

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Pedro Eugenio Amaral dos Santos**

**Análise Térmica para Dissociação de Hidratos  
em Tubulações Submarinas Utilizando Laser de  
Alta Potência**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Mecânica da PUC–Rio

Orientador : Arthur M. B. Braga  
Coorientador: Dario Prada Parra

Rio de Janeiro  
Junho 2024

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a minha mãe, Marcia Amaral, porque sem ela nada disso seria possível. Sempre foi minha maior incentivadora e esteve do meu lado em todos os momentos, me apoiando e ensinado. Agradeço por ser minha maior inspiração, por sempre estar feliz e sorrindo independente de qualquer situação. Muito obrigado por cuidar de mim com tanto carinho e por ser a pessoas mais incrível e guerreira que conheço.

Agradeço ao meu irmão, Lucas Eugenio, por ser uma pessoa leve de conviver que sempre está de bom humor e tira o melhor sorriso de todos que estão a sua volta. Como se não bastasse nascer junto comigo, ainda é meu melhor amigo, irmão de sangue e de alma. Muito obrigado por ser meu irmão e melhor ainda, por ser meu gêmeo. Sem você nada disso seria possível.

A minha namorada, Jammy Fernandes, que está comigo desde o ensino médio. Minha melhor amiga e companheira, que escolheu dividir a vida comigo e torna tudo mais fácil. Muito obrigado por nunca me deixar desistir, por me escutar, me apoiar e por ser essa pessoa leve e maravilhosa de conviver. Obrigado por me ensinar tanto sobre amor, empatia e companheirismo.

Agradeço a todos os meus familiares e meus amigos, que graças a Deus são as melhores pessoas que poderia ter ao meu lado e que sempre estão presentes quando eu mais preciso.

Aos meus orientadores, Arthur Braga e Dario Prada, agradeço por me auxiliarem na elaboração do projeto e por me fornecerem todas as ferramentas necessárias para o desenvolvimento e conclusão do trabalho.

Por fim, agradeço a Deus, por ser tão bom comigo e me apresentar com pessoas tão incríveis que tornam a minha passagem por esse plano mais leve e feliz. Agradeço por nunca desistir de mim e por sempre me dar sinais de que vale a pena seguir em frente mesmo diante de tantas dificuldades.

## **Resumo**

### **Análise Térmica para Dissociação de Hidratos em Tubulações Submarinas Utilizando Laser de Alta Potência.**

Hidratos são compostos cristalinos formados pela combinação de moléculas de gás com moléculas de água em condições específicas de pressão e temperatura. Em sistemas de petróleo e gás, hidratos podem se formar em linhas de produção submarinas ou em dutos de transporte, representando um desafio significativo para a indústria. A formação de hidratos ocorre quando moléculas de gás, geralmente metano, são aprisionadas em uma estrutura de água cristalina. Isso pode causar obstrução de tubulações, resultando em problemas operacionais e econômicos. A dissociação de hidratos, por sua vez, libera o gás, podendo apresentar riscos de segurança e impactos ambientais.

O projeto visa avaliar a viabilidade da dissociação de hidratos por meio do uso de laser de alta potência, em situações de formação desses cristais em tubulações submarinas. A modelagem do estudo é realizada em uma secção transversal da tubulação, onde a formação de hidratos pode ocasionar obstruções parciais ou totais, comprometendo o fluxo de óleo e gás e gerando paradas de produção. A análise será realizada utilizando o COMSOL Multiphysics, focando na avaliação da condução de calor através da tubulação, com calor sendo gerado pelo laser a uma determinada distância da tubulação. Dessa forma, será verificado se é possível atingir a temperatura de dissociação do hidrato, prevenindo assim possíveis obstruções.

### **Palavras-chave**

Hidratos. Dissociação. Laser de alta potência. Tubulação. Simulação. Condução.

## **Abstract**

### **Thermal Analysis for Hydrate Dissociation in Subsea Pipelines Using High-Power Laser.**

Hydrates are crystalline compounds formed by the combination of gas molecules with water molecules under specific pressure and temperature conditions. In oil and gas systems, hydrates can form in underwater production lines or transport pipelines, posing a significant challenge to the industry. Hydrate formation occurs when gas molecules, typically methane, are trapped in a crystalline water structure. This can lead to pipeline blockages, resulting in operational and economic challenges. The dissociation of hydrates, on the other hand, releases the gas but may pose safety risks and environmental impacts. The project aims to assess the feasibility of hydrate dissociation using high-power laser technology in scenarios where these crystals form in underwater pipelines. The study's modeling is conducted on a cross-sectional segment of the pipeline, where hydrate formation can cause partial or total blockages, affecting the flow of oil and gas and leading to production shutdowns. The analysis will be performed using COMSOL Multiphysics, focusing on evaluating heat conduction through the pipeline, with heat generated by the laser at a specific distance from the pipeline. Thus, it will be verified whether it is possible to achieve the temperature required for hydrate dissociation, preventing potential blockages.

### **Keywords**

Hydrate . Dissociation. High-Power Laser. Pipeline. Simulation. Conduction.

## Sumário

1	Introdução	<b>8</b>
1.1	Motivação	8
1.2	Objetivo	8
2	Revisão bibliográfica	<b>10</b>
2.1	Hidratos	10
2.2	Estrutura hidrato	11
2.3	Formação do Hidrato no Escoamento	11
2.4	Métodos de dissociação de hidratos	14
2.5	Ferramenta a Laser	18
3	Metodologia	<b>19</b>
3.1	Geometria e material de estudo	19
4	Coefficiente de Troca de Calor por convecção	<b>21</b>
4.1	Coefficiente de troca de calor por convecção externa	21
5	Geração de Malha	<b>24</b>
6	Resultados	<b>27</b>
6.1	Simulação com a tubulação exposta ao ar	27
6.2	Simulação Considerando a Formação de Hidrato	29
7	Conclusão	<b>33</b>
	Referências Bibliográficas	<b>34</b>

## Lista de Figuras

2.1	Diagrama simplificado dos três critérios para formação de hidratos.	10
2.2	Estrutura dos Hidratos.	11
2.3	Dutos conectam as cabeças dos poços às plataformas.	12
2.4	Plugue de hidrato sendo removido de dentro de uma tubulação.	13
2.5	Plugue de hidrato sendo removido de dentro de uma tubulação.	16
3.1	Representação da geometria em 2D.	20
5.1	Malhas (a) Finer (b) Extra Fine (c) Extra fine + Extremely fine (d) Extremely Fine.	25
5.2	(a) Convergência da malha no ponto T1 (b) Convergência da malha no ponto T5	25
6.1	Perfil de Temperatura	28
6.2	Pontos para verificação de temperatura	28
6.3	Temperatura no interior da tubulação	29
6.4	Tubulação com formação de hidrato	30
6.5	Temperatura nos pontos $R = R_{in}$	31
6.6	Temperatura avaliada no interior do hidrato	32

## Lista de Tabelas

3.1	Tabela de propriedades dos materiais.	20
4.1	Constantes de Nusselt.	23
6.1	Propriedades Termofísicas do Hidrato.	30

# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

A produção de petróleo em ambientes submarinos enfrenta diversos desafios técnicos e operacionais, dentre os quais a formação de hidratos de gás nas tubulações se destaca pela sua complexidade e impacto negativo. Os hidratos podem obstruir tubulações, interromper o fluxo de petróleo e gás, e causar riscos significativos à segurança das operações, além de implicar em altos custos de manutenção e reparo [1][2].

A remoção de hidratos de tubulações submarinas envolve métodos mecânicos, químicos ou térmicos, cada um com suas limitações e desafios próprios. Métodos mecânicos podem danificar as tubulações, enquanto métodos químicos podem ser ambientalmente prejudiciais. Métodos térmicos, embora eficazes, frequentemente requerem uma fonte de calor interna que pode ser difícil de implementar.

A utilização de um laser de alta potência para aquecer a superfície externa da tubulação representa uma abordagem inovadora e promissora. O laser, ao incidir sobre a tubulação, poderá aquecer o tubo alcançando a temperatura de dissociação de hidratos internamente, sem a necessidade de intervenção direta dentro da tubulação. Esta técnica poderia oferecer uma alternativa mais eficiente e menos invasiva, mitigando os riscos associados a métodos tradicionais e potencialmente reduzindo os custos operacionais.

