_p \Delta_r}{\Delta t}$	$S_p = 0$	$S_u = 0$
---------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	---	-----------	-----------

4.2.2. Pontos das fronteiras

A equação da energia (22) será discretizada em relação aos pontos das fronteiras (1 e N), da Figura 5, deve-se ter muita atenção sobre estes pontos.

- Ponto 1:

Dada a condição de contorno em $r=0$ (34), repete-se a mesma análise realizada da equação (35) até a equação (38), assim será analisado as regiões norte e sul do ponto 1.

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_n \approx \frac{T_n - T_P}{\Delta_r}; \left(\frac{dT}{dr}\right)_s = 0 \quad (45)$$

$$\Delta_\theta \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(\alpha r \frac{dT}{dr} \right)_n - \left(\alpha r \frac{dT}{dr} \right)_s \right] dt = \Delta_\theta \int_t^{t+\Delta t} \left(\alpha r_n \frac{T_n - T_P}{\Delta_r} \right) dt \quad (46)$$

Juntando-se as equações (37 e 46) e aplicando $\Delta_\theta = 1$ tem-se:

$$r_p \Delta_r \Delta_\theta (T_P - T_P^o) = \int_t^{t+\Delta t} \left(\alpha r_n \frac{T_n - T_P}{\Delta_r} \right) dt \quad (47)$$

Analisa-se a equação (23) para $\theta = 1$ em relação ao ponto 1, do mesmo modo realizado para os pontos internos, resultando em:

$$\frac{r_p \Delta_r T_P}{\Delta t} = \frac{\alpha r_n T_n}{\Delta r} - \frac{\alpha r_n T_P}{\Delta r} + \frac{r_p \Delta_r T_P^o}{\Delta t} \quad (48)$$

Utiliza-se a equação (28) para obter os coeficientes da discretização da equação da energia para o ponto 1.

Tabela 3 - Coeficientes do ponto (1) da fronteira

$A_P = A_P^0 + A_S + A_n - S_p$	$A_S = 0$	$A_n = \frac{\alpha r_n}{\Delta_r}$	$A_P^0 = \frac{r_p \Delta_r}{\Delta t}$	$S_p = 0$	$S_u = 0$
---------------------------------	-----------	-------------------------------------	---	-----------	-----------

- Ponto N:

Dada a condição de contorno em $r=R$ (33), repete-se a mesma análise realizada da equação (35) até a equação (38), assim será analisado as regiões norte e sul do ponto N.

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_n \approx \frac{T_{sup} - T_P}{\frac{\Delta_r}{2}}; \left(\frac{dT}{dr}\right)_s \approx \frac{T_P - T_s}{\Delta_r} \quad (49)$$

$$\Delta_\theta \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(\alpha r \frac{dT}{dr} \right)_n - \left(\alpha r \frac{dT}{dr} \right)_s \right] dt = \Delta_\theta \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(\alpha r_{sup} \frac{T_{sup} - T_P}{\frac{\Delta_r}{2}} \right) - \left(\alpha r_s \frac{T_P - T_s}{\Delta_r} \right) \right] dt \quad (50)$$

Juntando-se as equações (37 e 50) e aplicando $\Delta_\theta = 1$ tem-se:

$$r_p \Delta_r \Delta_\theta (T_P - T_P^o) = \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(\alpha r_{sup} \frac{T_{sup} - T_P}{\frac{\Delta_r}{2}} \right) - \left(\alpha r_s \frac{T_P - T_s}{\Delta_r} \right) \right] dt \quad (51)$$

Analisa-se a equação (23) para $\theta = 1$ em relação ao ponto N do mesmo modo realizado para os pontos internos, resultando em:

$$\frac{r_p \Delta_r T_P}{\Delta t} = \frac{\alpha r_{sup} T_{sup}}{\frac{\Delta_r}{2}} - \frac{\alpha r_{sup} T_P}{\frac{\Delta_r}{2}} - \frac{\alpha r_s T_P}{\Delta_r} + \frac{\alpha r_s T_s}{\Delta_r} + \frac{r_p \Delta_r T_P^o}{\Delta t} \quad (52)$$

Utiliza-se a equação (28) para obter os coeficientes da discretização da equação da energia para o ponto N.

