

ISOLAMENTO TÉRMICO DE EQUIPAMENTOS SUBMARINOS DE  
EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE ÓLEO E GÁS

Paulo Roberto Santos Machado Junior

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

---

Prof. Breno Pinheiro Jacob, D.Sc.

---

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.

---

Prof. José Antonio Fontes Santiago, D.Sc.

---

Prof. Murilo Augusto Vaz, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2008

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

MACHADO JUNIOR, PAULO ROBERTO SANTOS

Isolamento Térmico de Equipamentos Subma-  
rinos de Exploração e Produção de Óleo e Gás [Rio  
de Janeiro] 2008

XV, 101 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,  
Engenharia Civil, 2008)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE

1. Isolamento Térmico
2. Gerenciamento do Escoamento

I. COPPE/UFRJ    II. Título (série)

*Aos meus queridos pais, Paulo e Vânia,  
ao meu irmão Roberto,  
à minha querida namorada Roberta,  
e aos meus familiares e amigos: Amo todos vocês*

## AGRADECIMENTOS

A Deus e a todos meus familiares, por sempre me darem apoio, incentivo, carinho e suporte em todos os momentos da minha vida. Devo tudo a vocês.

À Roberta, amor da minha vida, por incentivar o meu crescimento pessoal, por abrir os meus olhos e me fazer sorrir para a vida.

Ao professor Breno Pinheiro Jacob pela valiosa orientação para a realização desse trabalho e de outros tão importantes para a minha formação como Engenheiro.

Ao professor Murilo Augusto Vaz, por iniciar-me como pesquisador no meio acadêmico, com a minha primeira iniciação científica na área de engenharia *offshore*.

Aos amigos da FMC Technologies.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## ISOLAMENTO TÉRMICO DE EQUIPAMENTOS SUBMARINOS DE EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO DE ÓLEO E GÁS

Paulo Roberto Santos Machado Junior

Julho/2008

Orientador: Breno Pinheiro Jacob

Programa: Engenharia Civil

A exploração de petróleo e gás em águas profundas e ultra-profundas impõe inúmeros desafios à Engenharia. O senso comum trás, de imediato, questões relacionadas à capacidade estrutural dos equipamentos necessários à perfuração, como *risers* de perfuração; à produção, como cabeças de poço e árvores de natal; e à exploração, como *manifolds* e *pipeline end terminations*. Estes devem resistir às elevadas solicitações estruturais pelas quais serão submetidos, mantendo-se as suas funcionalidades.

Há outras solicitações decorrentes do ambiente marinho que devem ser avaliadas e devidamente consideradas nos projetos destes equipamentos: **Solicitações Térmicas**. Estas são tão importantes quanto as estruturais, pelo fato de serem determinantes para a manutenção do escoamento da produção.

O objetivo deste trabalho é mostrar o desenvolvimento do sistema de isolamento térmico de equipamentos submarinos, de forma a manter o livre escoamento da produção de petróleo em águas ultra-profundas.

O Gerenciamento de Escoamento (*Flow Assurance / Management*) procura administrar as inúmeras variáveis que influenciam no desenvolvimento de um sistema submarino de exploração de petróleo, como a formação de hidrato, que bloqueia a passagem do fluido de produção, a formação de parafina, que diminui a seção de escoamento ao longo do tempo e a alta viscosidade de óleos pesados, o que dificulta profundamente o seu escoamento.

A indústria submarina aumentou o foco nas questões referentes ao gerenciamento de escoamento devido aos mais desafiantes ambientes encontrados em campos de águas profundas. Isolamento térmico é parte da solução.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

THERMAL INSULATION OF OIL AND GAS EXPLORATION AND PRODUCTION SUBSEA EQUIPMENT

Paulo Roberto Santos Machado Junior

July/2008

Advisor: Breno Pinheiro Jacob

Department: Civil Engineering

The exploration and production of oil and gas at deep and ultra deep water imposes uncountable challenges to Engineering. The common sense comes up with immediate issues concerning the structural strength of the necessary equipment for drilling, such as drilling risers; production, such as well heads and Christmas trees; and exportation, such as manifolds and pipeline end terminations. They must withstand high structural loading, preserving their functionality. However, another requirement imposed by the marine ambient must be assessed and accounted for in their design: **Thermal Solicitations**. They are as important as the structural ones, since they determine the flow assurance of the production.

The objective of this work is to show the thermal insulation system development for subsea equipment, in order to maintain the free flow of oil and gas production in ultra deep water.

The flow assurance / management is supposed to manage the several variables involved in the development of a subsea production system, such as hydrate formation, which can block the production bore, wax formation, which decreases the flow section through the time and the high viscosity of heavy oils.

The subsea industry has increased the focus on flow management issues significantly due to the more challenging environments encountered in deepwater fields. Thermal insulation is a part of the solution.

# Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Contexto e Motivação	1
1.2	Objetivo	2
1.3	Metodologia	2
1.4	Estruturação do Texto da Dissertação	2
<b>2</b>	<b>EQUIPAMENTOS SUBMARINOS DE PRODUÇÃO E EXPORTAÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS</b>	<b>4</b>
2.1	Introdução	4
2.2	Manifolds	5
2.2.1	Tipos de <i>Manifolds</i>	6
	Quanto à Função Principal	6
	Quanto ao modo de Instalação e Conexão das Linhas de Fluxo	7
2.2.2	Linhas Internas de um <i>Manifold</i>	8
2.2.3	Normalização	8
2.3	Árvores de Natal	9
2.3.1	Evolução do Equipamento	9
2.3.2	Tipos de Árvores de Natal	11
	Quanto à Disposição das Válvulas	11
	Quanto ao Modo de Instalação e Conexão das Linhas de Fluxo	12
2.3.3	Normalização	13
<b>3</b>	<b>GERENCIAMENTO DO ESCOAMENTO DA PRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
3.1	Introdução	14
3.2	Definição de Conceitos de Gerenciamento de escoamento	16
3.3	Hidrato	18
3.3.1	Probabilidade de Formação de Hidrato	20
3.3.2	Notas Importantes	21

3.3.3 Inibidores Químicos de Formação de Hidrato-----	22
<b>4 MATERIAIS TÉRMICO-ISOLANTES, HISTÓRICO E SELEÇÃO -----</b>	<b>23</b>
<b>4.1 Introdução -----</b>	<b>23</b>
<b>4.2 Histórico-----</b>	<b>23</b>
<b>4.3 Descrição dos Materiais-----</b>	<b>27</b>
4.3.1 Elastoméricos Vulcanizados -----	27
4.3.2 Polímeros Termoplásticos -----	27
4.3.3 Resina de Poliuretano -----	28
4.3.4 Lã de Epóxi Rígida-----	28
4.3.5 Epóxi Flexível-----	29
4.3.6 Materiais a Base de Silicone -----	29
4.3.7 Lã de Epóxi e de Fenol para Alta Temperatura -----	29
4.3.8 Elastoméricos de Silicone para Alta Temperatura (> 121 °C) -----	30
<b>4.4 Propriedades Térmicas, Mecânicas e de Aplicação dos Materiais-----</b>	<b>32</b>
4.4.1 Propriedades Térmicas -----	32
4.4.2 Propriedades Mecânicas -----	33
4.4.3 Testes de Qualificação -----	34
<b>4.5 Seleção do Material Térmico-Isolante -----</b>	<b>36</b>
4.5.1 Introdução-----	36
4.5.2 Cargas Mecânicas -----	36
Instalação -----	36
Cargas de Impacto-----	37
4.5.3 Cargas Térmicas -----	37
4.5.4 Aplicação do Material -----	38
4.5.5 Absorção de Água-----	38
4.5.6 Hidrólise -----	38
4.5.7 Fluxograma para Seleção -----	39
<b>5 FORMULAÇÃO E MODELAGEM COMPUTACIONAL -----</b>	<b>40</b>
<b>5.1 Transferência de Calor-----</b>	<b>40</b>
5.1.1 Condução -----	40
5.1.2 Convecção -----	41

5.1.3 Irradiação -----	42
<b>5.2 Tipos de Análise e Modelagem Computacional-----</b>	<b>43</b>
5.2.1 Introdução-----	43
5.2.2 Métodos de Análise-----	43
Modelagem Unidimensional-----	44
Modelagem Bi-dimensional Versus Tri-dimensional -----	46
Análise Tri-dimensional por Meio do Método dos Elementos Finitos -----	47
Análise Tri-dimensional por Meio do Método dos Volumes Finitos – Dinâmica dos Fluidos Computacional -----	48
5.2.3 Metodologia Adotada-----	49
<b>6 GERAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA ANÁLISE DO ISOLAMENTO TÉRMICO DE EQUIPAMENTOS SUBMARINOS PELO MEF -----</b>	<b>50</b>
<b>6.1 Metodologia para o Cálculo dos Dados de Entrada -----</b>	<b>50</b>
6.1.1 Convecção Forçada em Espaço Infinito -----	51
6.1.2 Convecção Natural em Espaço Infinito -----	52
6.1.3 Convecção Natural em Espaço Finito - Condutividade Térmica Equivalente-----	53
<b>6.2 Modelagem por Elementos Finitos -----</b>	<b>55</b>
6.2.1 Elemento Finito-----	56
6.2.2 Tipos de Análises-----	56
Análise de Máxima Temperatura (Regime Permanente) -----	57
Análise de Resfriamento/Parada de Produção (Regime Transiente)-----	57
<b>7 APLICAÇÃO: ISOLAMENTO TÉRMICO DE UMA ANM -----</b>	<b>59</b>
<b>7.1 Introdução -----</b>	<b>59</b>
<b>7.2 Cenário -----</b>	<b>60</b>
<b>7.3 Descrição dos Modelos de Elementos Finitos-----</b>	<b>61</b>
7.3.1 Componentes Modelados da ANM -----	62
7.3.2 Hipóteses Assumidas para as Análises de Elementos Finitos -----	65
<b>7.4 Dados de Entrada para as Análises de Elementos Finitos-----</b>	<b>66</b>
<b>7.5 Condições de Contorno -----</b>	<b>67</b>
7.5.1 Condições de Contorno para as Análises em Regime Permanente -----	67

7.5.2 Condições de Contorno para as Análises em Regime Transiente-----	69
<b>7.6 Resultados-----</b>	<b>70</b>
7.6.1 Concepção 1-----	70
Descrição do Modelo -----	70
Malha de Elementos Finitos -----	71
Resultados – Regime Permanente (Operação)-----	72
Resultados – Regime Transiente (Parada de Produção)-----	75
7.6.2 Concepção 2-----	78
Descrição do Modelo -----	78
Malha de Elementos Finitos -----	82
Resultados – Regime Permanente (Operação)-----	83
Resultados – Regime Transiente (Parada de Produção)-----	86
<b>7.7 Análise de Sensibilidade da Malha de Elementos Finitos-----</b>	<b>89</b>
7.7.1 Descrição do Modelo-----	89
7.7.2 Malha de Elementos Finitos-----	89
Comparação de Resultados -----	91
<b>8 CONCLUSÕES-----</b>	<b>95</b>
<b>8.1 Síntese do Trabalho-----</b>	<b>95</b>
<b>8.2 Comentários -----</b>	<b>97</b>
<b>8.3 Sugestões para Trabalhos Futuros -----</b>	<b>99</b>
<b>9 REFERÊNCIAS-----</b>	<b>100</b>

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Inibidores ativos de formação de hidrato.....	22
Tabela 2: Primeiros materiais térmico-isolantes utilizados pela indústria petrolífera.....	24
Tabela 3: Materiais térmico-isolantes correntes.....	30
Tabela 4: Propriedades térmicas dos materiais térmico-isolantes.....	33
Tabela 5: Resultados típicos de testes de qualificação de materiais térmico-isolantes [9].....	35
Tabela 6: Propriedades térmicas e físicas dos materiais considerados nas análises de Elementos Finitos.....	66
Tabela 7: Malha de Elementos Finitos – Conceção 1.....	71
Tabela 8: Malha de Elementos Finitos – Conceção 2.....	82
Tabela 9: Malha de Elementos Finitos – Modelo Refinado.....	89
Tabela 10: Resultados Comparados, Conceção 2 – Modelo Refinado.....	92

## Lista de Figuras

Figura 1: Sistema de Produção Submarino.....	4
Figura 2: <i>Manifold</i> do tipo MSPI.....	6
Figura 3: Conexão de uma linha, com a utilização de ROV.....	7
Figura 4: Exemplo de <i>pig</i> .....	8
Figura 5: Árvore de Natal Convencional (ANC).....	10
Figura 6: Árvore de Natal GLL-5, para uma profundidade de 2500 metros.....	10
Figura 7: Classificação das ANM's quanto à disposição das válvulas.....	11
Figura 8: Organograma de estudos no desenvolvimento de um sistema submarino de produção de petróleo [9]. ....	14
Figura 9: Parâmetros estudados no desenvolvimento de um sistema submarino de produção de petróleo. ....	15
Figura 10: Moléculas de água (azul e vermelha) e pontes de hidrogênio (azul), aprisionando moléculas de gás (verde) → hidrato formado. ....	19
Figura 11: Formação de hidrato. ....	19
Figura 12: Cristais de hidrato e a remoção de um bloqueio de hidrato em um tubo. ....	20
Figura 13: Região com alta probabilidade de formação de hidrato (região vermelha). ....	20
Figura 14: Gráfico pressão x temperatura - regiões crítica e livre de formação de hidrato. ....	21
Figura 15: Aplicação do material térmico-isolante Tymar 10K. ....	25
Figura 16: Aplicação do material térmico-isolante uretano sintético. ....	25
Figura 17: Aplicação do material térmico-isolante NovoTherm. ....	26
Figura 18: Aplicação do isolamento Novolastic HT.....	26
Figura 19: Fluxograma para seleção do material térmico-isolante [9]. ....	39
Figura 20: Esquema de modelagem unidimensional. ....	44
Figura 21: Modelagem bidimensional. ....	46
Figura 22: Modelagem tridimensional pelo MEF.....	47
Figura 23: Modelagem tri-dimensional por CFD. ....	48
Figura 24: Elemento finito tetraédrico de 10 nós.....	56
Figura 25: ANM do Projeto Mexilhão.....	62
Figura 26: ANM em vista lateral, com o módulo de <i>choke</i> e um corte. ....	62
Figura 27: Modelo inicial de Elementos Finitos – Componentes.....	63

Figura 28: Parte metálica do modelo de Elementos Finitos. ....	64
Figura 29: Condições de contorno adiabáticas nos modelos. ....	68
Figura 30: Volumes representando o fluido de produção (gás). ....	69
Figura 31: Isolamento em torno dos sensores – Concepção 1. ....	70
Figura 32: Malha de elementos finitos – Concepção 1. ....	71
Figura 33: Distribuição de temperaturas durante operação – Concepção 1. ....	73
Figura 34: Distribuição de temperaturas (isolamento não mostrado) – Concepção 1. ....	73
Figura 35: Distribuição de temperaturas em corte transversal do bloco de válvulas, durante operação – Concepção 1. ....	74
Figura 36: Temperatura nos componentes elastoméricos – Concepção 1. ....	74
Figura 37: Temperaturas do gás após 2 horas de parada de produção – Concepção 1. ....	76
Figura 38: Temperaturas do gás após 4 horas de parada de produção – Concepção 1. ....	76
Figura 39: Temperaturas do gás após 6 horas de parada de produção – Concepção 1. ....	77
Figura 40: Espessuras da camada de isolamento – Concepção 2. ....	80
Figura 41: Modelo de Elementos Finitos – Concepção 2. ....	80
Figura 42: Modelo de Elementos Finitos – Concepção 2. ....	81
Figura 43: Malha de elementos finitos – Concepção 2. ....	82
Figura 44: Distribuição de temperaturas durante operação – Concepção 2. ....	84
Figura 45: Distribuição de temperaturas (isolamento não mostrado) – Concepção 2. ....	84
Figura 46: Distribuição de temperaturas em corte transversal do bloco de válvulas, durante operação – Concepção 2. ....	85
Figura 47: Temperatura nos componentes elastoméricos – Concepção 2. ....	85
Figura 48: Temperaturas do gás após 2 horas de parada de produção – Concepção 2. ....	87
Figura 49: Temperaturas do gás após 4 horas de parada de produção – Concepção 2. ....	87
Figura 50: Temperaturas do gás após 6 horas de parada de produção – Concepção 2. ....	88
Figura 51: Malha de elementos finitos – Modelo Refinado. ....	90
Figura 52: Comparação entre malhas da Concepção 2 e do Modelo Refinado. ....	90
Figura 53: Pontos de monitoramento da temperatura. ....	91
Figura 54: Temperatura ao longo de seis horas de parada, para a PMV - Comparação entre Concepção 2 e do Modelo Refinado. ....	92