## 1.2 Objetivo

O objetivo desse trabalho é estudar a viabilidade da utilização de um laser de alta potência para a remoção de hidratos em tubulações submarinas. A análise consiste em verificar se o aquecimento externo da tubulação, através da aplicação do laser, será capaz de elevar a temperatura interna e consequentemente a dissociação de hidratos.

As simulações serão realizadas utilizando o software *COMSOL Multiphysics*, que permitirá avaliar a distribuição de temperatura ao longo da tubulação

e determinar a eficácia do laser sob condições reais de operação. As simulações considerarão a tubulação submersa na água do mar, levando em conta as severas condições de temperatura e pressão do ambiente submarino, que serão utilizados para o cálculo do coeficiente de convecção.

O estudo também examinará o impacto do isolamento térmico da tubulação e a capacidade de transmissão de calor sob estas condições extremas. A análise fornecerá dados críticos para a implementação prática.

## 2

### Revisão bibliográfica

#### 2.1

##### Hidratos

Os hidratos são compostos cristalinos que se assemelham ao gelo tanto no aspecto visual quanto com relação a algumas propriedades físicas como: aderência, densidade e resistência mecânica, sendo maior a do gelo. A composição molar do hidrato é de aproximadamente 85% de água e 15% de gás [3].

A formação de hidratos ocorre quando há presença de água e hidrocarbonetos leves (metano, etano, propeno etc.) sob condições de elevada pressão e baixa temperatura. A combinação desses estados proporciona a formação dos hidratos através de forças de ligação (ponte de hidrogênio) quando as moléculas de gás, denominadas moléculas hospedes são englobadas por outros compostos que estabilizam o cristal, como as moléculas de água, chamadas de moléculas hospedeiras. A Figura 2.1 apresenta um diagrama simplificado dos critérios para formação de hidratos.

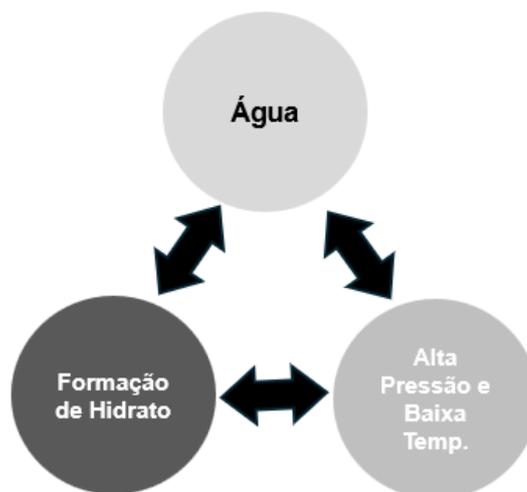


Figura 2.1: Diagrama simplificado dos três critérios para formação de hidratos. [4]

A formação de hidratos de gás pode causar problemas tais como erosão e/ou corrosão em tubulações, bloqueio em linhas de transferência, danos ao

compressor e outros problemas industriais. Conseqüentemente, esse é um fator determinante para ser objeto de estudo para a indústria.

## 2.2

### Estrutura hidrato

Os hidratos naturais de gás pertencem a três estruturas cristalinas: cúbica I (sI), estrutura cúbica II (sII) ou estrutura hexagonal H (sH). A Estrutura I é formada por moléculas hóspedes com diâmetros entre 4,2 e 6 Ångströms, como metano, etano, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio. Moléculas únicas maiores ( $6 \text{ Ångströms} < d < 7 \text{ Ångströms}$ ), como propano ou iso-butano, formarão a Estrutura II. Moléculas ainda maiores (tipicamente  $7 \text{ Ångströms} < d < 9 \text{ Ångströms}$ ), como iso-pentano ou neohexano (2,2-dimetilbutano), podem formar a Estrutura H quando acompanhadas por moléculas menores, como metano, sulfeto de hidrogênio ou nitrogênio [3].

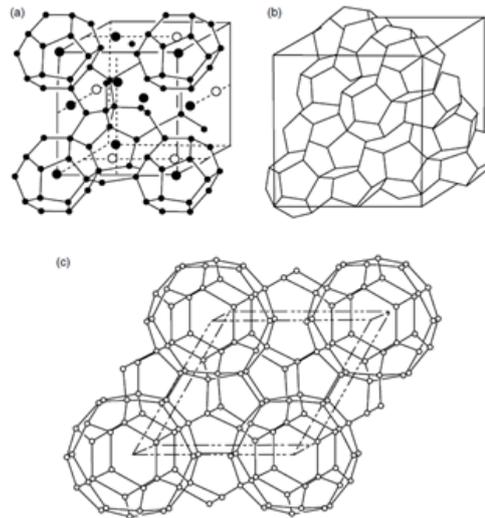


Figura 2.2: Estrutura dos Hidratos.  
[3]

Normalmente, hidratos do tipo I são os mais comuns na natureza [5], pelo fato da abundância de metano em relação ao restante dos componentes do gás natural. A estrutura II é encontrada quando ocorre alguma alteração tecnológica, e por esse motivo é a estrutura de maior interesse nas pesquisas relacionadas ao óleo e gás. A estrutura Hexagonal é uma mistura entre as moléculas maiores e menores e são encontradas com menos frequência.

## 2.3

### Formação do Hidrato no Escoamento

O processo de extração de petróleo e gás em alto-mar é realizado em águas profundas e ultraprofundas, onde os recursos petrolíferos estão localizados

abaixo do leito oceânico. Para realizar o escoamento do fluido, é necessário um sistema seguro de transporte, sendo as tubulações a opção mais usual devido ao baixo custo e à segurança operacional.

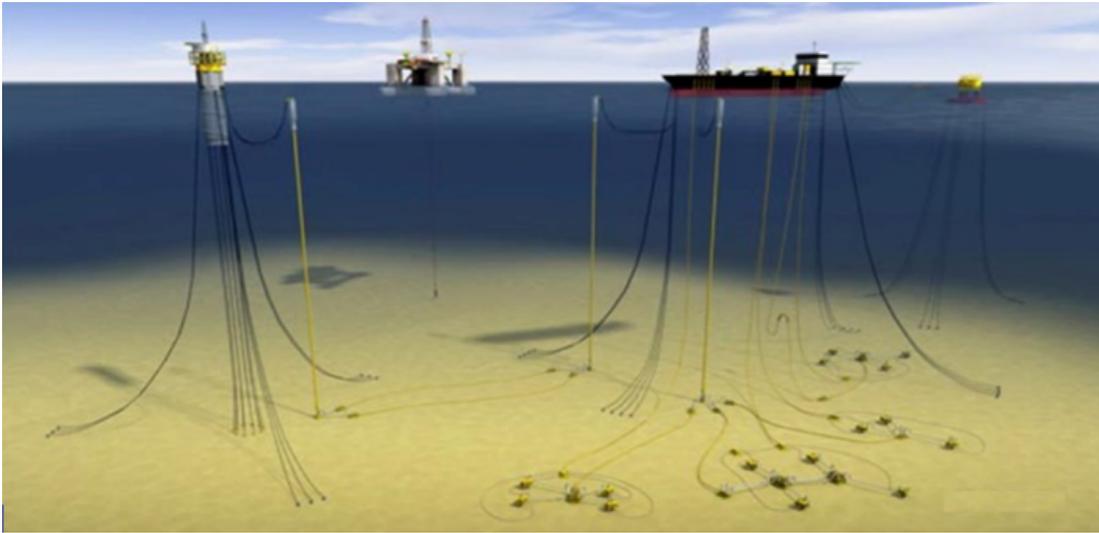


Figura 2.3: Dutos conectam as cabeças dos poços às plataformas.  
[6]

Atualmente, observa-se um aumento significativo na atividade de extração e produção de petróleo em ambientes de águas ultraprofundas, onde a temperatura do leito oceânico varia entre 2 °C e 4 °C. O hidrocarboneto fluido do reservatório a uma temperatura de aproximadamente 60 °C, sendo transportado até a plataforma através de tubulações (figura 2.3). Dessa forma, o oceano fornece um meio de resfriamento infinito para os fluidos quentes provenientes do reservatório [3]. A baixa temperatura, associada a pressões elevadas, causa maiores problemas com a formação de hidratos.