Tabela 4 - Coeficientes do ponto (N) da fronteira

$A_P = A_P^0 + A_S + A_N - S_P$	$A_S = \frac{\alpha r_s}{\Delta_r}$	$A_N = 0$	$A_P^0 = \frac{r_p \Delta_r}{\Delta t}$	$S_P = \frac{2\alpha r_{sup}}{\Delta_r}$	$S_U = \frac{2\alpha r_{sup} T_{sup}}{\Delta_r}$
---------------------------------	-------------------------------------	-----------	---	--	--

Assim, estes coeficientes mostrados nas tabelas 2 a 4, serão implementados para o cálculo das temperaturas em cada ponto do volume de controle, resultando-se em um perfil de temperatura.

5. RESULTADOS

Nesse capítulo será apresentado o resultado da simulação do perfil de temperatura com relação ao óleo parafínico estagnado em cavidade cilíndrica, através da equação discretizada no tópico anterior.

Os códigos foram implementados no software Matlab® 2013.

Para complementar as informações necessárias para obtenção dos resultados, as propriedades e os parâmetros utilizados são apresentados a seguir como dados de entradas, mas lembrando que estas propriedades foram consideradas constantes. Onde estes dados foram obtidos por (Queiroz, 2007) através de análises experimentais.

Tabela 5 – Dados de entrada para o programa (óleo leve)

Propriedade	Óleo Leve
ρ [kg/m^3]	882,7
k [$W/(mK)$]	0,13129
C_p [$J/(Kg K)$]	1830
μ [$Kg/(ms)$]	$2,572 \times 10^{-3}$

Tabela 6 - Dados de comparação (óleo pesado)

Propriedade	Óleo Pesado
ρ [kg/m^3]	882,7
k [$W/(mK)$]	0,0953
C_p [$J/(Kg K)$]	1762
μ [$Kg/(ms)$]	0,8059

5.1. PERFIL DE TEMPERATURA EM RELAÇÃO A TIAC

A Figura 6 mostra o perfil de temperatura real para um óleo leve parafínico estudado neste trabalho em relação a Temperatura Instantânea de Aparecimento de Cristais (TIAC), onde considerou-se a temperatura de 36,6°C (Leiroz,2004). Observa-se que a temperatura cai em relação ao tempo em todo

o comprimento da tubulação e o tempo de 18000 segundos (5 horas), foi o suficiente para a parede do duto, $r=0,14$ m, convergir para a (TIAC), assim a concentração de parafina tende a aumentar na tubulação e se propagar sentido ao centro do tubo.

Uma comparação breve, se dá pela Figura 7, onde foi analisado um perfil de temperatura presente na literatura, mas para um óleo do tipo pesado obtido experimentalmente por Mello et al, 2006, onde comparando com a Figura 6, tem-se que a temperatura de convergência, leva o mesmo tempo para ambos os óleos, mas a propagação da temperatura não, analisa-se o ponto em relação a $r=0$ para um tempo de 18000s, percebe-se que a temperatura é afetada no óleo leve em relação ao óleo pesado, onde tem-se respectivamente temperaturas de, $57,9^{\circ}\text{C}$ e 60°C .