Figura 55: Temperatura ao longo de seis horas de parada, para o mandril - Comparação entre Concepção 2 e do Modelo Refinado.....	93
Figura 56: Temperatura ao longo de seis horas de parada, para o <i>choke</i> - Comparação entre Concepção 2 e do Modelo Refinado.....	93
Figura 57: Temperatura ao longo de seis horas de parada, para a MCV - Comparação entre Concepção 2 e do Modelo Refinado.....	94
Figura 58: Temperatura ao longo de seis horas de parada - Comparação entre Concepção 2 e do Modelo Refinado.....	94

## Abreviações e Siglas

Abreviação / Sigla	Descrição
ANC	Árvore de Natal Convencional
ANM	Árvore de Natal Molhada
BAP	Base Adaptadora de Produção
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional ( <i>Computed Fluid Dynamics</i> )
MCV	Módulo de Conexão Vertical
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEG	Monoetileno Glicol
MSI	<i>Manifold</i> de Injeção De Água
MSP	<i>Manifold</i> de Produção
MSPI	<i>Manifold</i> Misto
PMV	Válvula Máster ( <i>Primary Master Valve</i> )
PT	Pressão e Temperatura
ROV	Veículo Operado Remotamente ( <i>Remote Operated Vehicle</i> )
SCM	Módulo de Sistema de Controle ( <i>System Control Module</i> )
SSP	Sistema Submarino de Produção de Petróleo
TFH	Temperatura Crítica de Formação de Hidrato

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto e Motivação

Com o avanço das atividades de produção de petróleo em águas cada vez mais profundas, os desafios à Engenharia são enormes e demandam tecnologias inovadoras para superá-los. A indústria petrolífera vem, ao longo dos últimos anos, caminhando para a exploração em regiões marinhas cada vez mais inóspitas e, diferentemente da produção terrestre (*onshore*), que não caminha para condições mais difíceis de exploração, a exploração *offshore* está fadada ao desenvolvimento contínuo das suas técnicas e equipamentos.

Os desafios relacionados à manutenção do escoamento da produção de um Sistema Submarino de Produção (SSP) são diretamente proporcionais ao avanço da produção em águas ultra-profundas. As novas descobertas do Brasil de reservatórios de óleo e gás, abaixo da camada quilométrica de pré-sal, aumentam ainda mais estes desafios. Quanto mais profundo se produz, mais baixa é a temperatura marinha, acarretando no resfriamento mais acentuado dos equipamentos submarinos, que por sua vez, aumenta a probabilidade de ocorrência de problemas como a formação de hidrato e incrustações no sistema.

A manutenção ou uma perda lenta da energia térmica armazenada nos equipamentos têm sido o foco principal dos estudos promovidos por empresas e centros de pesquisa em todo o mundo. Algumas soluções vem sendo desenvolvidas e testadas, de forma a galgar os problemas relacionados ao escoamento da produção de SSP's, como, por exemplo, sistemas com resistências elétricas e aplicação de corrente elétrica no sistema submarino ou em parte dele, visando a manutenção deste aquecido o bastante para evitar a ocorrência de problemas. Estas, contudo, têm-se mostrado inviáveis, técnica e economicamente.

A utilização de materiais térmico-isolantes ainda é a solução corrente, sendo amplamente adotada e ainda estudada, principalmente no desenvolvimento de materiais com melhor performance térmica e mecânica, além de processos de cura e aplicação mais simplificados e baratos.

## **1.2 Objetivo**

Nesse contexto, esta dissertação abordará os materiais térmico-isolantes mais utilizados pela indústria petrolífera e os estudos de Gerenciamento de Escoamento que definem os requisitos técnicos para o sistema de isolamento de um SSP. Apresenta-se o desenvolvimento do sistema de isolamento térmico para o equipamento submarino de exploração de petróleo e gás denominado Árvore de Natal Molhada (ANM). Este equipamento foi o escolhido, por estar sempre presente em qualquer sistema submarino de produção. A filosofia de projeto mostrada abrange todos os equipamentos utilizados em um SSP.

Assim, o objetivo deste trabalho é mostrar o desenvolvimento do sistema de isolamento térmico de equipamentos submarinos, desde o estudo de gerenciamento de escoamento e seleção do material térmico-isolante a ser utilizado, até a definição final do *layout* do sistema de isolamento térmico, com o objetivo de assegurar o livre escoamento da produção de óleo e gás em águas ultra-profundas.

## **1.3 Metodologia**

Para alcançar os objetivos propostos, simulações computacionais baseadas no Método dos Elementos Finitos foram realizadas, contemplando-se a geometria de uma ANM, o fluido de produção contido nela e o sistema de isolamento térmico.

## **1.4 Estruturação do Texto da Dissertação**

O Capítulo 2 desta dissertação menciona os equipamentos submarinos comumente utilizados na composição de um SSP e descreve os equipamentos denominados *Manifolds* e Árvore de Natal.

O Capítulo 3 aborda questões relacionadas ao Gerenciamento de Escoamento da produção de um SSP. Esta área de estudo é de extrema relevância para a viabilidade técnica e econômica dos sistemas submarinos. O sistema de isolamento térmico de um

equipamento submarino, foco desta dissertação de mestrado, é desenvolvido para atender a requisitos técnicos definidos pelos estudos de Gerenciamento de Escoamento.

O Capítulo 4 resume o histórico do desenvolvimento e aplicação de materiais térmico-isolantes na indústria petrolífera, descreve os materiais mais comumente utilizados e discute as suas propriedades físicas e térmicas relevantes no desenvolvimento do isolamento térmico de equipamentos submarinos. Por fim, este capítulo expõe o processo de seleção do material térmico-isolante mais apropriado para uma determinada aplicação.

O Capítulo 5 expõe a teoria física no qual o problema de engenharia de transferência de calor de um SSP para o ambiente marinho está inserido. Os modos de transferência de calor são sucintamente explicados e as suas equações básicas listadas. Este capítulo também aborda os métodos de solução mais utilizados, bem como os tipos de modelagem do problema.

O Capítulo 6 descreve a metodologia para o cálculo dos dados de entrada utilizados em análises térmicas baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF). A modelagem baseada neste método numérico é exposta, com a descrição do elemento finito utilizado e os tipos de análises efetuadas.

No Capítulo 7 desta dissertação de mestrado, o desenvolvimento do sistema de isolamento térmico de um equipamento pertencente a um SSP é exposto, por meio da aplicação do isolamento para uma Árvore de Natal Molhada (ANM)

No Capítulo 8, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros de pesquisa.

## 2 EQUIPAMENTOS SUBMARINOS DE PRODUÇÃO E EXPORTAÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS

### 2.1 Introdução

Sistemas submarinos de exploração e exploração de petróleo e gás são compostos por inúmeros equipamentos, desde o poço, onde o fluido de produção será extraído do solo marinho, através do equipamento chamado cabeça de poço, passando por uma base adaptadora de produção (BAP). Sobre este, instala-se o equipamento popularmente denominado árvore de natal molhada (ANM), chamado assim porque as primeiras árvores de natal, projetadas para a exploração terrestre de poços de petróleo em regiões frias, lembravam a forma de árvores de natal, quando cobertas por neve, e molhada, para especificar que o equipamento é residente no fundo do mar, diferentemente das localizadas nas plataformas fixas de produção. Após a árvore, uma infinidade de arranjos de sistema pode ser configurada, desde a ligação direta da árvore com a unidade produção (plataforma), à ligação com *manifolds*, *jumpers* rígidos e PLET's (*Pipeline End Termination*).

A Figura 1 mostra um sistema de produção submarino. Este trabalho descreverá mais profundamente os *manifolds* e as árvores de natal.

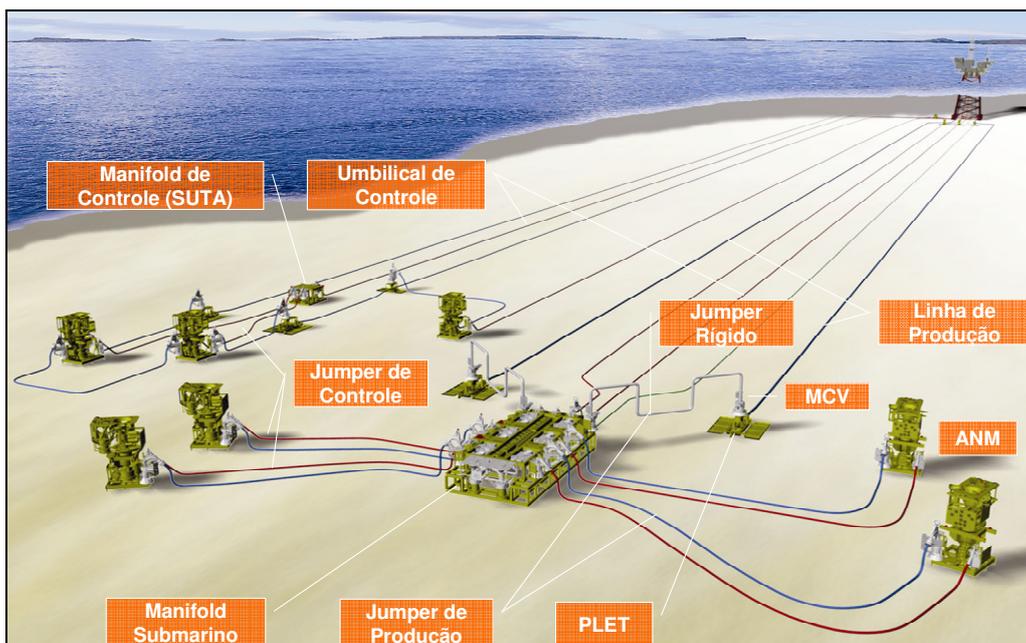


Figura 1: Sistema de Produção Submarino.

## 2.2 Manifolds

Os equipamentos denominados *manifolds* são basicamente uma “caixa de válvulas”, com o objetivo principal de receber a produção de vários poços, direcionando o fluxo para uma plataforma [14].

Além de válvulas, estes equipamentos podem possuir sensores, sistema de controle de fluxo, sistema de controle elétrico-hidráulico (SCM), dispositivos mecânicos, hidráulicos e elétricos.

Quando o sistema de controle elétrico-hidráulico está instalado no manifold e não nas árvores de natal do sistema submarino, este é classificado como um ***Manifold Inteligente***.

Há algumas vantagens com a utilização de *manifolds*, em um sistema submarino de produção, tais como:

- Redução dos custos dos dutos;
- Redução do número de *risers* na plataforma;
  - Redução de cargas estruturais
  - Redução do espaço necessário para a composição do SSP
- Antecipação da produção;
- Otimização do arranjo submarino;

Como desvantagens, têm-se:

- Redução da confiabilidade do sistema (mais componentes suscetíveis á falha);
- Mais pontos suscetíveis a vazamento no sistema;

### 2.2.1 Tipos de *Manifolds*

Os *manifolds* são classificados quanto à sua função principal e quanto ao tipo de conexão destes com as linhas [14], como descrito a seguir.

#### Quanto à Função Principal

- *Manifold* de Produção (MSP): *Manifold* com a principal função de **coletar** a produção de vários poços. Normalmente apresentam as funções conjugadas de distribuição de gás (*gas lift*) e produtos químicos;
- *Manifold* de Injeção de Água (MSI): *Manifold* com a principal função de **distribuir água** para os poços de injeção;
- *Manifold* de *Gas Lift* (MSGL): *Manifold* com a principal função de **distribuir gás** para injeção no anular dos poços de produção ou diretamente no reservatório;
- *Manifold* Misto (MSPI): *Manifold* que tem simultaneamente as características dos MSP's e MSI's;

A Figura 2 mostra um *manifold* do tipo MSPI:

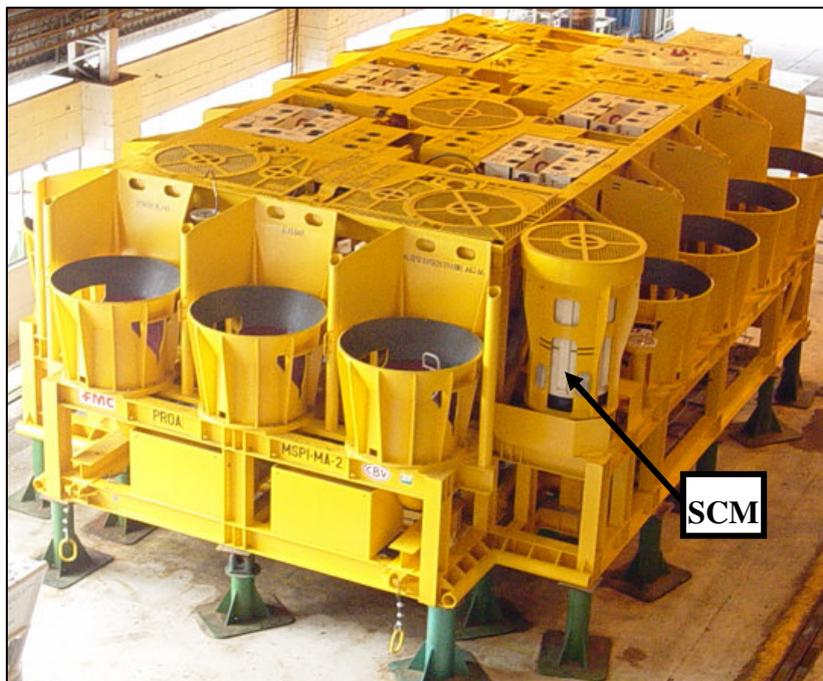


Figura 2: *Manifold* do tipo MSPI.

### Quanto ao modo de Instalação e Conexão das Linhas de Fluxo

Os *manifolds* podem ser classificados em dois tipos, quanto ao modo de instalação e conexão das linhas de fluxo, listados a seguir:

- DA (*Diver Assisted*): Todas as linhas são conectadas ao *manifold*, com a utilização de mergulhadores, a profundidades de operação de até 300m;
- DL (*Diverless*): Mergulhadores não são utilizados em nenhum serviço. As conexões são feitas com a descida da linha por cabo ou com a utilização de ROV's;

A Figura 3 mostra uma operação de conexão horizontal de uma linha, com a utilização de um ROV.