Para evitar a perda de calor do fluido para o meio ambiente e, conseqüentemente, a formação de hidratos, as tubulações são isoladas termicamente. O objetivo do isolamento é manter o fluido fora da região de formação de hidratos, conforme ilustrado na figura que apresenta a curva de formação de hidratos para um fluido ao longo de uma tubulação.

A formação de hidratos não ocorre em operação normal da linha, devido ao design do sistema [3]. Os plugues de hidratos são formados devido a operações anormais do escoamento, como uma retomada do processo após uma parada de emergência, falhas e recuperação de componentes do sistema e/ou quando ocorre resfriamento devido a uma restrição de válvula em uma linha.

Quando a temperatura interna da tubulação é inferior à temperatura crítica para a formação de hidratos, os cristais começam a se formar e acumular no interior do duto, sendo transportados junto à fase líquida durante

o escoamento do fluido. Assim, os locais mais propensos à aglomeração do hidrato são encontrados nas curvas e pontos baixos da tubulação, bem como em conexões e válvulas.



Figura 2.4: Plugue de hidrato sendo removido de dentro de uma tubulação. [7]

A formação de hidratos no interior da tubulação pode gerar diversos problemas, tais como bloqueio parcial ou total de linhas, ilustrado na figura 2.4; erosão e/ou corrosão das tubulações; entupimentos das "choke lines" e das "kill lines" (linhas de acesso secundário ao poço). Alguns desses plugues demoram semanas ou até meses para se dissociarem, causando perda de produção, maior consumo energético, danos aos equipamentos e comprometimento da segurança dos processos.

Segundo [4], existem outros fenômenos que também influenciam na síntese de hidratos:

#### 1. Turbulência

- (a) Alta velocidade - A formação de hidratos é favorecida em regiões onde a velocidade do fluido é elevada. Isso torna as válvulas de estrangulamento particularmente suscetíveis à formação de hidratos. Primeiro, geralmente ocorre uma queda significativa de temperatura quando o gás natural é estrangulado através de uma válvula devido ao efeito Joule-Thomson. Além disso, a velocidade é elevada nas regiões estreitadas da válvula.
- (b) Agitação - A mistura em um duto, vaso de processo, trocador de calor, entre outros, intensifica a formação de hidratos.

#### 2. Pontos de Nucleação - Em termos práticos, um ponto de nucleação é um local onde uma transição de fase é favorecida, e neste caso, a formação

de um sólido a partir de uma fase fluida. Pontos de nucleação para a formação de hidratos incluem imperfeições no duto, pontos de solda, conexões do duto (por exemplo, cotovelo, T, válvula), e assim por diante. Presença de lama, sujeira e areia também são bons pontos de nucleação.

3. Água Livre - Não é necessária para a formação de hidrato, mas sua presença certamente a potencializa, pois a superfície livre água-gás é um bom local de nucleação.

Devido a esses problemas, os hidratos custam milhares de dólares para a indústria petrolífera a cada ano. Um incidente pode custar US\$ 1 milhão ou mais, dependendo de sua magnitude. Além dos prejuízos financeiros, vidas já foram perdidas devido a acidentes consequentes da presença de hidrato [4].

À medida que a indústria petrolífera expande suas operações em ambientes mais hostis, é inevitável que desafios relacionados à garantia de fluxo se intensifiquem. Como resultado, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para assegurar a viabilidade e otimização dos processos envolvidos. Este cenário impulsiona a necessidade contínua de inovações e soluções que abordem os complexos desafios enfrentados pela indústria petrolífera em tais contextos.

## 2.4

### Métodos de dissociação de hidratos

Na indústria offshore, existem diferentes métodos que podem ser usados para dissociar um plugue de hidrato: despressurização, estimulação térmica, injeção de inibidor termodinâmico, ou uma combinação desses métodos.

Por ser um processo endotérmico [3], a dissociação de hidratos pode ser realizada através do fornecimento de calor externo, que quebra as ligações de hidrogênio entre as moléculas de água, bem como as forças de interação de van der Waals entre as moléculas de água e as moléculas hospedeiras na rede do hidrato. Esse processo resulta na decomposição do hidrato em água e gás.

O controle e remediação de hidratos é um dos maiores desafios no desenvolvimento dos campos de petróleo [8]. A escolha das técnicas para prevenção e dissociação de hidratos que serão aplicadas no sistema, leva em consideração diversos fatores, como: a velocidade de recuperação, limitações, requisitos de instalação e intervenção, riscos, eficiência e os custos [9]

#### 2.4.1

##### Despressurização

Como discutido no capítulo 2.1 a formação do hidrato depende da combinação entre pressão e temperatura. Nesse contexto, a despressurização

da linha visa perturbar o equilíbrio termodinâmico entre o sólido e o gás, desencadeando a instabilidade e conseqüentemente a dissociação do hidrato.

Ao reduzir a pressão para dissociar o hidrato, é observado que, geralmente, quanto menor a pressão, mais rápido ocorre o derretimento do plugue. No entanto, é importante considerar o efeito Joule -Thompson associado a essa redução de pressão. A rápida despressurização leva a um resfriamento considerável do sistema devido a esse efeito. Dessa forma, não há tempo suficiente para que o sistema atinja o equilíbrio térmico com o ambiente. Conseqüentemente, é necessário aguardar que o sistema se aqueça novamente.

Tanto a teoria quanto os experimentos indicam que os plugs tendem a derreter radialmente, da parede do tubo para o centro do tubo [4]. Devido a gravidade o material derretido tende a se depositar no fundo da linha, formando um caminho de fluxo entre os dois lados do plugue.

Para garantir a segurança e eficiência do processo, é necessário despressurizar de ambos os lados do bloqueio, tentando manter pressão igual nas extremidades. Equilibrar a pressão em ambos os lados do plugue de hidrato é crucial para evitar movimentos significativos.

Se não for possível liberar a pressão de ambos os lados da linha, então a pressão deve ser liberada de um lado do plugue de maneira gradual. Primeiro, libere um pouco de pressão e permita que o plugue derreta, o que aumentará a pressão. Em seguida, libere mais pressão. Continue a diminuir a pressão até que o plugue derreta [4].

O problema com este método é que é necessário liberar pressão suficiente para derreter o hidrato, mas não resultar no plugue se tornando um projétil.

A figura 2.5 ilustra um cenário perigoso para a despressurização.

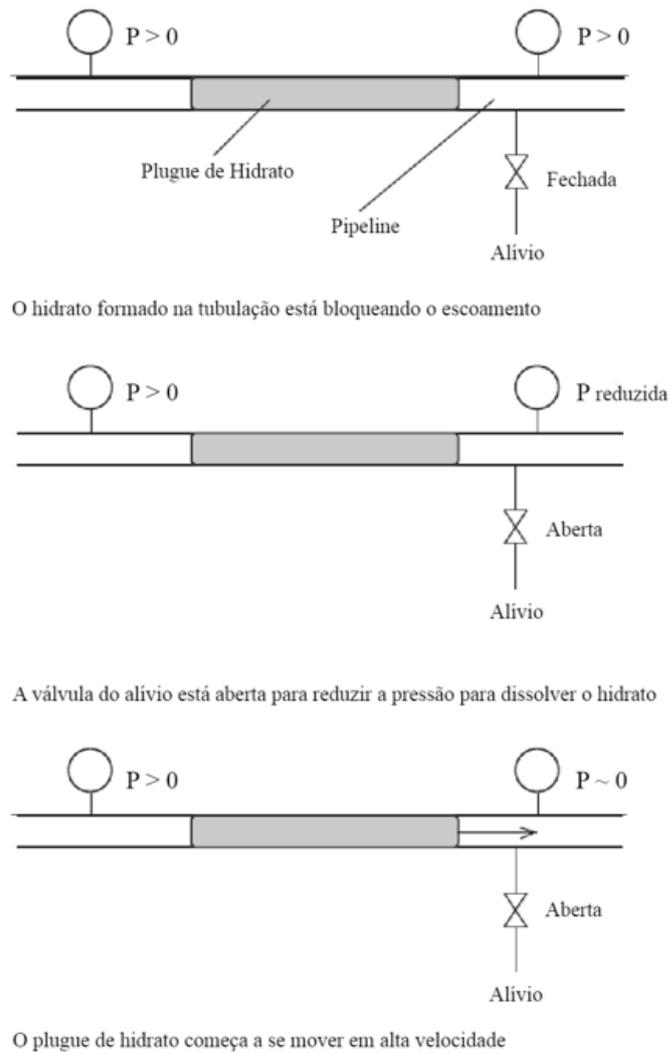


Figura 2.5: Plugue de hidrato sendo removido de dentro de uma tubulação.