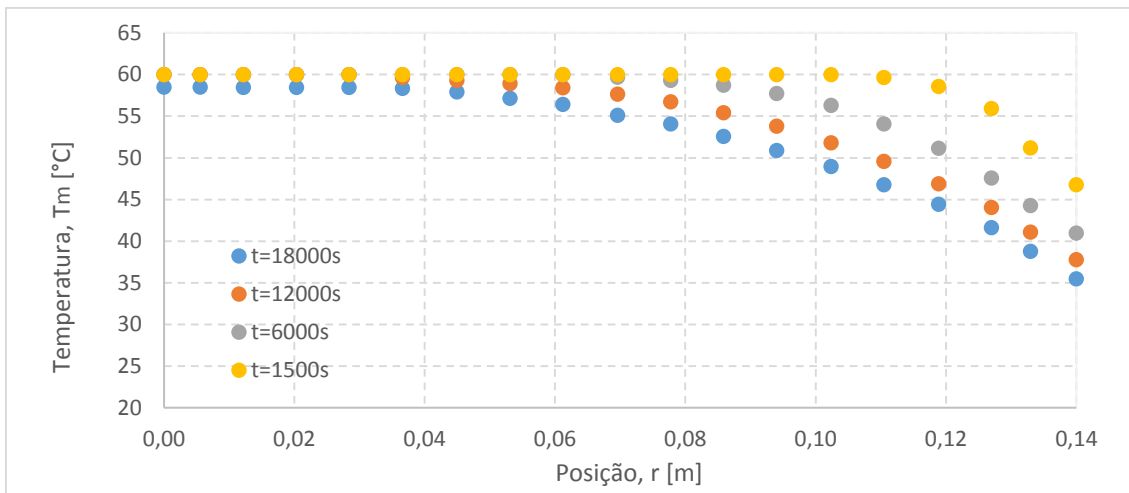


Figura 6 - Perfil de temperatura óleo leve

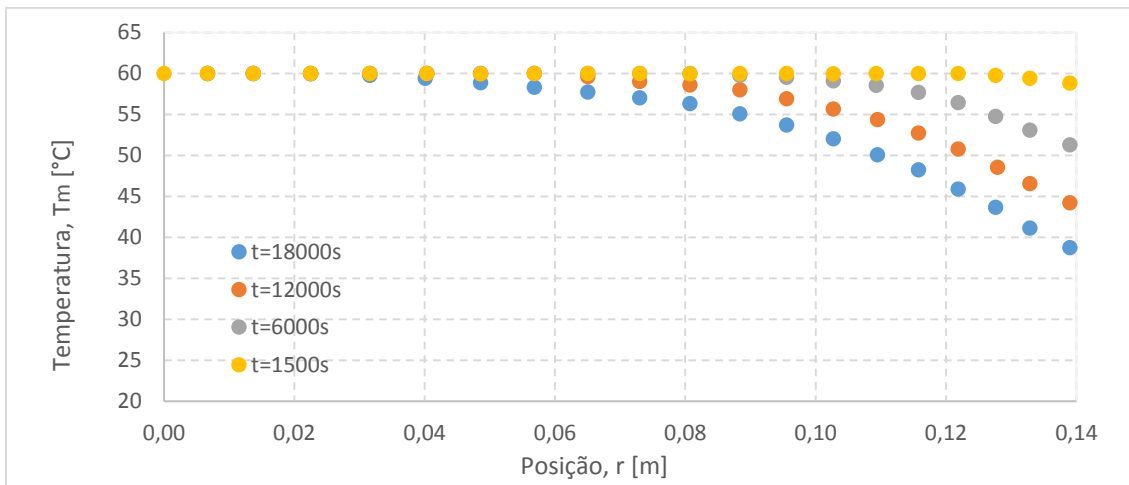


Figura 7 - Perfil de temperatura óleo pesado

5.2. PERFIL DE TEMPERATURA APÓS BALANÇO DE ENERGIA

Tabela 7 - Parâmetros da parede da tubulação

Dimensões	(m)
<i>Raio interno do duto (R_{in})</i>	0,140
<i>Espessura do aço ($e_{aço}$)</i>	0,0127
<i>Espessura do isolamento (e_{iso})</i>	0,200

Em relação ao perfil inicial de temperatura, é necessário obter-se uma velocidade média de entrada da tubulação, segundo (Queiroz,2007) a velocidade corresponde a 0,76 m/s, a temperatura da mistura mencionada é de $T_m = 60^\circ C$. Portanto, $Re_{inicial} = 7,96 \times 10^4$ e através da correlação de Sieder e Tate (Incropera 2011) apresentado no Capítulo 3, tem-se o coeficiente interno de transferência de calor $h_{in} = 272 W/(m^2K)$.