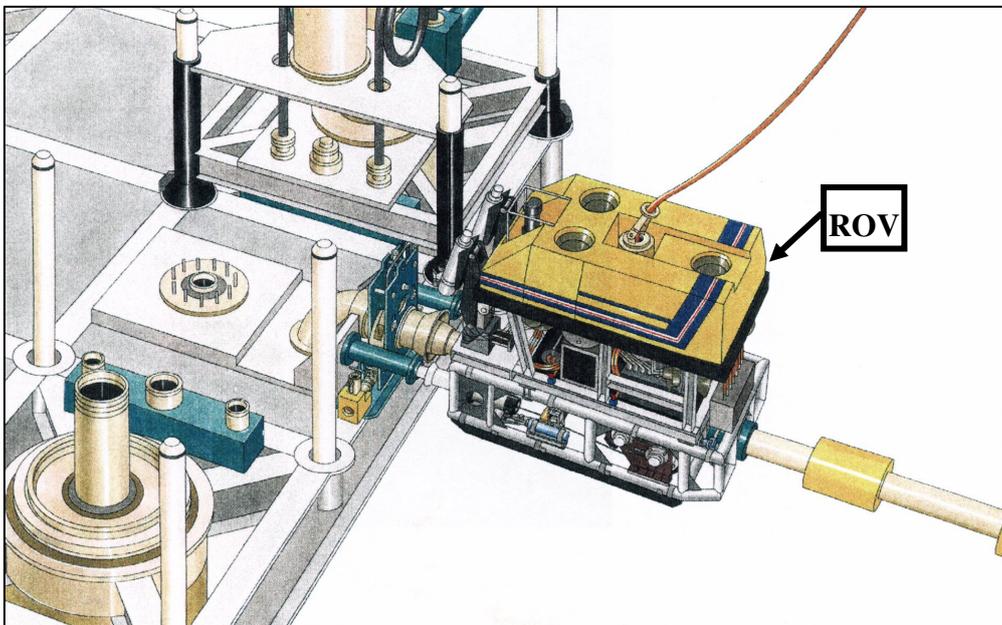


Figura 3: Conexão de uma linha, com a utilização de ROV.

### 2.2.2 Linhas Internas de um *Manifold*

Além das linhas de fluxo do fluido de produção, linhas auxiliares compõem o sistema de tubulações de um *manifold*:

- Linha de Serviço: Usada para passagem de *pig* (desentupidor e avaliador de linhas, vide Figura 4) e limpeza da tubulação e linhas flexíveis (remoção de parafina, incrustações, etc.);
- Linhas de injeção de etanol: Tem por função inibir a formação de hidrato;
- Linhas de injeção química: Permite a injeção de anti-corrosivos, anti-incrustantes, etc.;

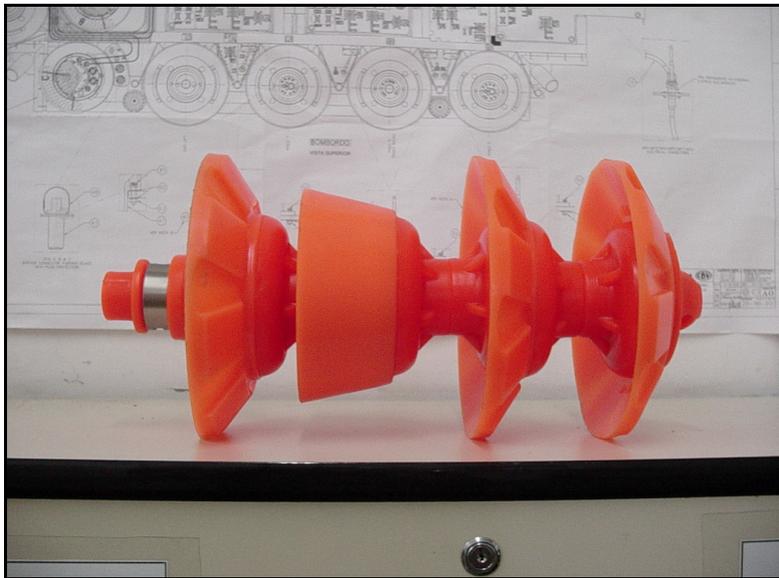


Figura 4: Exemplo de *pig*.

### 2.2.3 Normalização

Não há normas específicas para projetos de *manifolds*. Em geral, as empresas que encomendam e as que projetam e fabricam estes equipamentos possuem normas e especificações próprias.

A norma API RP-2A: *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms* [3] é utilizada para o projeto estrutural destes equipamentos, embora não seja específica para esta aplicação.

## 2.3 Árvores de Natal

Uma definição atual do equipamento submarino árvore de natal comumente utilizada [15], descreve este equipamento como um sistema para o controle da produção de petróleo nos seus diversos estados, constituído basicamente de válvulas gaveta, podendo incluir sistema de controle de fluxo, SCM, dispositivos mecânicos, hidráulicos e elétricos.

Há duas vertentes principais de filosofia do projeto destes equipamentos: quando o SCM está localizado na ANM, esta é denominada como uma **ANM Inteligente**. Esta vertente é largamente utilizada no Mar do Norte e Golfo do México. Quando o SCM se localiza em outro equipamento pertencente ao sistema submarino, geralmente em um *manifold*, a árvore é denominada como uma **ANM Não Inteligente**. Esta vertente é adotada na África e em todas as árvores da Petrobrás, no Brasil.

### 2.3.1 Evolução do Equipamento

Desde a década de 70, quando as primeiras árvores de natal foram projetadas e instaladas, a evolução destes equipamentos, bem como de todos os demais inerentes à indústria do petróleo, foi e continua sendo imensa.

As primeiras árvores de natal, segundo Martins [15], chamadas Árvores de Natal Convencionais (ANC) eram compostas basicamente de válvulas gaveta e, quando aplicável, de sistema de controle hidráulico e ou pneumático. A utilização de trabalhadores, para a execução de trabalhos manuais era intensa, como o fechamento/abertura de válvulas. A Figura 5 mostra uma ANC.

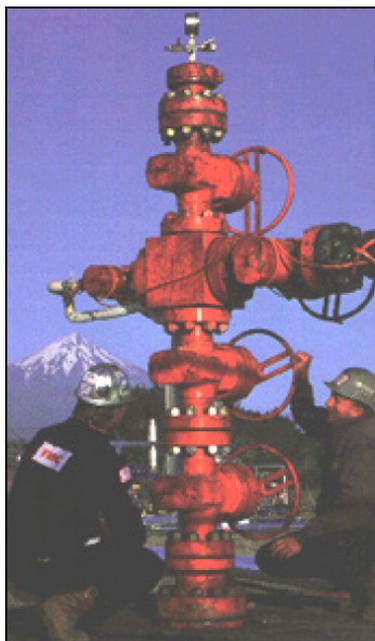


Figura 5: Árvore de Natal Convencional (ANC).

Nos dias atuais, as árvores de natal são projetadas para operar a profundidades em torno de 2000 metros, onde os trabalhos manuais são humanamente impossíveis. Estes são substituídos por operações executadas com a utilização de veículos remotamente operados (ROV, na sigla inglesa). Outros serviços são executados por pessoal capacitado, localizados na plataforma que administra o equipamento. Em 2001, a Petrobras instalou uma árvore de natal a 2500 m de profundidade, na Bacia de Campos. A Figura 6 mostra esta árvore:



Figura 6: Árvore de Natal GLL-5, para uma profundidade de 2500 metros.

### 2.3.2 Tipos de Árvores de Natal

As ANM's podem ser classificadas segundo duas classes descritas a seguir.

#### Quanto à Disposição das Válvulas

Quanto à disposição das válvulas, as árvores são classificadas como **verticais**, quando as válvulas da árvore são arranjadas verticalmente, acima do suspensor de coluna (componente que suporta o peso de toda a coluna de produção abaixo da árvore) e **horizontais**, quando o fluido de produção passa do suspensor de coluna, para o *flowline* de produção, através de válvulas montadas na posição horizontal. A Figura 7 mostra a configuração destes dois tipos de árvore:

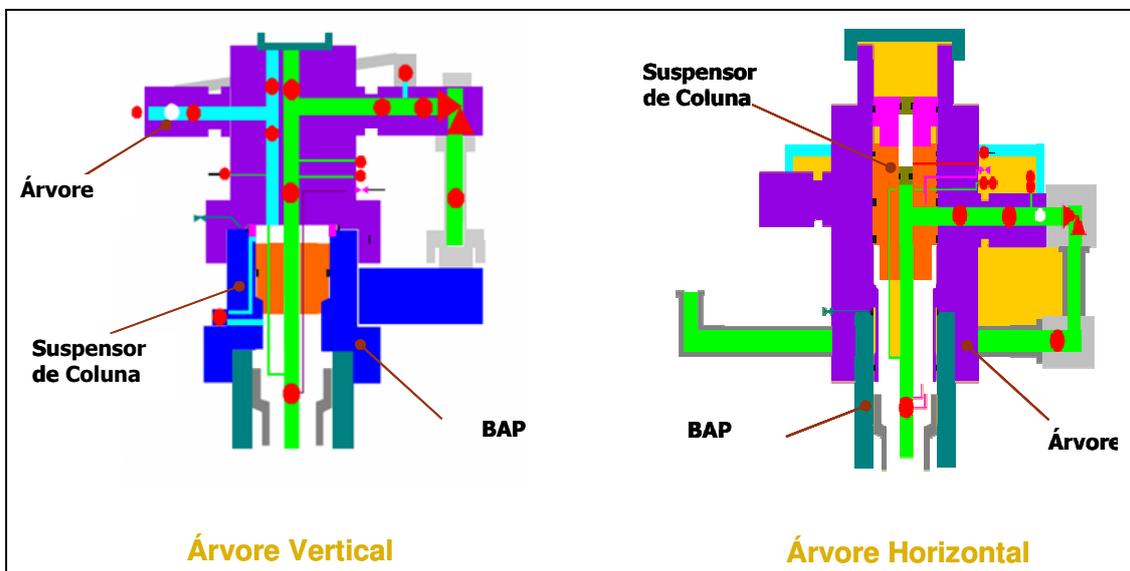


Figura 7: Classificação das ANM's quanto à disposição das válvulas.

### **Quanto ao Modo de Instalação e Conexão das Linhas de Fluxo**

As árvores de natal podem ser classificadas em cinco tipos, quanto ao modo de instalação e conexão das linhas de fluxo, listados a seguir [15]:

- DO (*Diver Operated*): utilizadas em poços perfurados e completados com sondas do tipo *jack-up*, a profundidades de operação de até 120 m. A operação de descida é feita com um cabo guia e o uso de mergulhadores é intenso na abertura e fechamento das válvulas e travamento/destravamento de conectores;
- DA (*Diver Assisted*): utilizadas em poços perfurados e completados com sondas semi-submersíveis (SS) ou navios-sonda (NS), a profundidades de operação de até 300 m. Todas as válvulas de controle possuem atuadores, os conectores são hidráulicos, a operação de descida é feita com um cabo guia e o uso de mergulhadores é restrito basicamente à conexão das linhas de fluxo e controle;
- DLP (*Diverless Pull-In*): utilizadas em poços perfurados e completados com sondas semi-submersíveis (SS) ou navios-sonda (NS), a profundidades de operação de até 400 m. Todas as válvulas de controle são com atuador, os conectores são hidráulicos, a operação de descida é feita com um cabo guia e não faz uso de mergulhadores. A conexão das linhas de fluxo e controle são feitos através de ferramentas de operação bastante difícil, o que determinou o abandono deste conceito pela indústria petrolífera em geral;
- DLL (*Diverless Lay-Away*): com características praticamente idênticas à DLP, contudo estas ANM's já descem com as linhas de fluxo e controle conectadas, incorporam o conceito de uso de BAP e, durante a descida da ANM, existe a necessidade do trabalho conjunto da sonda e do navio lançador de linhas;
- GLL (*Diverless Guidelineless*): utilizadas em poços perfurados e completados com sondas de posicionamento dinâmico ou ancoradas, possibilitam profundidades de operação acima de 300 m. A guia por cabos foi substitu-

ída pelo conceito de funil, utiliza o conceito de BAP e a conexão das linhas de fluxo pode ser do tipo *lay-away*, conexão vertical indireta (CVI), conexão vertical direta (CVD) e módulo de conexão vertical (MCV), sendo este tipo de conexão o mais utilizado no Brasil, primordialmente pela Petrobras.

Os resultados desta dissertação de mestrado serão baseados no modelo de árvore do tipo GLL.

### **2.3.3 Normalização**

Duas normas internacionais são primordialmente adotadas para o desenvolvimento do projeto de uma árvore de natal. Ambas são do Instituto Americano de Petróleo (API), listadas a seguir:

- API 6A – ISO 10423 - *Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment* [1].
- API 17D – *Specification for Subsea Wellhead and Christmas Tree Equipment* [2].

# 3 GERENCIAMENTO DO ESCOAMENTO DA PRODUÇÃO

## 3.1 Introdução

O Gerenciamento do escoamento da produção tem impacto direto na operabilidade dos sistemas submarinos de exploração de óleo e gás. Os equipamentos submarinos de exploração são apenas um dos vários parâmetros a serem considerados no projeto de um campo. O organograma mostrado na Figura 8 ilustra a organização dos parâmetros a serem considerados no desenvolvimento de um sistema submarino de produção. A Figura 9 mostra os dados de entrada comumente analisados.

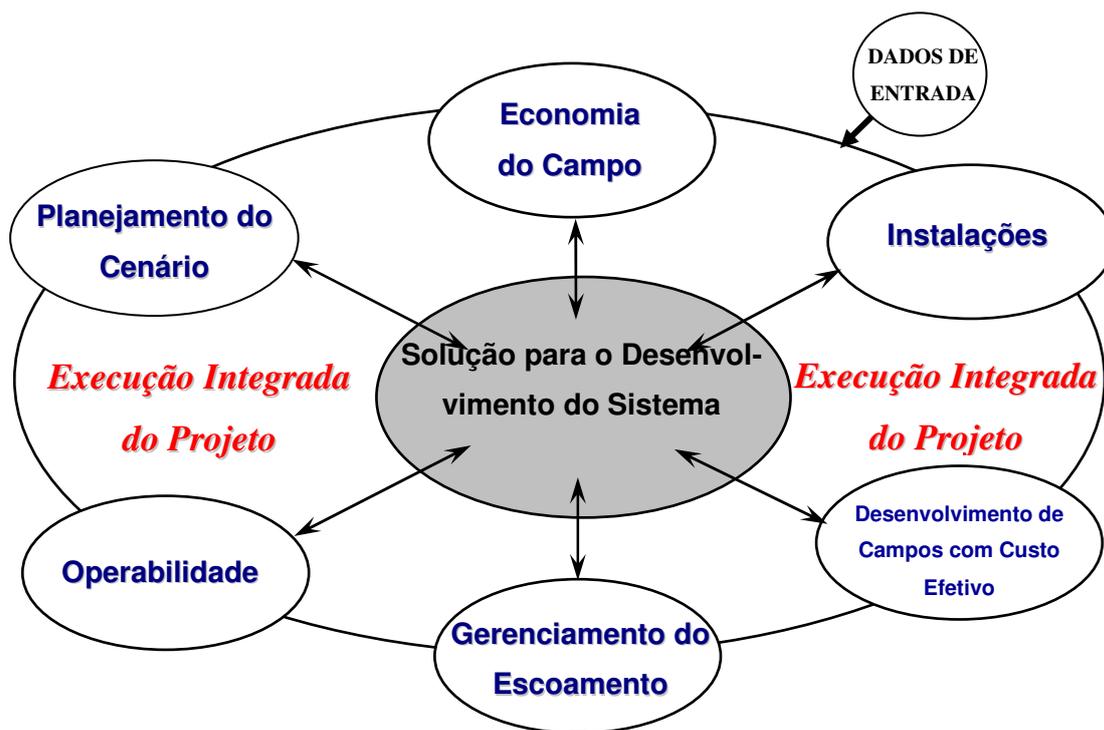


Figura 8: Organograma de estudos no desenvolvimento de um sistema submarino de produção de petróleo [9].