### 2.4.2 Inibidores de Hidratos

O termo "inibidor de hidratos" é utilizado para substâncias químicas que têm a capacidade de reduzir a temperatura de formação de hidratos (ou deslocar o equilíbrio de hidratos). São substâncias solúveis em água e incluem: metanol, glicóis, amônia e sais como cloretos de sódio, potássio, cálcio e magnésio.

Atuam por diversos mecanismos, tendo como objetivo principal evitar a formação de hidratos em sistemas de gás, o bloqueio de linhas de condução e as intervenções de manutenção dispendiosas. Os inibidores são injetados na boca do poço, normalmente por bombas de pistão de injeção, produzindo uma vazão pulsante e pressão altamente dinâmica [10].

Existem dois tipos de inibidores de hidratos usados na engenharia submarina: inibidores termodinâmicos (THIs) e inibidores de baixa dosagem (LDHIs). Os inibidores termodinâmicos mais comuns são o metanol e o MEG (monoetilenoglicol), embora o etanol, outros glicóis como DEG (dietilenoglicol) e TEG (trietileno) e sais também possam ser efetivamente utilizados. Eles inibem a formação de hidratos, reduzindo a temperatura na qual os hidratos se formam. Esse efeito é semelhante a adicionar anticongelante à água para diminuir o ponto de congelamento.

Embora os inibidores sejam utilizados em larga escala no mercado offshore, apresentam várias desvantagens, devido ao elevado custo operacional, problemas de incrustação causados pela precipitação de sais e potencial contaminação do óleo produzido pelo uso excessivo de metanol.

### 2.4.3 Calor Ativo

Este método é realizado aumentando a temperatura do sistema acima da temperatura de dissociação dos hidratos. Portanto, uma quantidade adequada de calor é necessária para dissociar rapidamente o hidrato sólido formado, a fim de evitar o acúmulo de pressão e possíveis rupturas nas linhas de fluxo. De acordo com [8], o calor é adicionado por meio de:

1. Aquecimento elétrico: Esta técnica pode ser aplicada para operação contínua, paradas e reinícios. O tipo pode ser aquecimento direto ou indireto. No aquecimento direto, uma corrente de grande amperagem passa pelo duto e, devido a resistência elétrica do duto, ocorre o aquecimento. No aquecimento indireto, o aquecimento é feito por um elemento externo. Este equipamento é instalado do lado de fora do tubo e o aquece por condução.
2. Circulação de fluido quente: Este método é geralmente aplicado em um plano de feixe, que contém linhas de produção e linhas de aquecimento juntas. Da mesma forma, o método pode ser usado para operação contínua, paradas e reinícios.
3. Circulação de óleo quente: Óleo morto aquecido é circulado para aquecer linhas de fluxo e risers durante uma parada, até que os fluidos sejam aquecidos e fiquem fora da curva de hidratos.

O uso de calor ativo exige alto grau de complexibilidade do sistema submarino, é necessário a utilização de bombas, geração e transmissão de energia, medidores, instrumentação, entre outras coisas, tornando o método pouco econômico e com baixo histórico de aceitação.

## 2.5

### Ferramenta a Laser

A tecnologia Laser vem sendo utilizada em diversas áreas da engenharia e é notório o desenvolvimento dos diodos emissores de Laser nos últimos anos em relação a diversos parâmetros, entre eles a potência óptica e o comprimento de onda da emissão. Por esse motivo, hoje é possível a construção de equipamentos relativamente compactos e com níveis de potência elevados.

Lasers de alta potência possuem uma eficiência considerável e boa transmitância da luz em água salgada, com isso com poucos metros de distância praticamente toda energia transmitida pelo Laser pode ser transmitida para os dutos submarinos, potencializando a dissociação de hidratos internos. As vantagens da utilização do Laser para dissociação de hidratos são:

- **Dimensões e Peso Adequados para Manobras do ROV:** A tecnologia laser permite a construção de dispositivos que se adequam às manobras do veículo operado remotamente (ROV), garantindo flexibilidade e precisão nas operações.
- **Baixo Custo Relativo:** Comparado a outras tecnologias, o uso de laser para a dissociação de hidratos apresenta vantagens econômicas, contribuindo para a viabilidade do processo.
- **Baixo Impacto Ambiental:** A operação com laser para dissociação de hidratos é caracterizada por um impacto ambiental reduzido, alinhado com práticas sustentáveis.
- **Operação Simples:** A simplicidade operacional é uma característica marcante da tecnologia laser, tornando-a uma opção eficaz para diversas aplicações na indústria submarina.

Essas características fazem da tecnologia laser uma escolha promissora e eficiente para a dissociação de hidratos, proporcionando uma abordagem inovadora e sustentável para os desafios enfrentados na indústria de óleo e gás. A utilização estratégica do laser destaca-se como uma solução técnica avançada, promovendo eficiência e eficácia no enfrentamento desses desafios complexos.

## 3 Metodologia

A metodologia a ser seguida durante o desenvolvimento do trabalho consiste na resolução dos problemas abordados por meio de métodos numéricos. O estudo térmico da tubulação com o isolante térmico será realizado com o software *COMSOL Multiphysics*, com base no método dos elementos finitos, a qual é uma ferramenta particularmente bem adaptada para os problemas de acoplamento entre os vários fenômenos físicos.

Primeiramente, será realizada a preparação, organização e aquisição dos dados. Nela serão desenvolvidas as seguintes etapas: geometria de estudo; a definição do material a ser utilizado; cálculo do coeficiente de troca de calor por convecção do meio externo; a definição das condições de contorno; a geração da malha com seu refinamento para garantir a confiabilidade dos resultados.

A próxima etapa do estudo consistirá em simulações de transferência de calor, considerando duas configurações distintas. Na primeira fase, a análise será conduzida sem levar em conta a formação de hidratos, focando na verificação do perfil de temperatura ao longo da tubulação para avaliar se a potência do laser utilizada é suficiente para alcançar a temperatura necessária para dissociação de hidratos dentro da tubulação. Nesta abordagem, a tubulação estará exposta ao ar, sem a influência do ambiente marítimo.

A fase final do processo compreende a modelagem do sistema, levando em consideração a formação de hidratos na parede interna da tubulação. Nesse contexto, será realizada uma análise da distribuição de temperatura ao longo da camada de hidratos para a mesma potência do laser utilizada na etapa anterior. Ao final, os resultados obtidos serão avaliados com base nas simulações realizadas.

### 3.1 Geometria e material de estudo

O escoamento de hidrocarbonetos na indústria offshore é realizado através de tubulações que ligam a cabeça do poço até a unidade offshore. Para realizar o estudo, a tubulação será modelada em geometria 3D através do *COMSOL Multiphysics*. Considerou-se uma tubulação com uma camada de

aço de Raio interno  $R_{in}$  e espessura  $e_{aço}$  revestida por um isolante térmico com espessura  $e_{iso}$ . A tubulação está localizada em águas ultra profundas, trocando calor com a água do mar que se encontra a uma Temperatura  $T_{\infty}$ , com coeficiente de convecção  $h_{\infty}$ . O perfil em 2D modelo encontra-se ilustrado na Figura 3.1.

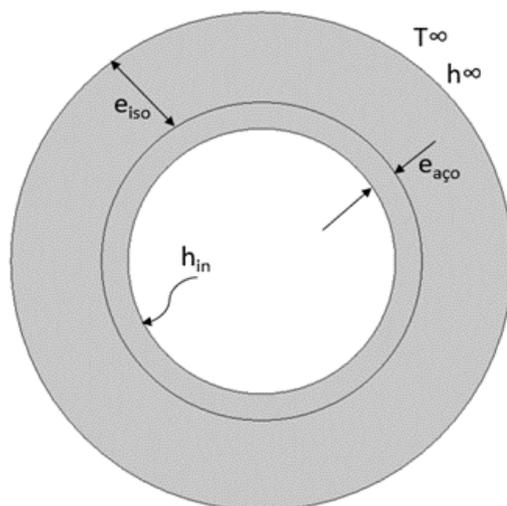


Figura 3.1: Representação da geometria em 2D.