O coeficiente externo de troca de calor h_∞ foi calculado através da correlação (Knudsen e Kates, 1958), a velocidade da corrente marítima foi considerada $V_\infty = 0,2 m/s$ e a temperatura da vizinhança $T_\infty = 5^\circ C$. Segundo (Queiroz,2007) as propriedades da água do mar são: massa específica, $\rho_\infty = 1055 kg/m^3$, viscosidade absoluta, $\mu_\infty = 1,08 \times 10^{-3} kg/(mK)$, número de Prandtl, $Pr_\infty = 8,81$ e condutividade térmica, $k_\infty = 0,59 W/(m^2K)$. Assim o coeficiente externo $h_\infty = 2000 W/(m^2K)$ (Queiroz,2007).

Portanto, com esses dados calculados, o balanço de energia na tubulação de aço, resulta em uma $T_{sup} = 23,9^\circ C$, assim, esta é uma temperatura real na parede da tubulação.

A Figura 8 mostra o perfil de temperatura real de uma tubulação sem isolamento e com espessura desprezível, onde somente é analisado a temperatura no fluido (óleo leve). O tempo de convergência foi de 21000s (≈ 6 horas), e percebe-se que a temperatura em relação ao centro do duto é afetada de acordo com o tempo, onde para o tempo de 21000s a temperatura chegou a $56,3^\circ C$.

Uma análise a que pode ser feita, é comparando a temperatura em algum ponto em comum, em relação a Figura 6 e a Figura 8, onde foi estudado o mesmo fluido, mas com temperaturas de convergência diferentes. Em relação ao tempo de 12000s e $r=0,06\text{m}$, percebe-se que a temperatura da Figura 6 é bem mais alta que a da Figura 8, respectivamente, $58,4^{\circ}\text{C}$ e $56,4^{\circ}\text{C}$. Portanto a temperatura após o balanço de energia, demonstrou que afeta muito o fluido em toda a sua extensão, assim a deposição de cristais será bem mais acentuada.