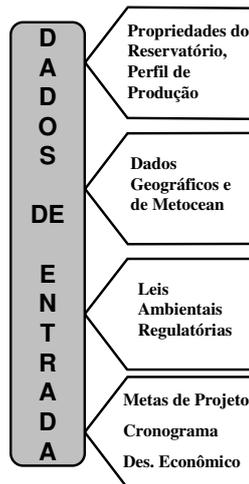


Figura 9: Parâmetros estudados no desenvolvimento de um sistema submarino de produção de petróleo.

No que concerne à garantia da manutenção do livre escoamento da produção de SSP, existem cinco preocupações básicas que devem ser gerenciadas [9]:

- Formação de Hidrato: forma-se em questão de horas e dias ou meses são necessários para removê-lo;
- Deposição de parafina: acumula-se aos poucos, dificultando a passagem de *pigs* (desentupidores e avaliadores de linhas em operação);
- Deposição de asfalteno: pode bloquear a passagem de produção em alguns meses;
- Corrosão / Erosão: deve ser prevenida ao máximo, de forma a manter a integridade estrutural e funcional do SSP;
- Incrustações: a formação de incrustações é determinada pela química da água produzida com o petróleo;

O Gerenciamento de Escoamento deve definir o que será feito com relação às questões listadas acima. Primeiramente, é avaliado se a probabilidade de ocorrência de cada uma delas é alta, a curto, médio ou longo prazo, de forma a comprometer a produção. Uma vez comprovado o risco, é necessária a reserva de recursos financeiros a serem utilizados na prevenção da ocorrência – INIBIDORES DE OCORRÊNCIA. Se negativo, torna-se mais viável permitir a ocorrência e executar operações de reparo/remoção – REMEDIADORES.

### 3.2 Definição de Conceitos de Gerenciamento de Escoamento

A seguir, os termos e expressões comumente usados nos estudos de Gerenciamento de Escoamento são listados e definidos [9]. Alguns deles serão citados algumas vezes nesta dissertação:

- *Shut In* (Ligamento Geral): Significa o ligamento do sistema, ou parte do sistema submarino, quando o escoamento do fluido de produção é iniciado, da cabeça do poço, passando pelos equipamentos subseqüentes;
- *Shut Down* (*Desligamento Geral*): Significa uma interrupção da operação de parte do sistema submarino. Este tipo de interrupção está sempre relacionado à ocorrência de algum problema, no que concerne à operação ou à segurança do SSP;
- *Cooldown Time* (Tempo de Resfriamento): Significa o tempo em que parte do sistema está em *shut down*, causando o resfriamento dos equipamentos e componentes pelo ambiente marinho. O sistema de isolamento térmico de um equipamento de um SSP deve atender ao Tempo de Resfriamento . O tempo de resfriamento é dividido em duas fases:
  1. *No Touch Time* (Tempo sem Intervenção): representa o período logo após a parada em que nenhuma intervenção é feita no sistema. O grupo de operação do sistema analisa a situação, identifica os problemas a serem solucionados e define um plano de ação;
  2. *Action Time* (Tempo de Ação): representa o período de intervenção no sistema, quando o plano de ação é executado com o objetivo de sanar os problemas que provocaram o desligamento;
- *GOR – Gas/Oil Ratio* (Proporção Gás/Óleo): Significa a proporção de gás e óleo contida no fluido de produção. Quanto maior for esta proporção, maior é a quantidade de gás no fluido de produção e maiores são os cuidados relacionados ao Gerenciamento de Escoamento, principalmente no que concerne à formação de hidrato. É importante que se entenda que não exis-

te poço de petróleo que produza apenas óleo. Há sempre a presença, mesmo que mínima, de gás e água;

- *Water Cut (Água produzida)*: É a quantidade de água produzida por um poço. Esta quantidade aumenta, com o amadurecimento do poço explorado, passando a ser maior que a quantidade de petróleo produzida;
- *Dead Legs (Trechos Mortos)*: São seções da passagem do escoamento, onde o fluido de produção fica estagnado ou não há escoamento, durante a operação do equipamento, potencializando a ocorrência de hidrato, parafina, etc;
- *Cold Spots (Regiões Frias)*: Indicam os pontos do equipamento isolado termicamente que apresentam maior perda de calor para o meio marinho. O termo parece ser um contra-senso, uma vez que indica regiões quentes e não frias;

### 3.3 Hidrato

A formação de hidrato é sem dúvida o parâmetro que requer maior atenção dentre os cinco listados na introdução deste capítulo. O gerenciamento deste problema é baseado primordialmente na inibição de ocorrência, com **inibidores passivos**, como o isolamento térmico e/ou **inibidores ativos**, como a injeção contínua ou periódica de inibidores químicos, como monoetileno glicol (MEG).

De acordo com Heydari, Shayesteh et al.[11], hidratos foram descobertos em 1810, por *Sir* Humphry Davy. Durante o século seguinte à descoberta, o interesse mundial em relação a estes compostos limitou-se aos ambientes acadêmicos.

Em 1934, um bloqueio em um gasoduto foi identificado como sendo formado por hidrato de gás natural [11]. A indústria petrolífera passou a estudar o composto e as atividades que podem provocar a formação de hidrato, gastando quantias imensas de recursos financeiros para combater este fenômeno, portanto, métodos precisos de estimativa de formação de hidrato são extremamente importantes para o desenvolvimento de sistemas de exploração de petróleo.

Conforme Donohou e College [8], os hidratos são compostos químicos cristalinos de um gelo cristalizado, com moléculas de gás “aprisionadas”, que se forma a partir da mistura de gás natural e água, sob determinadas condições de alta pressão e baixas temperaturas, contudo, superiores a 0°C.

Durante o processo de formação de hidrato, moléculas de água formam forças de ligação, chamadas pontes de hidrogênio. Conforme a pressão aumenta, as moléculas de água são conduzidas em grupo, formando estruturas poliédricas com um buraco. Neste buraco, gases como gás carbônico, metano, etano, propano e hidrocarbonetos são “aprisionados”, formando-se assim o hidrato. A Figura 10 ilustra as partículas formando o gás hidrato.

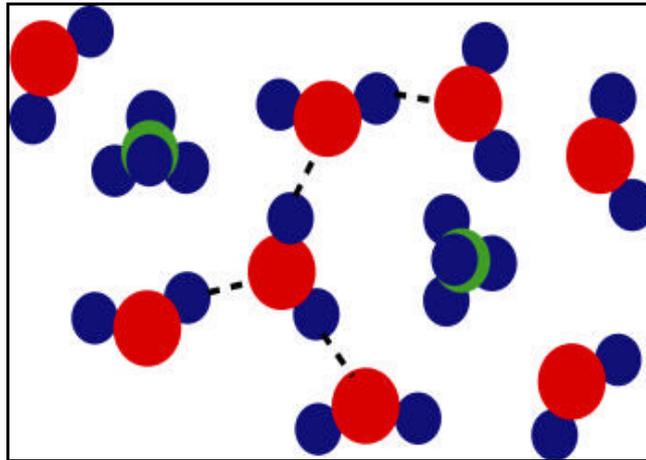


Figura 10: Moléculas de água (azul e vermelha) e pontes de hidrogênio (azul), aprisionando moléculas de gás (verde) → hidrato formado.

Surpreendentemente, hidrato pode se formar a temperaturas superiores a 30°C, portanto, a sua probabilidade de ocorrência é elevadíssima. A ocorrência é ainda maior em regiões onde o fluido de produção fica, por alguma razão, estagnado, como cavidades de válvulas, além de linhas de elevação de gás (*gas lifting*). Estas geralmente requerem injeção química contínua de inibidores (inibidores ativos). A grande dificuldade é a manutenção da injeção destes inibidores, durante um *shut down*. A Figura 11 ilustra a formação de hidrato. A Figura 12 mostra cristais de hidrato e a remoção de um bloqueio de hidrato em um tubo.

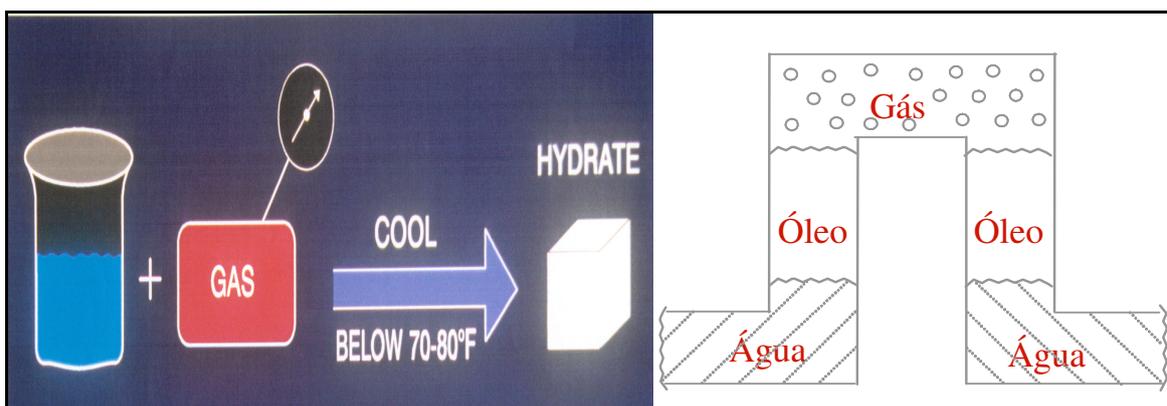


Figura 11: Formação de hidrato.

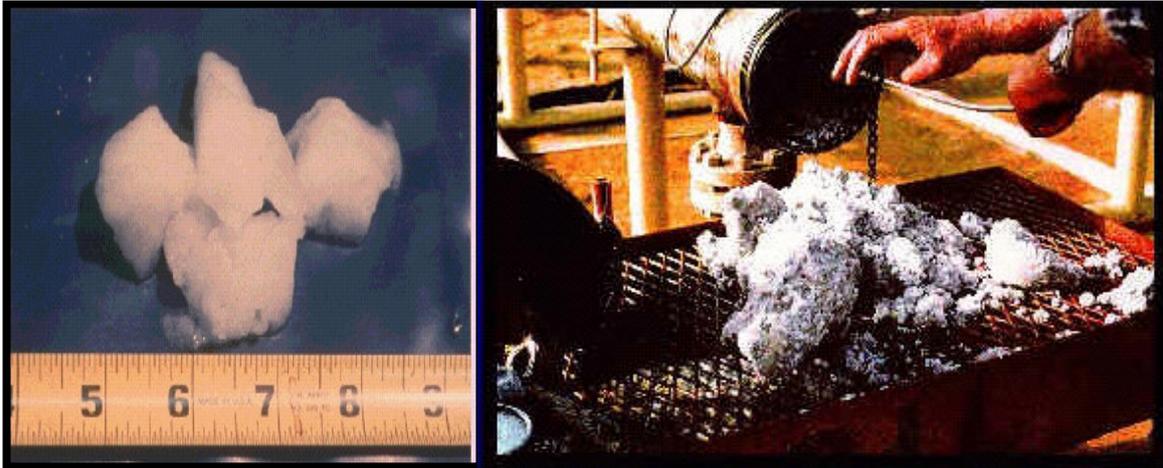


Figura 12: Cristais de hidrato e a remoção de um bloqueio de hidrato em um tubo.

### 3.3.1 Probabilidade de Formação de Hidrato

Se a temperatura do fluido de produção cair até a temperatura crítica de formação de hidrato (TFH), a uma específica proporção de gás e água, hidrato pode se formar. Durante uma parada de produção, as fases do fluido de produção tendem a se separar por diferença de densidade (decantação). A água tende a estagnar nas regiões de menor elevação do equipamento, óleo + gás acima e gás puro acima. Isto faz com que as regiões com baixa elevação apresentem maior probabilidade de formação de hidrato.

A Figura 13 ilustra em vermelho um região com grande probabilidade de formação de hidrato, em equipamento submarino.

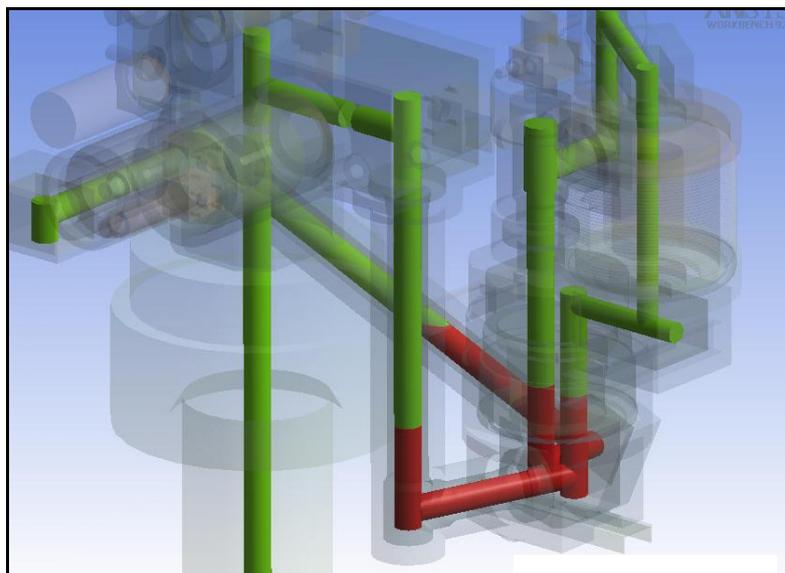


Figura 13: Região com alta probabilidade de formação de hidrato (região vermelha).

### 3.3.2 Notas Importantes

- Aproximadamente 170 m<sup>3</sup> de gás são armazenados em 1 m<sup>3</sup> de hidrato;
- Bloqueios podem se formar em óleo com gás e água associados;
- A utilização de *pigs* não é recomendada. Estes ajudam na conformação do meio cristalino, piorando a condição de bloqueio no sistema submarino;
- A injeção de metanol, com elevado diferencial de pressão, pode criar um “projétil de hidrato”, causando muitos danos;
- Quedas de pressão bruscas ocorridas em módulos de *choke* (controladores de fluxo) podem formar hidrato;
- Sistemas para gás: continua injeção de inibidores químicos. Isolamento térmico pode não ser efetivo e é comum a formação de bloqueios de hidrato;
- Sistemas para óleo: condição de operação fora da zona crítica de formação de hidrato (vide Figura 14). Injeção de inibidores durante fases transientes;

A Figura 14 mostra um típico gráfico da relação pressão – temperatura com a formação de hidrato. O projeto do sistema submarino deve operar sempre na zona livre de formação de hidrato.



Figura 14: Gráfico pressão x temperatura - regiões crítica e livre de formação de hidrato.

### 3.3.3 Inibidores Químicos de Formação de Hidrato

A Tabela 1 lista os inibidores ativos de formação de hidrato mais comumente utilizados na indústria petrolífera [9]:

Tabela 1: Inibidores ativos de formação de hidrato.

	<b>Inibidores Termodinâmicos (Metanol / MEG)</b>	<b>Inibidores Cinemáticos</b>	<b>Anti-aglomerantes</b>
<b>Mecanismo</b>	Diminui a temperatura de formação de hidrato	Adia a formação e inibe o crescimento dos cristais de hidrato	Permite a formação de hidrato, controlando o tamanho das partículas
<b>Vantagem</b>	Qualificado e largamente utilizado	Dosagem independente da quantidade de água produzida	Dosagem independente do $\Delta T$
<b>Desvantagem</b>	Demanda por grandes volumes e efeito na refinaria	Baixo sub-resfriamento permitido	Efetivo para água produzida < 50%
<b>Aplicabilidade</b>	Metanol: Óleo MEG: Gás e condensados	Gás e óleo	Óleo e Condensados

## 4 MATERIAIS TÉRMICO-ISOLANTES, HISTÓRICO E SELEÇÃO

### 4.1 Introdução

A seleção do material térmico-isolante para um projeto, ou aplicação em particular, dependerá das temperaturas dos fluidos de produção, durante as diferentes fases e operações pelos quais os equipamentos a serem isolados serão submetidos, requisitos de flexibilidade mecânica a serem atendidos e o custo final do preparo e aplicação. Este custo varia de acordo com o custo por litro do material, facilidade de aplicação e com as horas de engenharia necessárias para o desenvolvimento do projeto do isolamento térmico, definido pelas análises térmicas.