Os dados do material estão apresentados na Tabela:

Tabela 3.1: Tabela de propriedades dos materiais.

Material da Tubulação	Condutividade Térmica [W/m.K]	Calor Específico [J/kg.K]	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Espessura [mm]
Tubo de Aço	44,5	475	7850	18
Glass Syntactic Polyurethane (GSPU)	0.17	1465	825	61

## 4

### Coeficiente de Troca de Calor por convecção

O coeficiente de transferência de calor  $h$  é calculado em função das condições do escoamento, isto é, do número de Reynolds ( $Re$ ), do Número de Nusselt ( $Nu$ ) e do número de Prandtl ( $Pr$ ). Para realizar as simulações iremos necessário calcular o coeficiente de troca de calor por convecção para o ambiente marítimo.

#### 4.1

##### Coeficiente de troca de calor por convecção externa

A tubulação de diâmetro externo ( $D = 0,338m$ ) está submetido a um escoamento externo. Para realizar o cálculo do coeficiente de convecção externo  $h_{\infty}$  é necessário calcular o número de Reynolds para prever o comportamento do fluido:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (4.1)$$

Onde  $\rho$  é a densidade da água do mar,  $V$  é a velocidade de escoamento e  $\mu$  é a viscosidade da água do mar. Considerou-se  $V = 0,5m/s$  para a velocidade da correnteza do mar em águas ultraprofundas. As propriedades da água do mar estão listadas abaixo:

- $\rho_{sw} = 1036,9 \text{ kg/m}^3$
- $k_{sw} = 0,5765 \text{ W/mk}$
- $\mu_{sw} = 0,0017 \text{ Pas}$
- $C_{p_{sw}} = 3938,8 \text{ J/kgK}$

Substituindo os valores na equação 4.1:

$$Re = \frac{1036,9 \times 0,5 \times 0,338}{0,0017} = 103080 \quad (4.2)$$

Número de Prandtl: O número de Prandtl ( $Pr$ ) é uma grandeza adimensional para caracterizar a relação entre a difusividade térmica e a difusividade de massa de um fluido. Ele descreve a capacidade de um fluido de conduzir

calor em relação à sua capacidade de transportar massa. A definição do número de Prandtl é dada por:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (4.3)$$

Substituindo os coeficientes da água do mar, tem-se que o número de Prandtl é:

$$Pr = \frac{0,0017 \times 3938,8}{0,5765} = 11,61 \quad (4.4)$$

Número de Nusselt: O número de Nusselt (Nu) é igual ao gradiente de temperatura adimensional na superfície e fornece uma medida da transferência de calor por convecção que ocorre na superfície [11].

$$Nu = f(x^*, Re_L, Pr) \quad (4.5)$$

A Equação 4.5 indica que, para uma dada geometria, o número de Nusselt deve ser alguma função universal de  $x^*$ ,  $Re_L$  e  $Pr$ . Se essa função for conhecida, ela pode ser usada para calcular o valor de Nu para diferentes fluidos e para diferentes valores de  $V$  e  $L$ . A partir do conhecimento de Nu, o coeficiente convectivo local  $h$  pode ser determinado de acordo com a equação 4.8 [11]

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = f(Re_D, Pr) \quad (4.6)$$

A correlação empírica proposta por Hilpert que foi modificada para ser usada em fluidos com vários números de Prandtl é amplamente utilizada para  $Pr \geq 0,7$ :

$$Nu_D = C Re_D^m Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4.7)$$

As constantes  $C$  e  $m$  estão apresentadas na tabela abaixo: 4.1:

Tabela 4.1: Constantes de Nusselt.

$Re_D$	C	m
0,4-4	0,989	0,330
4-40	0,911	0,385
40-4000	0,683	0,466
4000-40000	0,193	0,618
40000-400000	0,027	0,805

Para  $Re_D = 103080$  de acordo com a tabela, os valores das constantes C e m são respectivamente 0,027 e 0,805. Substituindo os valores na equação 4.9, obtém-se o Nusselt Médio:

$$Nu_D = 0,027 \times 103080^{0,805} \times 11,61^{\frac{1}{3}} = 663,703 \quad (4.8)$$

Logo, o valor de  $h_\infty$  será:

$$h_\infty = \frac{663,703 \times 0,5765}{0,276} = 1132 \frac{W}{m^2 K} \quad (4.9)$$

## 5

### Geração de Malha

Escolher a malha correta é crucial em simulações numéricas, pois afeta diretamente a precisão e eficiência dos resultados. A malha é a discretização do domínio físico em elementos finitos, e a qualidade dessa malha pode impactar significativamente a confiabilidade da simulação.

Para realizar o estudo da malha utilizou-se um diâmetro de incidência e potência do laser de 32,9 mm e 1600W, respectivamente. O elemento do tipo triangular livre (Free Triangular) foi escolhido para a geometria e as físicas analisadas. Foram selecionados quatro tamanhos para as malhas, começando por uma malha mais grossa até uma mais refinada. A Figura 9 compara as temperaturas em um ponto da superfície externa do isolante, T1 e no ponto T5, localizado na superfície interna da tubulação, para as diferentes malhas.

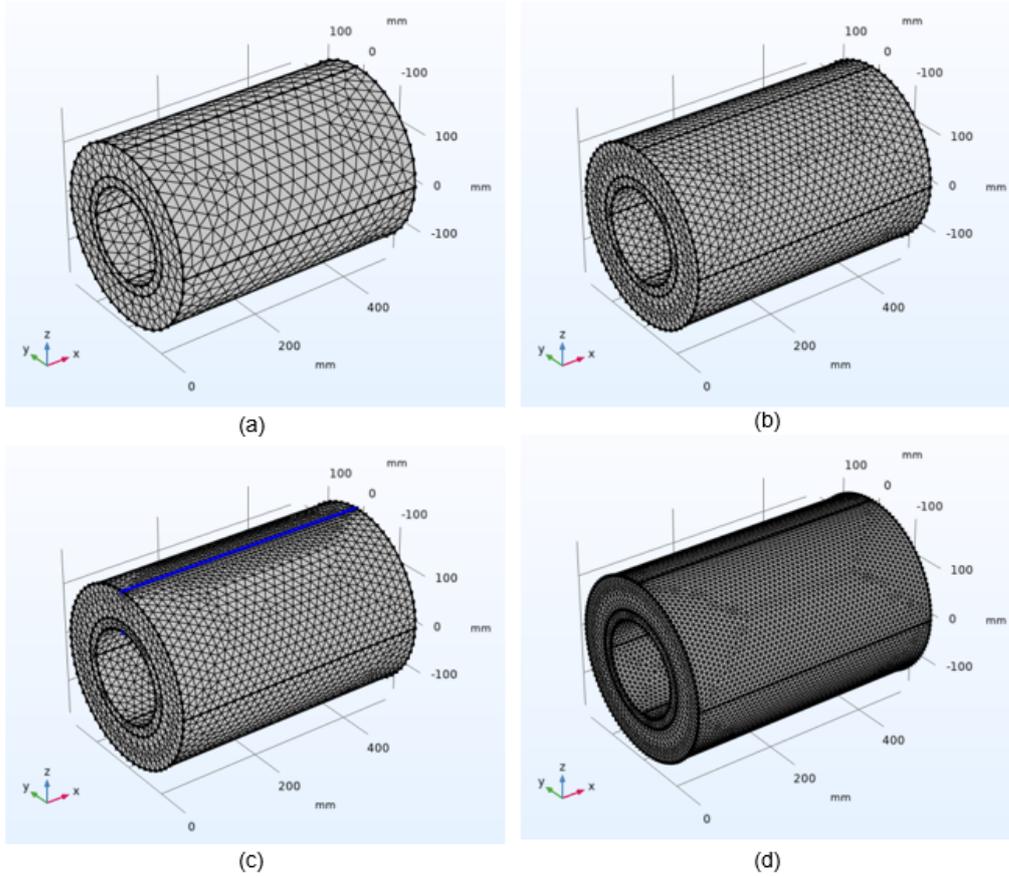


Figura 5.1: Malhas (a) Finer (b) Extra Fine (c) Extra fine + Extremely fine (d) Extremely Fine.