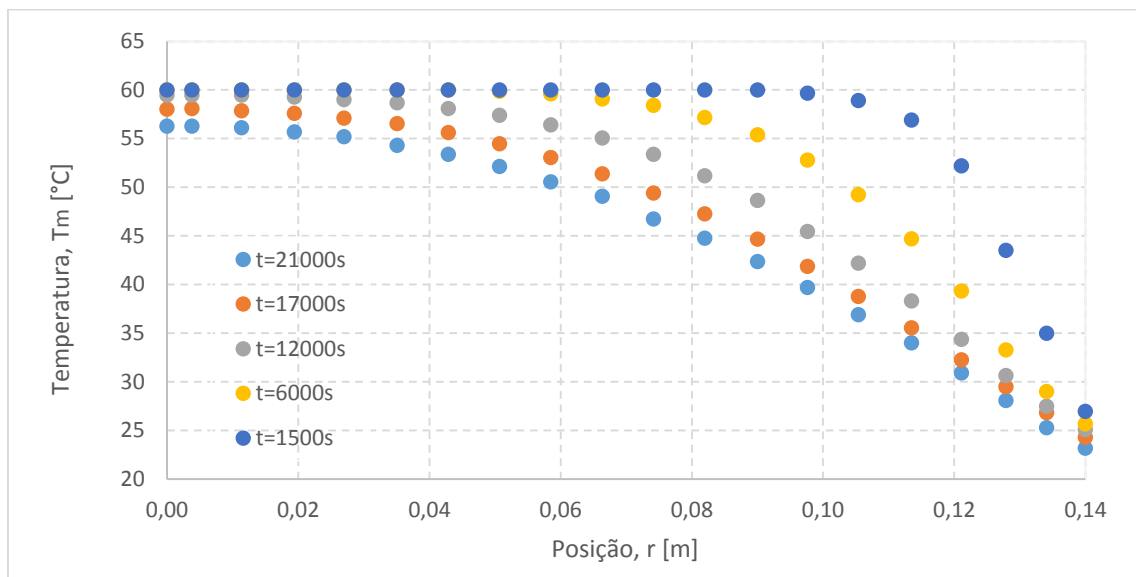


Figura 8 - Perfil de temperatura óleo leve após balanço de energia

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho a modelagem computacional da equação da energia em coordenadas cilíndricas, proporcionou a possibilidade de estimar a distribuição de temperatura de um óleo em seu regime de extração com uma parada de produção.

O método numérico escolhido para o presente trabalho, demonstrou ser muito eficiente em relação a discretização da equação governante, visto que os resultados são bem aproximados dos apresentados na literatura.

A literatura serviu de base para o estudo e conseqüentemente a sua validação, os resultados apresentados se mostraram satisfatórios e atenderam às expectativas.

7. REFERÊNCIAS

AZEVEDO, L.F.A., TEIXEIRA, A.M., 2003. **A critical review of the modeling of wax deposition mechanisms**. Petrol. Sci. Technol. 21, 393–408.

BALDOTTO, HudsonilAltoé, “**Avaliação da temperatura de início de aparecimento dos cristais (TIAC) e composição do primeiro cristal no fenômeno de precipitação parafínica em petróleos – Método simplificado**”. Dissertação de MSc., Centro de Ciência e Tecnologia, UENF, 2004.

BIRD R.B., STEWART W.E., LIGHTFOOT E.N., **Transport phenomena** (2 ed., Wiley, 2002).

BARRERA, J. J.; NIECKELE, A. O.; AZEVEDO, L.F.A. **Transient Thermal Analysis In Subsea Pipelines**, Proc. of COBEM 2005, 18th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto, MG, paper no. 0166, November 6-11, 2005.

BROWN, T. S.; NIESEN, V. G; ERICKSON, D. D., **Measurement and prediction of the kinetics of paraffin deposition**, SPE 26548, 1993.

BURGER, E. D., PERKINS, T. K. E STRINGLER, J. H., **Studies of wax deposition in the trans Alaska pipeline**. Journal of Petroleum Technology. Pp. 1075-1086, 1981.

INCROPERA, Frank P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2011. 643 p.

KNUDSEN, J. G., KATZ, D. L., **Fluid Dynamics and Heat Transfer**, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York City, 1958.

LEIROZ, A. T.; AZEVEDO, L. F. A., **Estudo sobre a Deposição de Parafina em Linhas de Petróleo**. Rio de Janeiro, 2004. 159p. Tese de Doutorado | Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

LUTHI, I.F., **Caracterização Reológica de um Óleo Parafínico e Estudo Experimental da Repartida de uma Linha Horizontal Bloqueada com Óleo**

Parafínico Gelificado. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2013.

MALISKA, C.R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**, LTC, Rio de Janeiro, 2004.

MELLO, S. C. et al. **Calorimetria Exploratória Diferencial na Seleção de Solventes para Remoção de Depósitos Parafínicos.** 2006.

MOKHATAB S, TOWLER B. 2009. **Wax prevention and remediation in subsea pipelines and flowlines** .World Oil Online Magazine Article., 2010.

PAULI-UNIMUENSTER.1996. **Numerical Method (TDMA).** Technical and Scientific Books., 2005

QUEIROZ, DENI LEMGRUBER, NIECKELE, ANGELA, O. **Influência da convecção Natural no Resfriamento de Dutos Submarinos de Petróleo e Gás.** Rio de Janeiro, 2007. 122p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

THOMAS, J.E **Fundamentos de Engenharia de Petróleo.** Petrobas. Rio de Janeiro: Interciência, 2011

VERSTEEG H.K., MALALASEKERA W. (1995) **An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method** by, Longman Scientific & Technical. ISBN 0-582-21884-5.