Para temperaturas abaixo de 121°C (250°F), vários materiais térmico-isolantes estão qualificados, como alguns tipos de epóxi, uretanos e borrachas de cloropreno. Acima desta temperatura de serviço, poucos materiais estão qualificados, como será mostrado a seguir.

A indústria petrolífera continua estudando materiais térmico-isolantes com performance térmica, facilidade de aplicação e propriedades mecânicas ainda melhores que as dos materiais já qualificados e testados em serviço. Este capítulo citará exemplos de utilização de materiais térmico-isolantes, descreverá os tipos mais utilizados e o processo de seleção para cada tipo de aplicação submarina.

### 4.2 Histórico

Segundo [9], em 1997-98, o corpo de engenharia da Shell para projetos no Golfo do México identificou a necessidade de isolar termicamente algumas árvores de natal:

- Material utilizado: espuma de epóxi sintético pré-moldada *Tymar 10K*;
- Experiência mostrou que a aplicação do isolamento era bastante complicada, além de ter comportamento quebradiço. O custo final foi altíssimo;

- Reação química exotérmica, durante o processo de cura do material causou trincas;
- O isolamento de *jumpers* rígidos quebrou, devido ao alongamento normal do equipamento;
- Fibra de vidro foi adicionada para manter o isolamento no local de aplicação.

Empresas da indústria de petróleo e gás começaram a estudar a utilização de outros materiais térmico-isolantes, mais eficientes e baratos. Constatou-se que vários materiais poderiam ser moldados no local de aplicação, mesmo em geometrias complexas.

Termoplásticos extrudados e borrachas vulcanizadas foram também testados, mostrando baixa praticidade. A Tabela 2 sumariza os materiais estudados àquela época. A Figura 15 mostra o isolamento com o Tymar 10K:

Tabela 2: Primeiros materiais térmico-isolantes utilizados pela indústria petrolífera.

<b>Material</b>	<b>Método de Aplicação</b>
Espuma de epóxi sintético pré-moldada	Moldada no local de aplicação ou pré-moldada e colada no local de aplicação
Uretano sintético	Moldado no local de aplicação
Olefinas	Extrudado
Elastoméricos vulcanizados	Embrulhado e curado em forno



Figura 15: Aplicação do material térmico-isolante TyMar 10K.

Em 1999, a Petro-Canada utilizou uretano sintético em partes da linha de produção do projeto Terra Nova. A Figura 16 mostra o isolamento com o uretano sintético.



Figura 16: Aplicação do material térmico-isolante uretano sintético.

Também em 1999, questões técnicas e comerciais levaram ao desenvolvimento do material epóxi flexível *NovoTherm*. Este foi usado no projeto Mica, da Esso, e no projeto Crosby-Serrano Orégano, da Shell. A Figura 17 mostra o isolamento com o *NovoTherm*.

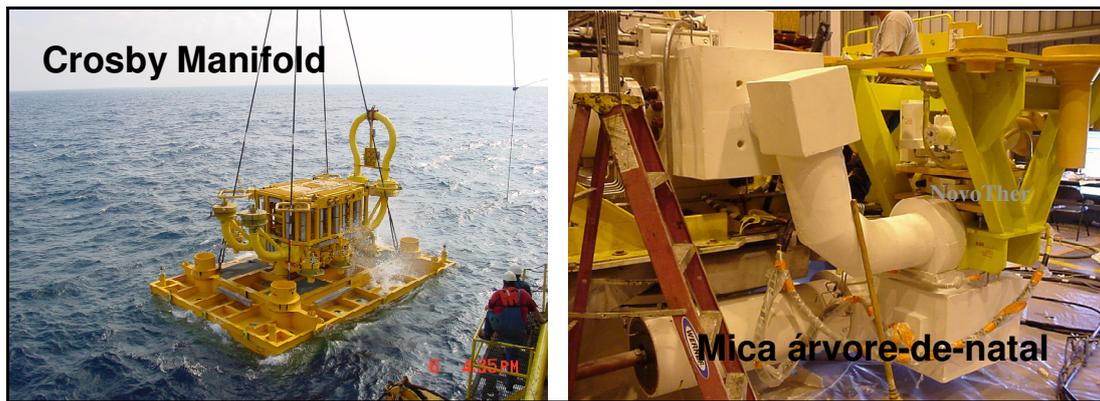


Figura 17: Aplicação do material térmico-isolante NovoTherm.

Em 2001, requisitos estabelecidos para projetos submarinos de alta pressão e alta temperatura (HPHT - *High Pressure/High Temperature*) foram responsáveis pelo desenvolvimento do material *Novolastic HT*, uma vez que os materiais disponíveis apresentavam inúmeros problemas, tais como:

- Materiais epóxi tornam-se extremamente quebradiços e propensos a apresentar trincas, quando submetidos a altas temperaturas;
- Materiais termoplásticos qualificados para *pipelines* não eram práticos de serem aplicados;
- *Novolastic HT* seria o único material térmico-isolante qualificado para geometrias complexas e altas temperaturas (>121°C).

Novolastic HT foi primeiramente utilizado no projeto MEGI Sea, nas linhas de produção de ANM's e *jumpers* e nas árvores e *jumpers* do projeto Thunderhorse, da British Petroleum. A Figura 18 mostra a aplicação do Novolastic HT.



Figura 18: Aplicação do isolamento Novolastic HT.

### 4.3 Descrição dos Materiais

Vários materiais térmico-isolantes satisfazem aos requisitos necessários para isolamento submarino, contudo, requisitos específicos, tanto técnicos, quanto econômicos, determinam qual material deve ser selecionado para uma aplicação específica.

Com o intuito de promover os princípios e fases inerentes à filosofia do projeto do sistema de isolamento térmico para sistemas submarinos, e de forma a assegurar uma performance adequada, é crucial que as possibilidades e limitações dos materiais disponíveis sejam identificadas.

Um sucinto resumo dos materiais mais comumente disponíveis para a seleção do material térmico-isolante é apresentado a seguir:

#### 4.3.1 Elastoméricos Vulcanizados

Devido ao comportamento mecânico elástico, os materiais elastoméricos são especialmente interessantes para o isolamento de sistemas submarinos, em particular para equipamentos tubulares, tais como *jumpers* e *risers* [13]. Como exemplos, têm-se o material VIKOTHERM Borracha Sintética, propriedade da empresa Telleborg Viking [20].

É importante ressaltar que o VIKOTHERM é um material formado por três camadas e faz-se necessária a utilização de autoclave, para o processo de cura. A cura das três camadas, a primeira, de policloropreno para proteção à corrosão, a intermediária de borracha sintética e mais uma camada de policloropreno, é um processo endotérmico, assegurando uma proteção à corrosão, a proteção exterior, contudo, acarreta problemas de logística, principalmente para peças grandes, uma vez que necessita de grandes espaços.

#### 4.3.2 Polímeros Termoplásticos

Polímeros termoplásticos têm sido largamente empregados para o isolamento de linhas de produção (*flowlines*). Este material é um polímero adesivo e o processo de

aplicação é altamente mecanizado. Por esta razão, este não é utilizado para o isolamento de geometrias complexas e carentes de espaço, como *manifolds* e árvores de natal. O processo de cura é exotérmico e o material é normalmente aplicado sobre uma camada de proteção à corrosão, que tem processo de aplicação endotérmico. Como exemplos, têm-se o material THERMOTITE Solid PP [6], propriedade da empresa Bredero-Shaw e o SOLID PP, propriedade da CRP Marine.

### **4.3.3 Resina de Poliuretano**

Poliuretanos são resistentes à hidrólise (fenômeno descrito no item 4.5.6 deste trabalho), curados à temperatura ambiente. Possuem flexibilidade excelente, tolerância a danos mecânicos, ótima adesão ao aço e tintas de epóxi, comumente usadas sob o isolamento e apresentam algum efeito de envelhecimento em água. Como exemplos, têm-se o material POLYBRID E-31, propriedade da Carboline e o URATHERM 3000 [20], da CRP Marine. Esses materiais são limitados a serviços até 93°C (200°F).

### **4.3.4 Lã de Epóxi Rígida**

Materiais epóxi estão entre os mais utilizados, para o isolamento térmico de sistemas submarinos. Estes apresentam quantidades relativamente altas de micro-esferas de vidro, podendo ser em torno de 40% do volume. A combinação da resina de epóxi com as micro-esferas resulta em baixa densidade e baixa condutividade térmica.

Apesar de apresentarem elevada resistência mecânica, estes materiais possuem baixa flexibilidade.

O processo de cura é, em geral, exotérmico. Experiências com a utilização destes materiais indicam que o processo de aplicação é crítico, com relação à indução de tensões térmicas residuais. São bastante resistentes à hidrólise.

A grande maioria dos materiais epóxi pode ser fornecida como sólidos ou como materiais sintéticos, em várias formas, como pré-moldados, moldados em campo ou na forma de *spray*. A escolha pelo modo de aplicação vai depender da complexidade da

superfície que deve ser isolada. Como exemplos, têm-se o material TYMAR 10K, propriedade da empresa Akso Nobel, o MB 44-HT e o EC-39, da CRP Marine, o C-FLOAT, da Cuming e o Contratherm, da Alderly. Estes materiais são limitados a serviços até 121°C (250°F).

#### **4.3.5 Epóxi Flexível**

Materiais a base de epóxi flexível apresentam boa flexibilidade, baixíssima absorção de água e podem ser derramados em seções espessas, por apresentarem baixo processo exotérmico. Estes apresentam processo de envelhecimento lento, quando imersos em água marinha.

Com o objetivo de manter uma boa flexibilidade, uma pequena quantidade de micro-esferas de vidro é introduzida na composição. Isto resulta em uma menor condutividade térmica, portanto há uma relação direta entre flexibilidade e performance térmica. Como exemplos, têm-se o NOVOTHERM, da FMC Technologies.

#### **4.3.6 Materiais a Base de Silicone**

Materiais a base de silicone são flexíveis e versáteis, sendo utilizados com sucesso no isolamento de equipamentos submarinos, principalmente daqueles que requerem grande flexibilidade da camada de isolamento. A aplicação (endotérmica) é feita normalmente no local e são comumente utilizados como bloqueadores térmicos entre outros materiais. Como exemplo, tem-se o material SILGEL 612 silicone, propriedade da empresa Wacker Chemie.

#### **4.3.7 Lã de Epóxi e de Fenol para Alta Temperatura**

O material de lã de epóxi CUMING C THERM HPHT é qualificado para serviços a temperaturas de até 132°C (270°F). O material pode ser moldado no local, embalado no local ou, em alguns casos, pré-moldado.

Uma lã sintética à base de fenol, registrada comercialmente como CONTRATHERM, da empresa Alderly Materials, é também qualificado para altas temperaturas.

Estes materiais devem ser utilizados como isolamento térmico de equipamentos rígidos, como árvores de natal. O uso em *jumpers* e *loops* de produção não é recomendado, uma vez que estes componentes são fletidos em serviço, o que pode causar fendas e pontos de quebra do material.

#### 4.3.8 Elastoméricos de Silicone para Alta Temperatura (> 121 °C)

O material à base de silicone NOVOLASTIC HT [10], propriedade da FMC Technologies, é formado pela adição de duas partes curadas de silicone. A resina de silicone é composta com micro-esferas de vidro, de forma a reduzir a densidade e condutividade térmica do material. O elastômero de silicone curado é qualificado para exposição contínua a temperaturas superiores a 177°C (350°F).

O material não apresenta reação exotérmica significativa, durante o processo de cura. As micro-esferas resistem à pressão hidrostática de até 10000 psi (lbf/pol<sup>2</sup>). Estas são tratadas com um agente de acoplamento, para promover adesão destas à resina. Isto permite a utilização deste material em águas ultra-profundas, sem a perda de performance por esmagamento das esferas.

O NOVOLASTIC é extremamente flexível, com alongamento máximo de mais de 200%, projetado para ser moldado no local.

As análises de Elementos Finitos efetuadas para este trabalho adotaram o NOVOLASTIC como material térmico-isolante.

A Tabela 3 lista os materiais térmico-isolantes e as suas características:

Tabela 3: Materiais térmico-isolantes correntes.

Tipo de Material	Exemplos	Método de Aplicação	Vantagens	Desvantagens
Lãs de Epóxi e de Fenol	Tymar 10K, Cuming C Therm (incluindo HPHT)	Moldado e embaldado no local	Baixa cond. térmica, custo relativamente baixo, aplicado com equipamento de bombeio padronizado	Quebradiço, podendo rachar, durante a cura exotérmica, alta absorção de água, baixíssima flexibilidade

<b>Resina de Poliuretano</b>	Polibnrid E31, Ura- thern 3000	Moldado no local	Baixa cond. térmica, boa flexibilidade, pode ser bem mais barato que epóxi, aplicado com equipamento de bombeio padronizado	Uso limitado até 93°C (200°F), absorção de água alta
<b>Epóxi Flexível</b>	NovoTherm	Moldado no local	Flexível, alto calor específico, baixa absorção de água, uso em até 121°C, baixa exotermia, pode ser aplicado com equipamento de bombeio padronizado	Custo elevado, comparado com epóxes e poliuretano
<b>Elastoméricos Vulcanizados</b>	VikoTherm	Envolvido e curado em forno a alta temperatura	Muito flexível, baixa absorção de água	Requer calor durante a cura, com componentes aquecidos em fornos, disponível apenas na Noruega
<b>Elastoméricos de Silicone para Alta Temp.</b>	Novolastic HT	Moldado no local	Muito flexível, alto calor específico, uso até 177°C (350°F), aplicação muito fácil	Maior custo entre os demais, resistência baixa ao rasgamento, adesão não tão boa quanto a dos epóxes

## **4.4 Propriedades Térmicas, Mecânicas e de Aplicação dos Materiais**

As propriedades necessárias para avaliar a performance de um material térmico-isolante englobam propriedades térmicas, físicas e mecânicas, além das características de processamento, aplicação, cura e adesão. Proteção à corrosão pode ser determinante em aplicações específicas e testes de envelhecimento acelerado também devem ser realizados.

### **4.4.1 Propriedades Térmicas**

Condutividade térmica (**k**), calor específico (**c**) e densidade ( **$\rho$** ) são as propriedades básicas que definem a eficiência térmica do material. Essas propriedades são medidas por meio da realização de ensaios padrão ASTM.

Quanto menor o **k**, menor é a taxa de calor conduzida pelo material. Quanto maior o calor específico, mais calor o material é capaz de armazenar. Quanto menor a densidade, maior é a resistência à condução de calor.

A Tabela 4 lista valores típicos das propriedades térmicas de alguns materiais:

Tabela 4: Propriedades térmicas dos materiais térmico-isolantes.