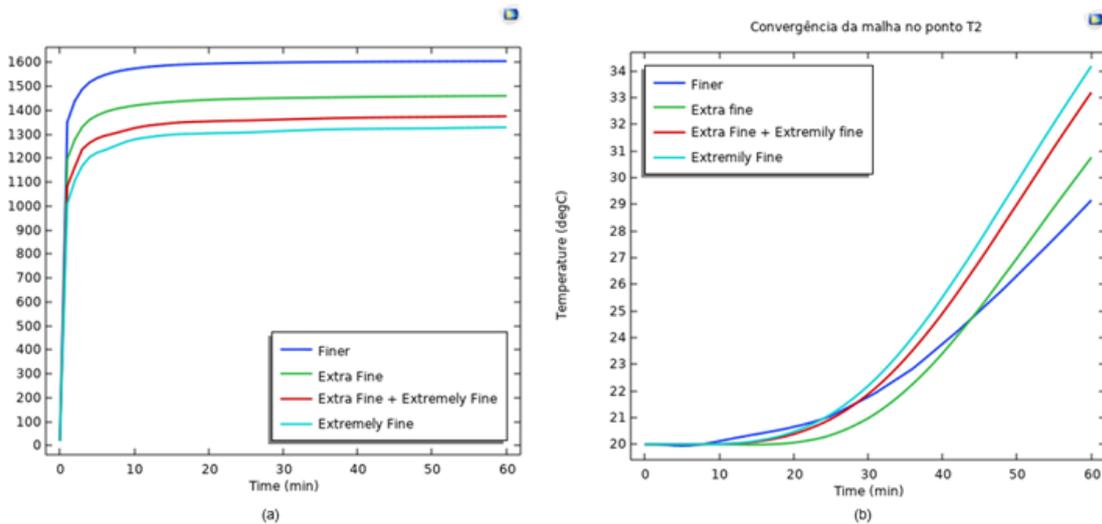


Figura 5.2: (a) Convergência da malha no ponto T1 (b) Convergência da malha no ponto T5

Foram realizados estudos para cada simulação afim de garantir o refinamento adequado da malha. A simulação foi iniciada após a escolha de uma malha. Em seguida, foi realizada outra simulação usando uma malha mais

refinada. Esse procedimento foi realizado para as quatro malhas.

Através dos resultados das simulações térmicas apresentada na Figura 5.2 observa-se que o refinamento da malha provocou alterações significativas na temperatura. Com menos elementos, a malha *Finer* tem um gradiente de temperatura menos suavizado do que as demais. O erro entre as malhas *Extremely fine* e *Extra fine* foi de 10%, dessa forma, foi realizada uma nova simulação gerando uma malha *Extra fine* para toda a geometria com um refinamento *Extremely fine* nas regiões de interesse. A diferença de resultado entre as malhas *Extremely fine* (d) e *Extra fine + Extremely fine* (c) apresenta um erro de aproximadamente 3%. O tempo de simulação foi de 17 minutos e 27 segundos e 6 minutos e 30 segundos, respectivamente. Dessa forma, a malha (c) *Extra Fine + Extremely Fine* foi escolhida para os fins deste estudo, considerando que o tempo de simulação é relativamente baixo e os resultados são satisfatórios.

## 6

### Resultados

Este capítulo apresenta uma análise detalhada da simulação realizada no software *COMSOL Multiphysics*, visando investigar a variação de temperatura em uma tubulação composta por isolante térmico e aço. O estudo foi conduzido sob condições específicas, nas quais um laser com spotsize de 32,9mm e potência de 1600W foi direcionado para incidir sobre a tubulação. A simulação foi realizada ao longo de 300 minutos. O laser foi incidido durante um período de 60 minutos; após esse intervalo, o feixe foi desligado e a troca de temperatura na tubulação foi observada e registrada.

Para a obtenção dos resultados, o capítulo foi dividido em duas partes. Na primeira parte, será realizada uma simulação com a tubulação exposta ao ar, avaliando a temperatura nos pontos internos do duto. Na segunda parte, a simulação será feita para uma tubulação submersa no mar, assumindo a formação de hidratos em seu interior. A temperatura interna será avaliada levando em consideração as condições de contorno do ambiente marítimo, como o coeficiente de convecção e a temperatura ambiente.

#### 6.1

##### Simulação com a tubulação exposta ao ar

A primeira simulação foi realizada considerando a tubulação exposta ao ar, sendo o coeficiente de convecção definido como  $20 W/(m^2K)$  e temperatura inicial de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . O objetivo desta simulação é verificar se o laser utilizado é capaz de fornecer a temperatura necessária para a dissociação do hidrato no interior da tubulação.

A escolha de realizar a simulação no ar deve-se ao fato das perdas de calor serem menos significativas neste ambiente em comparação com o ambiente marítimo. Além disso, o modelo simulado no ar possui uma maior simplicidade, dado que a variação dos parâmetros, como temperatura ambiente e coeficiente de convecção, apresenta-se menos acentuada. Em contraste, no ambiente marítimo, tais parâmetros podem variar consideravelmente, devido a condições extremas de profundidade, pressão e temperatura.

Na simulação, considerando a tubulação exposta ao ar, observa-se uma

distribuição de temperatura extremamente alta na superfície externa do isolante, predominante na área próxima ao ponto de impacto. O baixo coeficiente de convecção do ar, que resulta em um efeito de resfriamento insuficiente, foi a causa desse fenômeno.

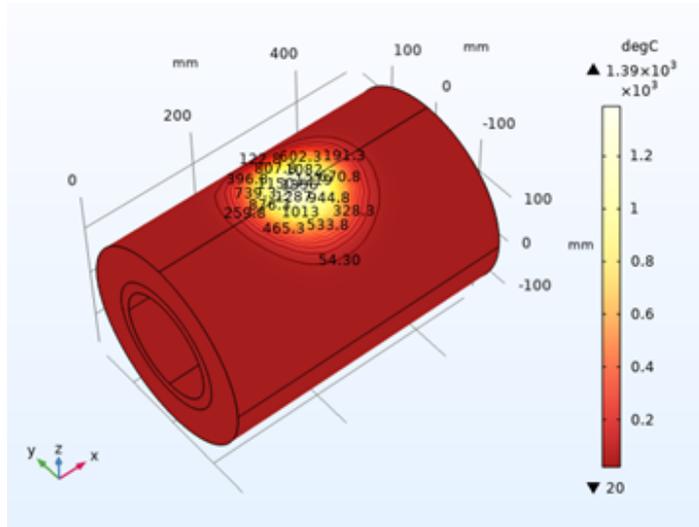


Figura 6.1: Perfil de Temperatura

Com o objetivo de investigar a transferência de calor, foram posicionados 5 sensores dentro da tubulação, representados na figura 6.2. O ponto T1 foi colocado na superfície externa, voltado para o local de incidência do feixe; o ponto T5 está localizado atrás do ponto de impacto do laser. Os pontos T2 e T6 estão localizados a 125 mm do ponto T5, na mesma linha horizontal. O ponto T6 foi posicionado a 90° em relação ao T5, enquanto o ponto T4 está a 180°, com o intuito de observar a distribuição de calor no outro lado da tubulação.

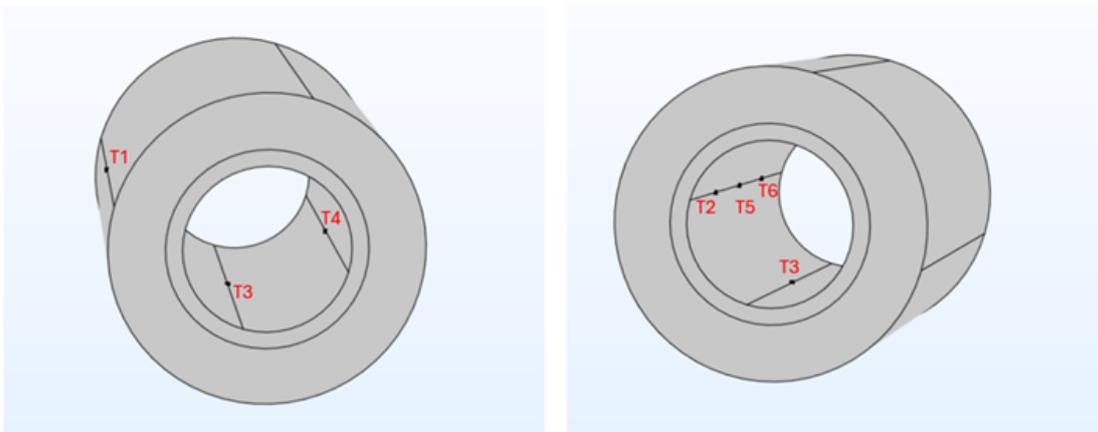


Figura 6.2: Pontos para verificação de temperatura

Para analisar a temperatura no interior da tubulação, foi gerado um gráfico de temperatura em função do tempo 6.3 para os pontos descritos anteriormente.