Propriedades Térmicas	Espuma de epóxi sintético pré-moldada	Espuma de epóxi sintético moldada no local	Uretano sintético	Elastomérico Vulcanizado	Epóxi Flexível	Silicone Elastomérico para alta temperatura
Condutividade Térmica k, W/m °C (BTU/hr-ft-°F)	0,09 (0,05)	0,13 (0,07)	0,13 (0,07)	0,22 (0,12)	0,22 (0,12)	0,17 (0,09)
Alongamento Máximo	< 1%	< 1%	40 to 50 %	>100 %	20 to 25 %	>150 %
Temperatura Máxima, °C (°F)	120 (250)	120 (250)	100 (212)	120 (250)	120 (250)	177 (350)
Máxima Lâmina D'água metros (pés)	2440 (8000)	3050 (10000)	2290 (7500)	3050 (10000)	2440 (8000)	3050 (10000)

#### 4.4.2 Propriedades Mecânicas

Estabilidade sob elevada pressão hidrostática, tensão de ruptura e alongamento máximo são propriedades mecânicas importantes, que devem ser consideradas na avaliação do material térmico-isolante. Para materiais preenchidos com micro-esferas de cerâmica ou vidro, a resistência à pressão hidrostática limitará a lâmina d'água máxima para a qual o material ficará qualificado. Para aplicação em águas profundas, uma resistência de pelo menos 275 bar (4000 psi) corresponde a mais ou menos 2700 metros (900 pés) de profundidade.

A tensão de ruptura e o alongamento máximo permitido são importantes para que a camada de isolamento resista a danos durante o manuseio e instalação do equipamento e às deformações causadas pela deflexão de componentes flexíveis, tais como os tubos de *well jumpers* e *flow loops*. Esses componentes requerem materiais isolantes flexíveis, para acomodar as deformações decorrentes da instalação e operação. Essas propriedades são medidas por meio da realização de ensaios padrão ASTM.

### 4.4.3 Testes de Qualificação

Testes em pequena e grande escala podem ser realizados, de forma a qualificar o material térmico-isolante para diferentes aplicações. A seguir, os testes mais comuns realizados são listados [9]:

#### Testes de pequena escala:

- Condutividade térmica: ASTM C177 ou C518;
- Densidade: ASTM D1817;
- Calor específico: Monitoramento do Diferencial de Calorimetria;
- Tensão de ruptura e alongamento máximo: D638;
- Dureza;
- Envelhecimento;
- Absorção de água, sob água pressurizada;
- Efeito da água pressurizada e absorvida para a condutividade térmica;

#### Testes de grande escala (simulação do equipamento em operação):

- Fluxo de calor radial através do isolamento;
- Temperatura na superfície externa do isolamento;
- Temperatura da água do mar gelada pressurizada em torno do equipamento;
- Temperatura interna;
- Mudanças nas dimensões radiais;
- Avaliação pós testes – mudanças de densidade, propriedades mecânicas, adesão e checagem de infiltração de água através do isolamento;

### Testes em escala real

- Total imersão de um equipamento (geralmente árvores de natal) em água gelada, com escoamento de fluido quente no interior do equipamento. Os resultados são comparados com os provenientes das simulações numéricas, determinando-se locais onde um isolamento extra é necessário para controlar as perdas de calor;

A Tabela 5 lista valores típicos para as propriedades dos materiais térmico-isolantes, obtidos por meio de testes e ensaios:

Tabela 5: Resultados típicos de testes de qualificação de materiais térmico-isolantes [9].

<b>Propriedades</b>	<b>Espuma de epóxi sintético pré-moldada</b>	<b>Espuma de epóxi sintético moldada no local</b>	<b>Uretano sintético</b>	<b>Elastoméricos vulcanizados</b>	<b>Epóxi Flexível</b>
<b>Absorção de água (porcentagem por peso)</b>	15 para 20	40 para 70	40	<5	5
<b>Condutividade Térmica “Molhada” W/m °C (BTU/hr-ft °F)</b>	0,27 (0,15)	0,27 (0,15)	0,29 (0,16)	0,24 (0,13)	0,24 (0,13)
<b>Mudança na dureza, após imersão em água</b>	-7 pontos Shore D	-15 pontos Shore D	-25 pontos Shore D	Sem mudanças mensuráveis	-10 pontos Shore D

## **4.5 Seleção do Material Térmico-Isolante**

### **4.5.1 Introdução**

A seleção do material térmico-isolante a ser empregado para o isolamento térmico de um sistema submarino de produção é dependente dos requisitos de projeto especificados pelas análises de Gerenciamento de Escoamento. Em geral, os requisitos listados a seguir são obrigatórios no processo de seleção:

- Carregamentos especificados pelo projeto;
- Propriedades de adesão do material;
- Proteção à corrosão promovida pelo isolamento térmico;
- Métodos de aplicação do isolamento térmico;
- Segurança do Trabalho durante a aplicação do material isolante;
- Tensões residuais resultantes de reações exotérmicas, durante a aplicação;
- Efeito da ocorrência de danos na superfície e a facilidade de reparo;

A escolha por um sistema termicamente isolado deve levar em conta a performance do material, assim como requisitos de espaço necessário para o isolamento e sua estabilidade para se moldar a geometrias complexas.

### **4.5.2 Cargas Mecânicas**

Desde a fase de aplicação, até a fase de operação do sistema submarino, os materiais isolantes são expostos a uma extensa matriz de carregamentos mecânicos e térmicos. A seguir são abordados os carregamentos mecânicos principais.

#### **Instalação**

A instalação de equipamentos submarinos é governada pelo comportamento dos equipamentos, durante três fases distintas:

- Passagem pela interface ar-água (“*splash zone*”);
- Descida dentro do mar – efeitos hidrodinâmicos;
- Aterrissagem no leito marinho;

Todos os carregamentos durante estas fases principais de instalação devem ser levados em conta na seleção do material.

### **Cargas de Impacto**

A operação dos equipamentos submarinos envolve uma série de cargas de impacto, como intervenções por ROV ou por ferramentas, que podem expor o material de isolamento a impactos localizados. Proteção adicional deve ser considerada, de forma a preservar a integridade do sistema de isolamento, principalmente em função das atividades listadas a seguir:

- Substituição de módulos constituintes de uma unidade, como SCM’s e módulos removíveis de *choke* e de válvulas;
- Operação de válvulas manuais e hidráulicas;
- Conexão/desconexão de linhas hidráulicas e elétricas;

### **4.5.3 Cargas Térmicas**

Durante a fase de operação do sistema, os equipamentos são expostos a ciclos térmicos, devido às atividades de “ligamento” e “desligamento”. Este efeito cíclico deve ser considerado durante a cura do material isolante, particularmente a diferença de expansão térmica do aço e do material isolante.

Em uma situação de despressurização, o isolamento pode ser exposto ao fenômeno chamado Efeito Joule-Thompson, mais especificamente para o isolamento aplicado a jusante dos módulos de *choke*. O efeito envolve baixíssimas temperaturas, atuantes em uma pequena região.

#### **4.5.4 Aplicação do Material**

A aplicação da maioria dos materiais térmico-isolantes envolve o processo de cura. O efeito deste processo deve ser considerado, principalmente a ocorrência de tensões residuais no isolamento.

#### **4.5.5 Absorção de Água**

A absorção de água por parte do material isolante afeta as propriedades mecânicas e térmicas do material:

- Efeito na condutividade térmica ( $k$ ): a absorção de água afeta adversamente a condutividade térmica do material, aumentando-a. Para o projeto do isolamento, a condutividade saturada no final da vida útil do material deve ser considerada;
- Efeito na capacidade térmica ( $c$ ): a absorção aumenta a capacidade térmica, contudo, para fins de projeto, este aumento deve ser desconsiderado;

#### **4.5.6 Hidrólise**

Hidrólise é um processo físico onde cadeias químicas em um polímero são quebradas. A presença de água e elevadas temperaturas são necessárias para a ocorrência do processo e este é tipicamente um problema de poliuretanos.

A espessura do isolamento normalmente assegura que a interface isolamento-aço seja um meio quente e seco, ou seja, a camada de isolamento, se bem aplicada, prevenirá a ocorrência de hidrólise. Isto obviamente não vale para os contornos do isolamento. Nestas interfaces, o material estará exposto a um ambiente quente e úmido e hidrólise ocorrerá. Poliuretanos vem sendo cada vez menos selecionados por esta razão.

### 4.5.7 Fluxograma para Seleção

O fluxograma mostrado na Figura 19 simplifica o processo de seleção do material térmico-isolante, dentre os materiais abordados neste trabalho. Este pode ser utilizado, se os requisitos técnicos se resumirem à temperatura de trabalho a qual o sistema de isolamento será submetido e à necessidade de alta ou baixa flexibilidade mecânica.

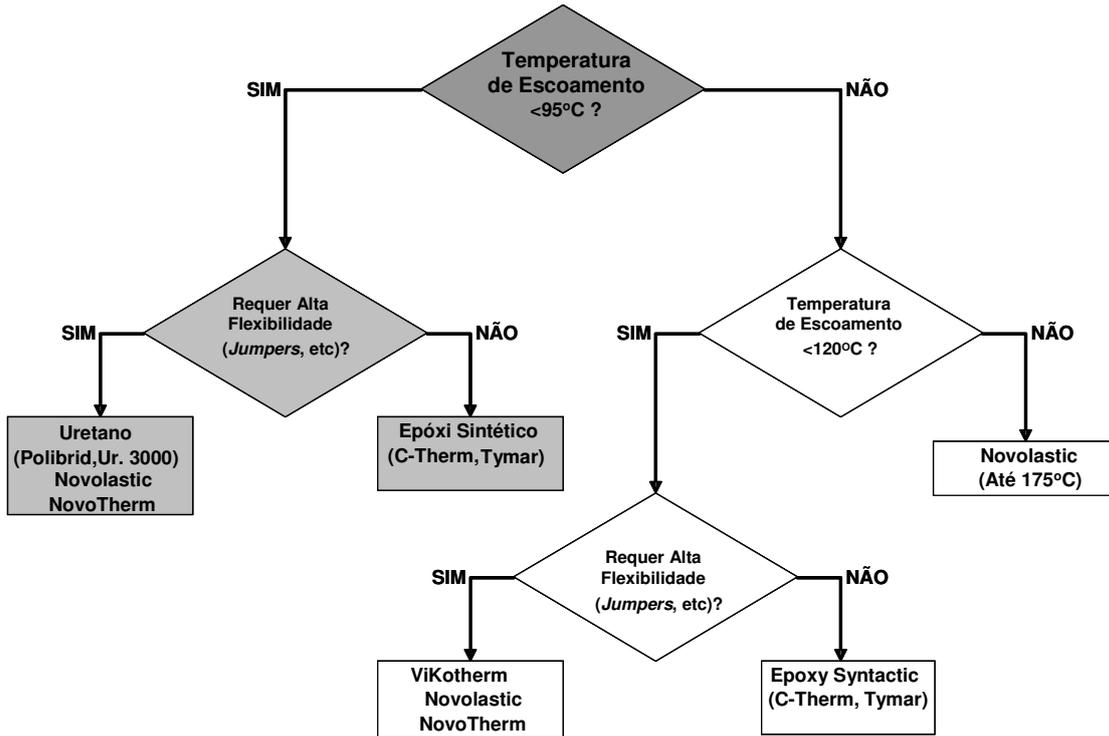


Figura 19: Fluxograma para seleção do material térmico-isolante [9].

# 5 FORMULAÇÃO E MODELAGEM COMPUTACIONAL

## 5.1 Transferência de Calor

Segundo Holman [12], a área de estudo da Transferência de Calor visa prever a transferência de energia térmica que pode ocorrer entre corpos materiais, resultante de uma diferença de temperatura. O estudo não se limita apenas a explicar como energia térmica pode ser transferida, mas também a prever a taxa de transferência, sob determinadas condições. O interesse por esta previsão determina a diferença básica entre transferência de calor e termodinâmica. Termodinâmica trata de sistemas em equilíbrio. A Transferência de Calor responderá a que taxa um sistema vai de um equilíbrio térmico a outro.

Para problemas de engenharia relacionados à manutenção de calor em um sistema de produção de óleo e gás, a Transferência de Calor será a base teórica para alcançar-se a solução.

Com relação ao tipo de transferência de energia térmica, três modos são possíveis: **Condução, Convecção e Irradiação**. Estes são sucintamente explicados a seguir [12]:

### 5.1.1 Condução

Quando um gradiente de temperatura existe em um corpo (ou entre corpos em contato), uma transferência de energia térmica ocorre da região de maior temperatura para a de menor temperatura. Este modo de transferência é chamado Condução e a taxa de transferência por unidade de área é proporcional ao gradiente de temperatura. A fórmula a seguir calcula a taxa de transferência de calor por condução:

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde,

q é a taxa de transferência de calor;

$A$  é a área pela qual o fluxo de calor passa;

$\frac{\partial T}{\partial x}$  é o gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor (unidade de grau de temperatura);

$k$  é o coeficiente de condutividade térmica do material do corpo (unidade de [energia] / [comprimento] x [temperatura]);

NOTA: Condução é único modo de transferência de calor que pode ser calculado precisamente através do Método de Elementos Finitos.

### 5.1.2 Convecção

Convecção é o modo de transferência de calor entre um corpo e um fluido ou internamente em um fluido. Como exemplo, tem-se a perda de calor de um equipamento submarino devido ao contato com a água do mar com velocidade de corrente (convecção forçada) ou estagnada (convecção natural). A fórmula a seguir calcula a taxa de transferência de calor por convecção:

$$q = -h \cdot A \cdot (T_w - T_\infty) \quad \text{Eq. 2}$$

Onde,

$q$  é a taxa de transferência de calor;

$A$  é a área da superfície de contato do corpo com o fluido;

$T_w$  é a temperatura do corpo na superfície de contato;

$T_\infty$  é a temperatura do fluido;

$h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção;

Para alguns sistemas simplificados,  $h$  pode ser calculado analiticamente, contudo, para sistemas complexos, este só pode ser determinado experimentalmente.

NOTA: Para uma modelagem numérica de Convecção com elevada precisão, técnicas de CFD (*Computed Fluid Dynamics*), baseado no Método dos Volumes Finitos, podem ser utilizadas, uma vez que o Método de Elementos Finitos não pode simular a dinâmica de fluidos.

### 5.1.3 Irradiação

Em contraste aos mecanismos de condução e convecção, que definem a transferência de calor através de meios preenchidos por massa, calor também pode ser transferido através do vácuo. Para estes casos, o modo de transferência de calor é chamado Irradiação térmica. A fórmula a seguir calcula a taxa de transferência de calor por irradiação:

$$q = e \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_a^4) \quad \text{Eq. 3}$$

Onde,

$q$  é a taxa de transferência de calor;

$e$  é a função de emissividade;

$\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67 \times 10^{-8} \text{ J}/(\text{s}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$ ;

$A$  é a superfície de contato;

$T_s$  é a temperatura do sólido;

$T_a$  é a temperatura do ambiente;

## 5.2 Tipos de Análise e Modelagem Computacional

### 5.2.1 Introdução

A modelagem térmica computacional envolve fenômenos físicos complexos e de difícil previsão. Isto é particularmente verdadeiro para trechos mortos (*dead legs*) e pontos de conexão entre dois equipamentos (conectores, etc.).

Em regiões de *dead leg*, o fluido de produção apresentará separação das suas fases (gás, óleo e água). Esta separação pode afetar o processo de resfriamento do componente submarino analisado. É essencial que isto seja levado em conta, de forma a se evitar a especificação de isolamento térmico excessivo.

Limitações do isolamento devido a questões de fabricação também influenciarão a performance global do sistema. A extensão e localização destas áreas devem ser estabelecidas como parte do processo de análise.