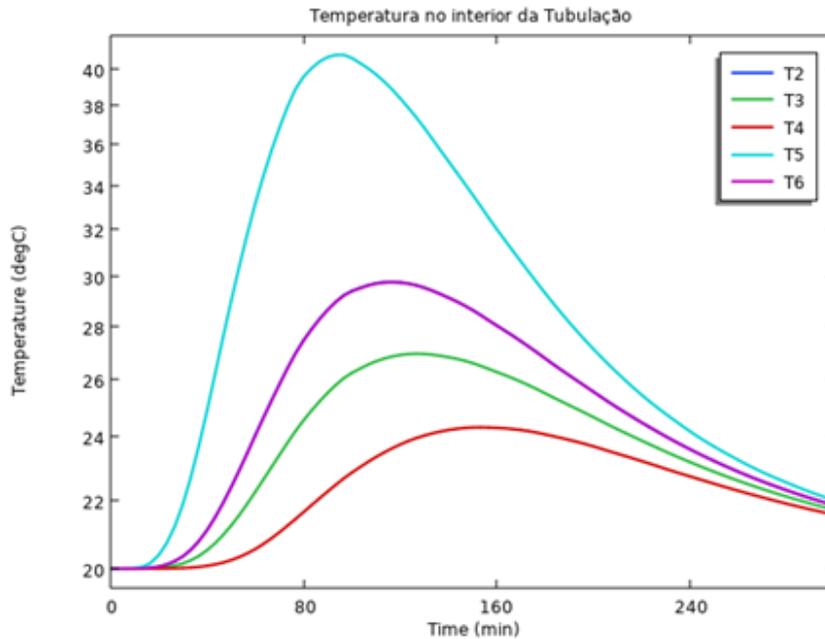


Figura 6.3: Temperatura no interior da tubulação

O tempo de irradiação do laser foi de 60 minutos, após os quais ele foi desligado. Durante esse período, observou-se que os pontos no interior da tubulação ainda não haviam atingido o regime permanente, com o ponto T5 atingindo uma temperatura máxima de 35 °C. Após desligar o laser foi possível observar uma variação na temperatura, devido a troca de calor do isolante com a parede interna da tubulação, alcançando o valor máximo de 40 °C. A temperatura máxima nos pontos T2 e T6 foi de 30 °C, enquanto nos pontos T3 e T4 foi de 27 °C e 24 °C, respectivamente.

Embora o ponto T5 tenha apresentado a maior variação térmica, observou-se que houve um aumento de temperatura em todos os pontos.

## 6.2

### Simulação Considerando a Formação de Hidrato

Os dados de entrada desta nova simulação foram configurados para levar em consideração as condições do mar. Assumimos que o trecho da tubulação está totalmente obstruído pelo hidrato e que a temperatura externa era de 4°C, que representa as condições marítimas. A temperatura interna foi mantida em 15 °C.

O objetivo desta simulação, realizada no *COMSOL Multiphysics*, é determinar se o calor gerado pelo laser é suficiente para atingir a temperatura de dissociação considerando a formação de hidrato.

Como discutido no capítulo 2.1, os hidratos são compostos cristalinos semelhantes ao gelo, dessa forma ele será considerado como sólido mesmo após

a sua dissociação. A Tabela 6.1 apresenta as propriedades Termofísicas do hidrato, que serão utilizadas nas simulações:

Tabela 6.1: Propriedades Termofísicas do Hidrato.

Grandeza	Valor	Unidade
$\rho_{hidrato}$	917	$\frac{kg}{m^3}$
$k_{hidrato}$	0,5	$\frac{W}{mK}$
$C_{p_{hidrato}}$	3600	$\frac{J}{kgK}$

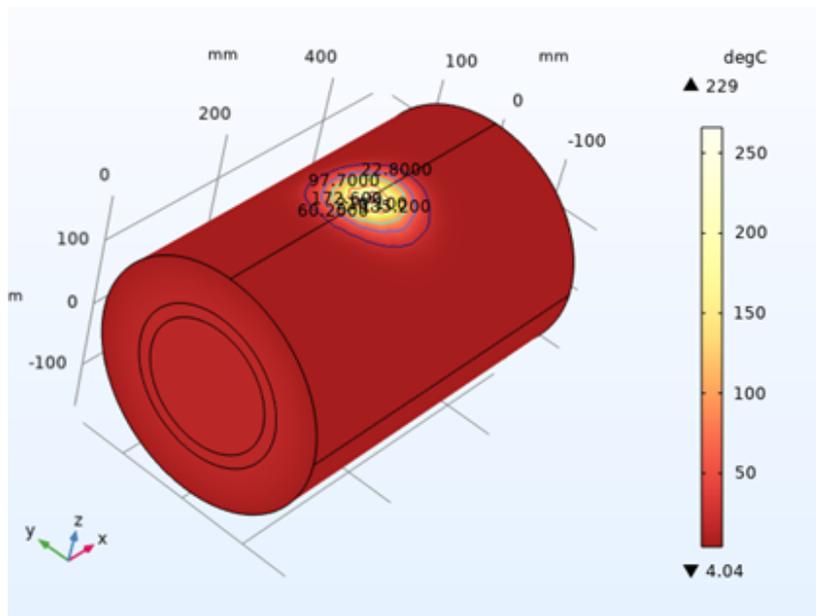


Figura 6.4: Tubulação com formação de hidrato

A Figura 6.4 exibe o comportamento térmico da tubulação para uma potência de 1600 W. Nota-se que, após curtas distâncias a partir da região de incidência, a temperatura da tubulação permanece estável, evidenciando o efeito de focalização do laser. A variação da temperatura da superfície externa é de aproximadamente 180 °C.

O gráfico ilustrado na Figura 6.5 mostra que para as temperaturas analisadas em  $R = R_{in}$  apenas o ponto T4 não alcançou a temperatura de dissociação.

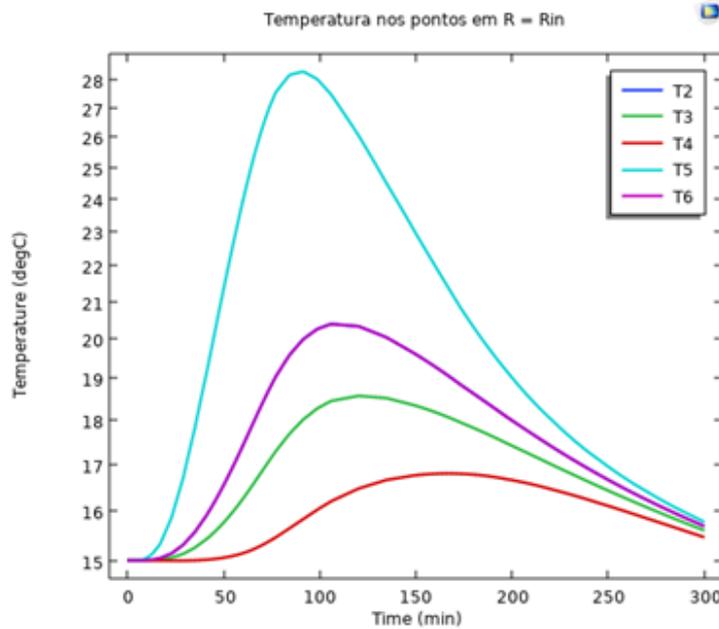


Figura 6.5: Temperatura nos pontos R = Rin

Após realizar a simulação no COMSOL, identificou-se que foi possível alcançar a temperatura desejada de 18°C na parede interna da tubulação, com exceção do ponto T4. No entanto, essa análise se restringiu apenas à parede da tubulação, não considerando a temperatura ao longo da camada de hidrato contida no interior da tubulação.

A próxima etapa do estudo consistirá em investigar a temperatura ao longo da camada de hidrato para verificar se essa região também atingiu a temperatura desejada de 18°C. Para isso, foi gerado um gráfico (Figura 6.6), levando em consideração a distribuição de temperatura ao longo da camada de hidrato, avaliada no tempo  $t = 60$  minutos. O eixo  $x = 0$  representa a superfície do hidrato que está em contato com a região localizada atrás do ponto de impacto do laser.

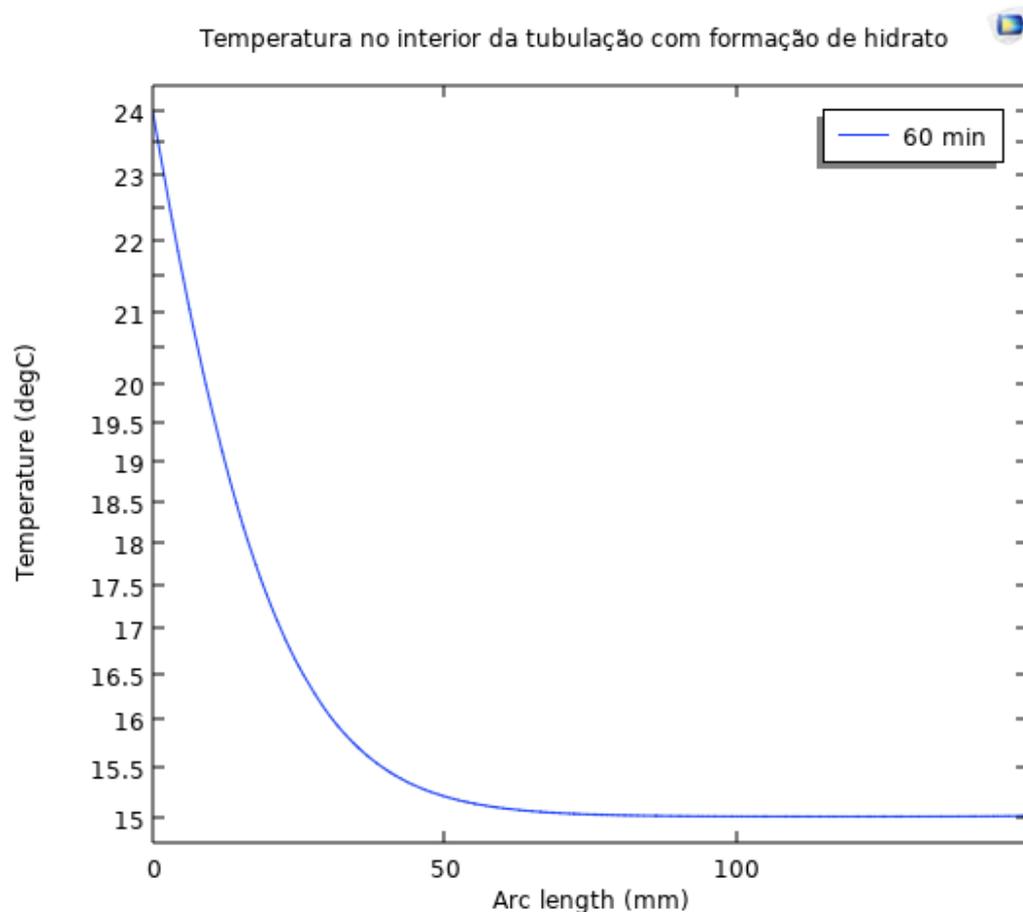


Figura 6.6: Temperatura avaliada no interior do hidrato

Após analisar o gráfico 6.6, observou-se que a temperatura de dissociação desejada não foi alcançada em todo o comprimento do hidrato. A parte mais próxima às paredes internas da tubulação, onde o laser foi incidido, atingiu a temperatura de 18°C, conforme previsto. No entanto, à que medida afastasse das paredes internas, verifica-se que a temperatura de dissociação não é alcançada. Como resultado, apenas a região próxima às paredes internas foi aquecida o suficiente para atingir a temperatura de dissociação, enquanto o restante do hidrato permaneceu abaixo desse limite.

## 7

### Conclusão

O presente estudo teve como objetivo enfrentar os desafios da formação de hidratos em tubulações submarinas por meio da aplicação de transferência de calor gerada por um laser de alta potência. Após a realização das simulações, concluiu-se que a potência do laser utilizada não é suficiente para promover a dissociação dos hidratos. Os gráficos demonstraram que a temperatura de dissociação foi atingida apenas nas proximidades das paredes internas do duto.

Para estudos futuros, recomenda-se considerar o uso de um laser com potência mais elevada, bem como a implementação de um sistema de laser em movimento para garantir que o calor seja distribuído de maneira uniforme ao longo da tubulação. Além disso, é essencial a realização de experimentos em laboratório para validar os métodos numéricos utilizados.

Embora o resultado esperado não tenha sido alcançado, a utilização de laser de alta potência, aliada a uma configuração cuidadosa, mostrou-se promissora como uma estratégia eficiente para a dissociação de hidratos em tubulações submarinas. Essa abordagem pode evitar obstruções e garantir a continuidade dos processos operacionais na indústria de óleo e gás.

## Referências Bibliográficas

- [1] PARRA, D. P.; GRECO DE SOUSA, B.; DE FARIA, G. V.; GOUVEA, P. M.; MOURA, L. F.; TEMPORÃO, G. P.; GONÇALVES, R. T.; SOLA, A. B.; MEDEIROS, K. A.; PANTA, P. E. ; OTHERS. **Simulations and experimental results for a high-power laser tool to dissociate hydrate on oil and gas production equipment in deep water**. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, p. D041S047R004. OTC, 2023.
- [2] ZERPA, L. E.; SALAGER, J.-L.; KOH, C. A.; SLOAN, E. D. ; SUM, A. K.. **Surface chemistry and gas hydrates in flow assurance**. Industrial & Engineering Chemistry Research, 50(1):188–197, 2011.
- [3] SLOAN JR, E. D.; KOH, C. A.. **Clathrate hydrates of natural gases**. CRC press, 2007.
- [4] CARROLL, J.. **Natural gas hydrates: a guide for engineers**. Gulf Professional Publishing, 2020.
- [5] MORALES CARRILLO, I.; DELGADO, O.. **La provincia sur petrolera cubana, un reto para la exploración de hidrocarburos**. Memorias, Trabajos y Resúmenes. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra (Geociencias' 2011). Centro Nacional de Información Geológica, Instituto de Geología y Paleontología de Cuba, La Habana, CD-Rom, 2011.
- [6] TAVARES, J. C.; CABELINO, K.; QUINTAES, M. ; BARAÚNA, L.. **Apostila de equipamentos submarinos**. UNIVEN–2008, 2008.
- [7] AMARAL FILHO, J. H. B.; JUNIOR, F. C. F.; DA MATA, L. C. D.; SARDENHA, C.; DE LEÃO CRAIG, A. P.; SANTANA, A. P. S. C. ; OTHERS. **A utilização do monoetilenoglicol como agente inibidor da formação de hidratos aplicados na indústria do petróleo**. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE, 3(2):11–22, 2016.
- [8] COCHRAN, S.. **Hydrate control and remediation best practices in deepwater oil developments**. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, p. OTC–15255. OTC, 2003.

- [9] DENNEY, D.. **Hydrate-control and-remediation best practices in deepwater oil developments**. Journal of Petroleum Technology, 56(3):52–53, 2004.
- [10] DOS SANTOS, V. C. P.; SANTANDREA, F. M.; DE OLIVEIRA, L. C. S.; SILVA, M. A. L.; DANTAS, L. C. ; SILVA, J. S.. **Hidratos em perfurações de poços com elevação de bombeio por cavidades progressivas**. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS, 6(1):19–19, 2020.
- [11] INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. ; BERGMAN, T. L.. **Fundamentos de Transferência de Calor E de Massa** . Grupo Gen-LTC, 2000.