### 5.2.2 Métodos de Análise

Devido à complexidade geométrica, a verificação do grau de isolamento e a determinação da resposta do sistema podem ser calculadas, utilizando-se ferramentas analíticas e numéricas, partindo-se de análises unidimensionais a tridimensionais do componente analisado. Uma vez que geometrias complexas estão frequentemente associadas a grandes massas de aço que contribuirão para um resfriamento mais lento do equipamento, uma análise tridimensional deve ser desenvolvida de forma a simular a quantidade de calor armazenada no sistema.

Subdividindo-se o sistema submarino em segmentos, e analisando-os individualmente, é possível determinar a resposta do sistema. A filosofia de projeto define que, se cada segmento analisado atende aos requisitos técnicos, o sistema inteiro também satisfará. Ressalta-se que esta hipótese implica na aplicação de condições de contorno adiabáticas (troca de calor inexistente), ou seja, não há ganho nem perda de calor entre segmentos subsequentes, dentro do sistema. Esta hipótese será melhor descrita no item 7.5 deste trabalho.

## Modelagem Unidimensional

Para componentes geometricamente simples, basicamente constituídos por tubos, como *jumpers* rígidos, *flowlines* e *risers*, a análise térmica pode ser simplificada por meio de modelos unidimensionais axissimétricos, como mostrado na Figura 20. Este tipo de abordagem de cálculo é válida para tubos de comprimento muito grande, definidos assim quando a razão comprimento sobre diâmetro interno é maior que 10.

O modelo é baseado, avaliando-se o balanço de energia para cada camada de material que o compõe (fluido – aço – material térmico-isolante). Cada camada é representada por um nó e a transferência de calor entre os nós deve vencer uma resistência imposta pelo material constituinte da camada. A temperatura é verificada em cada nó.

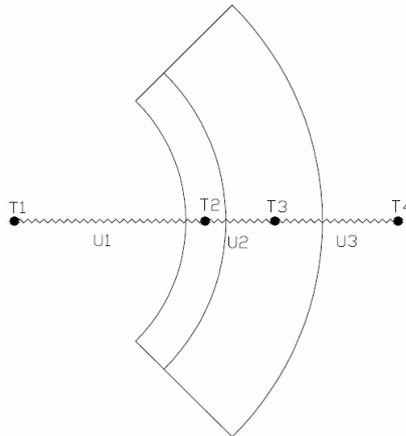


Figura 20: Esquema de modelagem unidimensional.

$T_1$  é a temperatura interna do fluido de produção;

$T_2$  é a temperatura média da parede do tubo;

$T_3$  é a temperatura média da camada de isolamento;

$T_4$  é a temperatura do meio externo;

As equações diferenciais governantes de balanço de energia unidimensional, para o modelo proposto, podem ser escritas como a seguir:

Para o fluido de produção:

$$U_1 \cdot A_1 \cdot (T_1 - T_2) = -m_1 \cdot C_{p1} \cdot \frac{dT_1}{dt} \quad \text{Eq. 4}$$

Para o tubo:

$$U_1 \cdot A_1 \cdot (T_1 - T_2) - U_2 \cdot A_2 \cdot (T_2 - T_3) = -m_2 \cdot C_{p2} \cdot \frac{dT_2}{dt} \quad \text{Eq. 5}$$

Para a primeira metade da camada de isolamento:

$$U_2 \cdot A_2 \cdot (T_2 - T_3) - U_3 \cdot A_3 \cdot (T_3 - T_4) = -m_3 \cdot C_{p3} \cdot \frac{dT_3}{dt} \quad \text{Eq. 6}$$

Para a metade da camada de isolamento em contato com o meio externo:

$$U_3 \cdot A_3 \cdot (T_3 - T_4) - U_4 \cdot A_4 \cdot (T_4 - T_{ambiente}) = -m_4 \cdot C_{p4} \cdot \frac{dT_4}{dt} \quad \text{Eq. 7}$$

As equações podem ser calculadas simultaneamente por meio do método de Runge-Kutta, para solução de sistema de equações diferenciais.

#### Limitações e hipóteses simplificadoras

- Assume-se que o perfil de temperatura no componente analisado atingiu regime permanente (equilíbrio). Isto significa que o isolamento térmico será projetado a partir desta condição;
- Para uma situação de parada da produção, não existe escoamento do fluido de produção no sistema, portanto, assume-se que o mecanismo de transferência de calor é somente condução.
- Assume-se que o fluido contido é monofásico. Na realidade não existe fluido de produção monofásico;
- As propriedades térmicas do fluido e do material isolante são assumidas como constantes, independentemente da temperatura. Isto não é verdadeiro [12], porém as variações podem ser negligenciadas, sem maiores problemas;

## Modelagem Bi-dimensional Versus Tri-dimensional

Há duas considerações principais para uma correta simulação do resfriamento de um equipamento:

- Representação precisa das superfícies expostas à água marinha. A grande maioria do calor perdido pelo equipamento acontece através das superfícies de aço expostas;
- Representação precisa da quantidade de calor armazenada no equipamento;

Devido à exigência da modelagem destas características, um modelo bi-dimensional não fornecerá resultados com mínima precisão desejável, sendo necessário empregar modelos tridimensionais, como será visto a seguir. A Figura 21 mostra um modelo bi-dimensional.

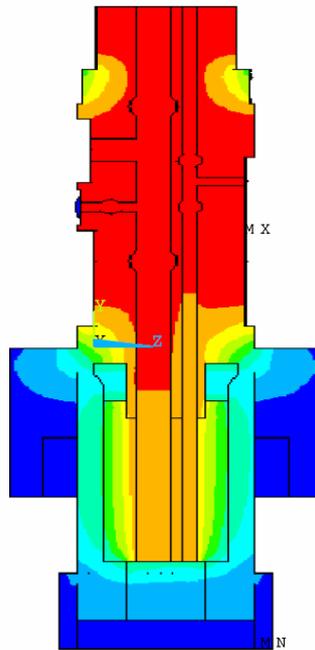


Figura 21: Modelagem bidimensional.

## Análise Tri-dimensional por Meio do Método dos Elementos Finitos

Como mencionado anteriormente, geometrias complexas como árvores de natal, *PLET's e manifolds* não podem ser analisadas de outra forma senão por meio de um modelo tridimensional, capaz de simular o resfriamento do equipamento através das suas superfícies em contato com a água do mar, principalmente as de aço, por onde grande parte do calor armazenado será perdida para o meio. Um modelo tridimensional de Elementos Finitos (MEF) é particularmente útil para a execução das análises. Experiência é fundamental por parte do engenheiro responsável, de forma a considerar apenas componentes relevantes da montagem do equipamento.

Basicamente, o modelo deve contemplar toda a massa de aço diretamente ligada à passagem do fluido de produção. Esta massa determinará uma maior ou menor quantidade de isolamento necessária para o atendimento dos requisitos de parada de produção e máxima temperatura. A desvantagem da adoção do Método de Elementos Finitos, para a análise térmica de equipamentos submarinos é a não simulação da termodinâmica dos fluidos envolvida no problema, principalmente no que concerne à transferência de calor por convecção natural e forçada. Correlações matemáticas experimentais tentam compensar esta limitação, por meio do cálculo de um **coeficiente de condutividade térmica equivalente** maior que o coeficiente original do fluido. Esta abordagem matemática será descrita no item 6.1.3 deste trabalho.

Os fluidos considerados neste tipo de análise são modelados como volumes sólidos, porém com as sua propriedades físicas e térmicas. A Figura 22 mostra um exemplo de modelagem tridimensional pelo MEF:

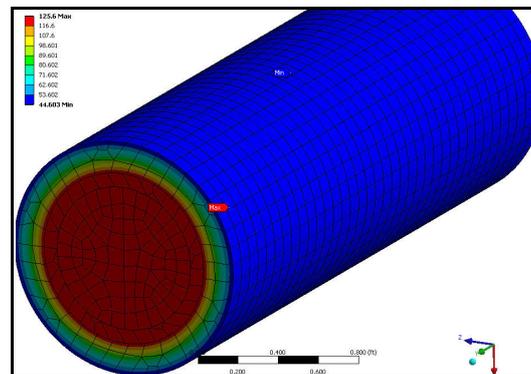


Figura 22: Modelagem tridimensional pelo MEF.

## Análise Tri-dimensional por Meio do Método dos Volumes Finitos – Dinâmica dos Fluidos Computacional

Há alguns fenômenos térmicos localizados que não podem ser simulados por modelos de Elementos Finitos. E, apesar de serem altamente localizados, estes podem influenciar a performance do sistema.

Como mencionado anteriormente, análises de MEF não contabilizarão a correta simulação dos fenômenos de convecção interna em fluidos. Para tal, análises baseadas na Dinâmica Computacional dos Fluidos (CFD) devem ser realizadas. Técnicas de CFD permitem o cálculo da convecção natural diretamente (sem correlações experimentais) e o coeficiente de transferência de calor ( $h$ ) entre as paredes de aço e o volume de fluido. Este pode ser utilizado como dado de entrada para uma análise de Elementos Finitos subsequente, de forma a obter resultados mais precisos. Programas computacionais de CFD calculam tanto convecção, quanto condução, importante para a massa de aço e de isolamento térmico. A Figura 23 mostra um exemplo de modelagem tridimensional por CFD:

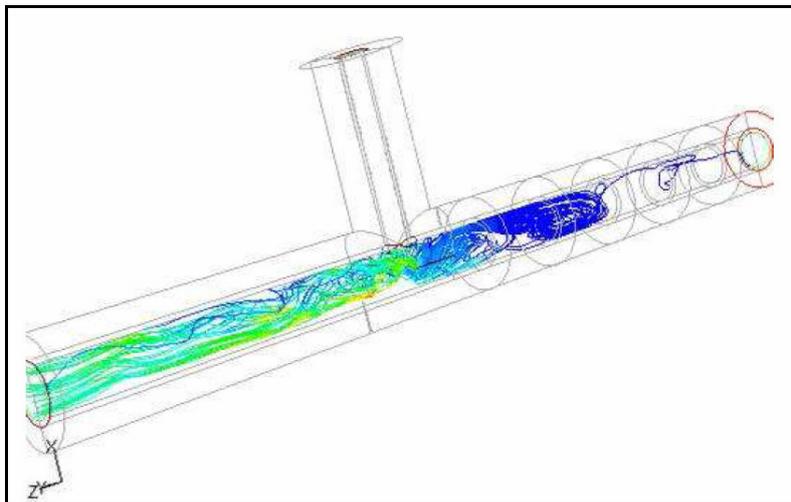


Figura 23: Modelagem tri-dimensional por CFD.

Uma vez que CFD simulará tanto as transferências por condução, quanto por convecção, porque não utilizar sempre este método de análise, para o projeto do isolamento térmico de equipamentos submarinos? A desvantagem é que análises por CFD são extremamente dispendiosas, em termos de performance computacional e, principalmente, com relação ao tempo necessário para cada rodada.

Além disso, a abordagem por Elementos Finitos associada à utilização de correlações experimentais fornece resultados conservativos, com precisão aceitável.

### **5.2.3 Metodologia Adotada**

Óleo e gás possuem condutividade térmica muito baixa. Se modelados como volumes sólidos, com o coeficiente de condutividade térmica real, estes se comportarão basicamente como “isolantes”. Contudo, utilizando-se um coeficiente de condutividade equivalente, é possível “imitar” o efeito da convecção que ocorrerá na realidade, possibilitando a utilização do MEF. Outro detalhe que aumenta o comportamento conservativo das análises por MEF é que, baseado em testes e simulações, o coeficiente de transferência de calor entre o fluido e a superfície de contato da massa de aço parece ser relativamente constante e este diminui ao longo do processo de resfriamento do equipamento. Este comportamento é negligenciado nas análises de MEF.

A escolha pela metodologia de análise a ser adotada deve pesar as vantagens e desvantagens de cada uma, dentre as disponíveis e definir qual ferramenta melhor atende aos requisitos exigidos para o projeto de isolamento térmico e o cronograma correspondente. Em geral, ferramentas computacionais baseadas no Método dos Elementos Finitos são adotadas.

Este trabalho mostrará o processo de desenvolvimento do projeto de isolamento térmico para uma ANM, com simulações numéricas por meio do Método dos Elementos Finitos.

## 6 GERAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA ANÁLISE DO ISOLAMENTO TÉRMICO DE EQUIPAMENTOS SUBMARINOS PELO MEF

### 6.1 Metodologia para o Cálculo dos Dados de Entrada

O efeito térmico causado pela água marinha em volta do equipamento submarino é considerado na análise de Elementos Finitos, através do coeficiente de transferência de calor, **h**. Este efeito pode ser de dois tipos: **Convecção Forçada**, quando o fluido analisado é escoado por agentes externos ou **Convecção Natural**, quando o escoamento é causado por forças de empuxo. Elementos Finitos é capaz de calcular o efeito de convecção causado por um volume de fluido infinito, como é considerado o volume de água marinha em volta do equipamento. A convecção apresentada pelos fluidos contidos dentro dos equipamentos analisados é contabilizada através de correlações matemáticas e experimentais denominadas condutividades térmicas equivalentes, conforme mencionado anteriormente. Os itens a seguir descrevem o cálculo do coeficiente **h** e da condutividade térmica equivalente.

### 6.1.1 Convecção Forçada em Espaço Infinito

Segundo Holman [12], a convecção é classificada como *forçada*, quando o escoamento do fluido é causado por um ou mais agentes externos artificiais, como um ventilador ou uma bomba, ou naturais, como os ventos atmosféricos e a velocidade de corrente da água marinha. A metodologia de cálculo deste fenômeno para um escoamento sobre um tubo circular é descrita a seguir, em termos do coeficiente de transferência de calor,  $h$ :

$$h = \frac{Nu \cdot k_{\text{fluido}}}{D} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

$k_{\text{fluido}}$  → condutividade térmica do fluido escoado (água marinha);

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{1/2}\right] \quad \text{Eq. 9}$$

$Nu$  → Número de Nusselt;

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \rightarrow \text{Número de Reynolds;} \quad \text{Eq. 10}$$

$\rho$  → densidade do fluido (água marinha);

$V$  → velocidade média do escoamento do fluido (velocidade de corrente marinha);

$D$  → diâmetro externo do tubo ou a largura de uma superfície retangular em contato com o escoamento;

$\mu$  → viscosidade dinâmica do fluido (água marinha);

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k_{\text{fluido}}} \rightarrow \text{Número de Prandtl;} \quad \text{Eq. 11}$$

$C_p$  é o calor específico do fluido (água marinha)

### 6.1.2 Convecção Natural em Espaço Infinito

De acordo com Holfman [12], em contraste ao fenômeno de *convecção forçada*, a convecção é classificada como *natural*, quando o escoamento é induzido por forças de empuxo, causadas por diferenças de densidade ocasionadas por variações de temperatura no fluido. A metodologia de cálculo deste fenômeno é descrita a seguir:

$$h = \frac{Nu \cdot k_{\text{fluido}}}{D} \quad \text{Eq. 12}$$

Onde:

$k_{\text{fluido}}$  → condutividade térmica do fluido escoado (água marinha);

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n \rightarrow \text{Número de Nusselt}; \quad \text{Eq. 13}$$

$$Gr = \frac{g\beta(\Delta T)L^3}{\nu^2} \rightarrow \text{Número de Grashof}; \quad \text{Eq. 14}$$

$g$  → aceleração gravitacional;

$\beta$  → coeficiente de expansão térmica volumétrica;

$\Delta T$  → gradiente de temperatura;

$L$  → dimensão característica = diâmetro externo do tubo ou a largura de uma superfície retangular em contato com o escoamento;

$\nu$  → viscosidade cinemática do fluido;

$C$ ,  $n$  e  $m$  são constantes provenientes de correlações empíricas. Os seus valores, para um tubo vertical, são dados a seguir:

Para placas e tubos verticais:

$$\text{Para } Gr \cdot Pr = 10^4 \text{ a } 10^9 \rightarrow C = 0.59 \text{ e } n = 1/4$$

$$\text{Para } Gr \cdot Pr = 10^9 \text{ a } 10^{13} \rightarrow C = 0.021 \text{ e } n = 2/5$$

Para tubos horizontais:

$$\text{Para } Gr \cdot Pr = 10^4 \text{ a } 10^9 \rightarrow C = 0.53 \text{ e } n = 1/4$$

$$\text{Para } Gr \cdot Pr = 10^9 \text{ a } 10^{12} \rightarrow C = 0.13 \text{ e } n = 1/3$$

### 6.1.3 Convecção Natural em Espaço Finito - Condutividade Térmica Equivalente

Para se contabilizar o efeito da convecção natural dos volumes de fluidos contidos dentro do equipamento analisado, i.e. o fluido de produção e fluidos “a-prisionados”, como fluidos hidráulicos e pequenos volumes de água marinha, nos conectores mecânicos/hidráulicos, coeficientes de condutividade térmica equivalente são calculados. Conforme [16], a condutividade térmica equivalente é a condutividade que um fluido estagnado deve apresentar, para transferir a mesma quantidade de calor que um fluido em movimento transferiria, sob as mesmas condições. A utilização desta metodologia de cálculo visa substituir a convecção em espaço finito que os fluidos internos apresentariam na realidade, fenômeno este que não pode ser simulado por meio do Método dos Elementos Finitos. O coeficiente de condutividade térmica equivalente é dependente dos parâmetros a seguir:

- Geometria do volume de fluido;
- Densidade do fluido;
- Viscosidade do fluido;
- Calor específico do fluido;
- Condutividade térmica real do fluido;
- Gradiente de temperatura no fluido;

A metodologia é descrita abaixo [16]:

$$\frac{k_{eqv}}{k_{fluido}} = C(Gr Pr)^n \left( \frac{L}{\delta} \right)^m \quad \text{Eq. 15}$$

Onde:

$k_{eqv}$  → condutividade térmica equivalente do fluido;

$k_{fluido}$  → condutividade térmica real do fluido;

$L$  → dimensão característica = diâmetro interno do tubo, para o volume de fluido contido nele;

$$\delta = L/2$$

C, n e m são constantes provenientes de correlações empíricas. Os seus valores, para um tubo vertical, são dados a seguir:

Para  $Gr \cdot Pr = 10^4$  a  $10^7 \rightarrow C = 0.42, n = 0.25$  e  $m = -0.3$

Para  $Gr \cdot Pr = 10^6$  a  $10^9 \rightarrow C = 0.046, n = 0.33$  e  $m = 0$

## 6.2 Modelagem por Elementos Finitos

As análises de Elementos Finitos foram realizadas com a utilização do programa computacional ANSYS / Workbench, versão 10.0 [4]. Este possibilita rodadas em regime permanente e rodadas em regime transiente subsequentes.

As geometrias tridimensionais dos modelos foram preparadas através do programa computacional de CAD, chamado SolidWorks [7]. Após este preparo, arquivos de exportação de geometria chamados arquivos parasólidos foram gerados. Estes são “importados” pelo ANSYS, para a geração das malhas, definição dos materiais envolvidos, aplicação das condições de contorno, como temperaturas iniciais e convecção provocada pela água marinha e execução das análises.

O pós-processamento dos resultados é quase que totalmente feito dentro do ANSYS, com exceção de alguns gráficos. Basicamente, verifica-se a distribuição de temperatura ao longo do modelo, com o objetivo de identificar regiões no fluido de produção apresentando temperaturas iguais ou inferiores à temperatura de formação de hidrato (TFH).

### 6.2.1 Elemento Finito

O elemento finito adotado para a modelagem chama-se SOLID87, pertencente à biblioteca de elementos finitos do ANSYS [5], tipo sólido tridimensional, de formato tetraédrico, para facilitar a malhação de geometrias complexas, com dez nós. A Figura 24 mostra um desenho esquemático do elemento.

O elemento é especialmente preparado para a modelagem de uma malha mais ou menos irregular (tal como malhas produzidas a partir de vários sistemas CAD de modelagem da geometria). Este possui um grau de liberdade por nó: temperatura. Por esta razão, os requisitos de refinamento da malha de elementos finitos não são severos, no que concerne à garantia de precisão de resultados satisfatória. Em outras palavras, não há a necessidade de se preparar uma malha mapeada e estruturada para se obter boa precisão. Estudo de sensibilidade de malha será mostrado no item 7.7 deste trabalho, de forma a corroborar as afirmações feitas aqui.

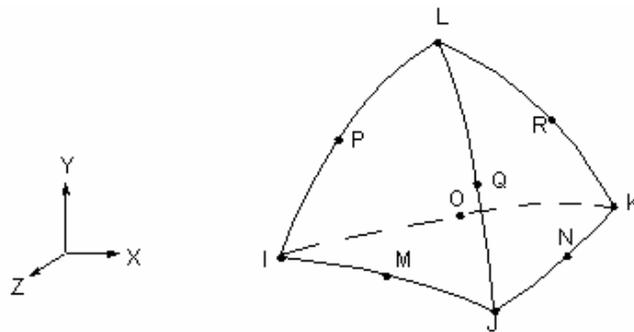


Figura 24: Elemento finito tetraédrico de 10 nós.

### 6.2.2 Tipos de Análises

Dois tipos principais de análises são essenciais para o projeto do isolamento térmico de um equipamento submarino:

1. **Máxima Temperatura:** visa avaliar se componentes sensíveis a altas temperaturas (como componentes elastoméricos) serão submetidos a

temperaturas maiores que a máxima temperatura para a qual eles estão qualificados;

2. **Parada de Produção / Resfriamento (*Shut Down / Cool Down*):** determina o tempo que o fluido de produção contido no equipamento leva para resfriar, da temperatura inicial (i.e. a temperatura que o fluido apresenta, quando o equipamento está operando em regime permanente), até a temperatura de formação de hidrato;

### **Análise de Máxima Temperatura (Regime Permanente)**

As análises de máxima temperatura demandam apenas uma rodada única em regime permanente, de forma a fornecer a distribuição de temperatura ao longo do equipamento, para a máxima temperatura de fluxo do fluido de produção em operação.

Quando o modelo está submetido a um regime permanente, a quantidade de energia térmica que é transferida pelo fluido de produção é a mesma quantidade de energia que é perdida pelo sistema, através da convecção externa, causada pela água marinha que circunda o equipamento. Quando o equilíbrio térmico é atingido, é possível avaliar a temperatura máxima a qual o equipamento será submetido, determinando se todos os componentes sensíveis estão qualificados para aquela condição.

### **Análise de Resfriamento/Parada de Produção (Regime Transiente)**

Em uma análise em regime transiente, deve-se especificar o tempo de análise, ou seja, a análise será rodada do tempo inicial zero, até um tempo final, quando se deseja saber a distribuição de temperatura.

A distribuição de temperatura no tempo zero é obtida a partir de uma rodada em regime permanente, como é feito para a análise de máxima temperatura. Isto simula a condição real que um período de resfriamento (transiente) sempre sucede um período de operação normal do sistema (permanente). Se a temperatura de fluxo do fluido de produção for única, essas rodadas em regime permanente serão iguais.

A análise em regime transiente possibilita simular o processo de resfriamento a qual o equipamento será submetido, durante uma parada de produção. Com isto, é de-

terminado se os critérios de resfriamento/tempo de parada, definidos pelas análises de Gerenciamento de Escoamento, foram alcançados. Se o atendimento aos requisitos não for alcançado, melhorias no projeto do isolamento devem ser estudadas, com foco nos locais onde houve as maiores perdas de calor.

# 7 APLICAÇÃO: ISOLAMENTO TÉRMICO DE UMA ANM

## 7.1 Introdução

O projeto do isolamento térmico apresentado neste capítulo foi desenvolvido para uma árvore de natal molhada do tipo GLL, para um sistema de produção submarino pertencente à Petrobras, para o Campo de Mexilhão, na Bacia de Campos.

A Petrobras, diferentemente do que é tradicionalmente feito por outras operadoras internacionais da indústria do petróleo, nunca havia especificado isolamento térmico para um equipamento submarino (com exceção de alguns *flowlines*), até o final de 2006, quando o escopo de fornecimento do sistema de Mexilhão foi finalizado. Esta característica da empresa brasileira é considerada inusitada pelo resto do setor, principalmente no que concerne ao Gerenciamento de Escoamento dos seus sistemas.

As análises de Elementos Finitos desenvolvidas para o projeto do isolamento térmico da ANM visam dois objetivos principais:

1. Determinar o isolamento térmico necessário para atender ao Requisito de Tempo de Parada de Produção do projeto;
2. Determinar as máximas temperaturas onde componentes sensíveis a altas temperaturas estarão localizados;

É importante ressaltar que estes objetivos devem ser alcançados conjuntamente, ao longo do desenvolvimento do sistema de isolamento. A priorização de um, em detrimento do outro, traria como consequência um distanciamento do outro objetivo preterido, uma vez que estes estão totalmente interligados e envolvem interesses opostos. Em outras palavras, um isolamento excessivo em pontos onde componentes sensíveis a altas temperaturas estarão localizados beneficiará o alcance do objetivo 1 e o não alcance do objetivo 2. Portanto, os dois objetivos a serem alcançados com o sistema de isolamento térmico devem ser considerados simultaneamente e com o mesmo peso de relevância.

## 7.2 Cenário

Os dados listados a seguir compõem o cenário para o qual o isolamento térmico foi desenvolvido, baseados em documento Petrobras [17]:

- Sistema de alta pressão/alta temperatura (10000 psi/150°C);
- Lâmina d'água de 600 metros;
- Fluido do reservatório: gás e condensado;
- Temperatura máxima de fluxo na ANM: 125°C;
- Temperatura de fluxo a jusante do módulo de *choke* na ANM: 80°C;
- Temperatura mínima do fundo do mar: 8°C;
- Velocidade de corrente no fundo do mar: considerada nula;
- Temperatura no reservatório: 147 °C;
- Temperatura crítica de formação de hidrato: 25 °C;
- Produção de areia: não existe;
- Produção de água: sim;
- ANM convencional DLL GLL, alta pressão/alta temperatura, com BAP;
- Sistema de injeção química de inibidores de hidrato (prevenção ativa);
- Requisito de Tempo de Parada de Produção: a ANM deve possuir isolamento térmico, de forma a garantir que o fluido de produção não entre na região de formação de hidrato em até 6 horas, após uma parada da produção;

Com relação à classificação do cenário como sendo de alta pressão/alta temperatura (em inglês, *High Pressure / High Temperature – HP/HT*), não há limites internacionalmente estabelecidos. Santos [19] propõe como limites, 10000 psi, para pressão e 350°F (177°C), para a temperatura. A Petrobras optou por classificar o sistema como HP/HT, pelo fato de que, tanto a pressão, quanto a temperatura, são consideravelmente superiores às faixas de valores comumente encontradas nos seus sistemas.

### **7.3 Descrição dos Modelos de Elementos Finitos**

Os modelos de Elementos Finitos utilizados partem da composição da montagem dos componentes que efetivamente influenciarão nas transferências de calor ocorridas durante a operação e uma parada da ANM.

Basicamente, os componentes diretamente ligados à passagem do fluido de produção devem ser corretamente modelados, principalmente as massas de aço que envolvem a passagem do fluido, uma vez que armazenarão grande parte do calor contido no equipamento, inclusive a camada depositada do metal inonel, necessário para a proteção à corrosão interna do equipamento, na passagem. Suportes estruturais, painéis de operação de válvulas, proteção catódica, linhas hidráulicas e elétricas não fazem parte do modelo de Elementos Finitos.

Como mencionado no item 5.2 deste trabalho, o fluido de produção, fluidos hidráulicos e volumes de água presos no equipamento são modelados como volumes sólidos.

Em todas as análises, o material térmico-isolante adotado foi o NOVOLASTIC HT [10], após ter-se realizado um processo de seleção do material térmico-isolante, como descrito anteriormente neste trabalho. Este material foi o que melhor se adequou às especificações técnicas do cenário.

### 7.3.1 Componentes Modelados da ANM

A Figura 25 mostra a montagem da ANM do Projeto Mexilhão, sem o módulo de *choke*, a capa de proteção e a BAP. A Figura 26 mostra outras vistas da ANM. O módulo de *choke* é mostrado na vista do centro.

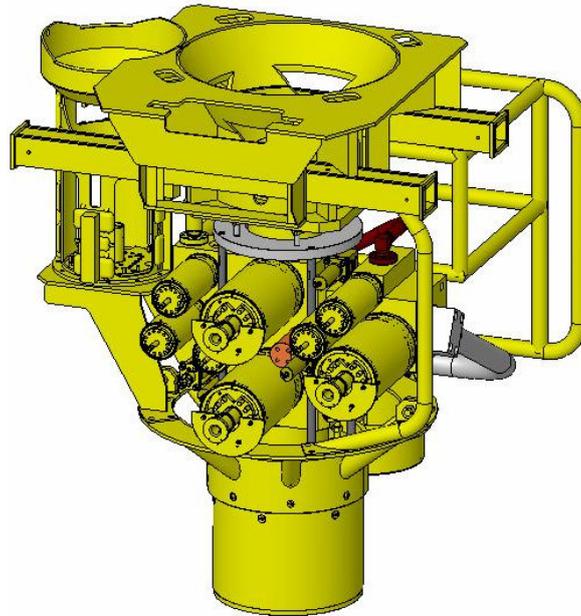


Figura 25: ANM do Projeto Mexilhão.

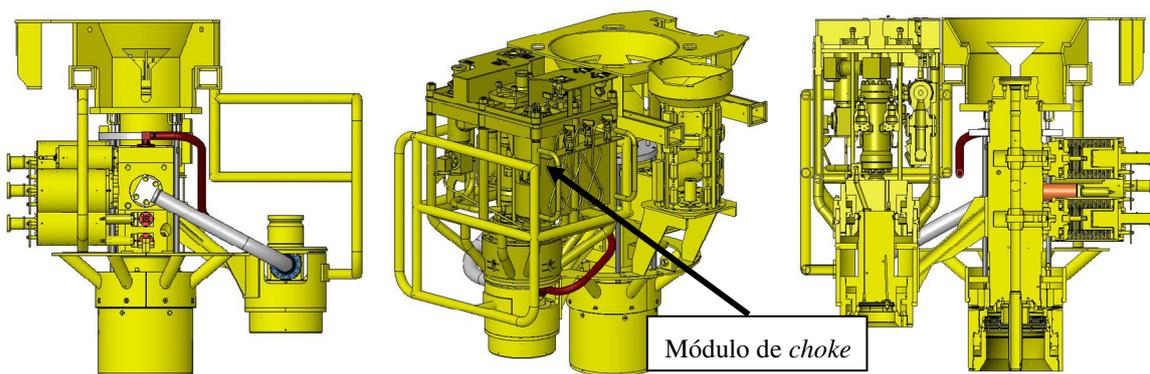


Figura 26: ANM em vista lateral, com o módulo de *choke* e um corte.

A Figura 27 mostra o modelo de Elementos Finitos inicial, baseado na ANM. Componentes estruturais e de orientação, funis guia, componentes elastoméricos, proteção catódica, cabos elétricos e linhas hidráulicas não foram modelados. A cor amarela representa o material térmico-isolante NOVOLASTIC e cinza representa as partes metálicas. Todos os componentes foram simplificados geometricamente, removendo-se chanfros, filetes, roscas, etc., pelo fato de dificultarem a geração da malha de elementos finitos e por representarem influência irrelevante nos resultados das análises.

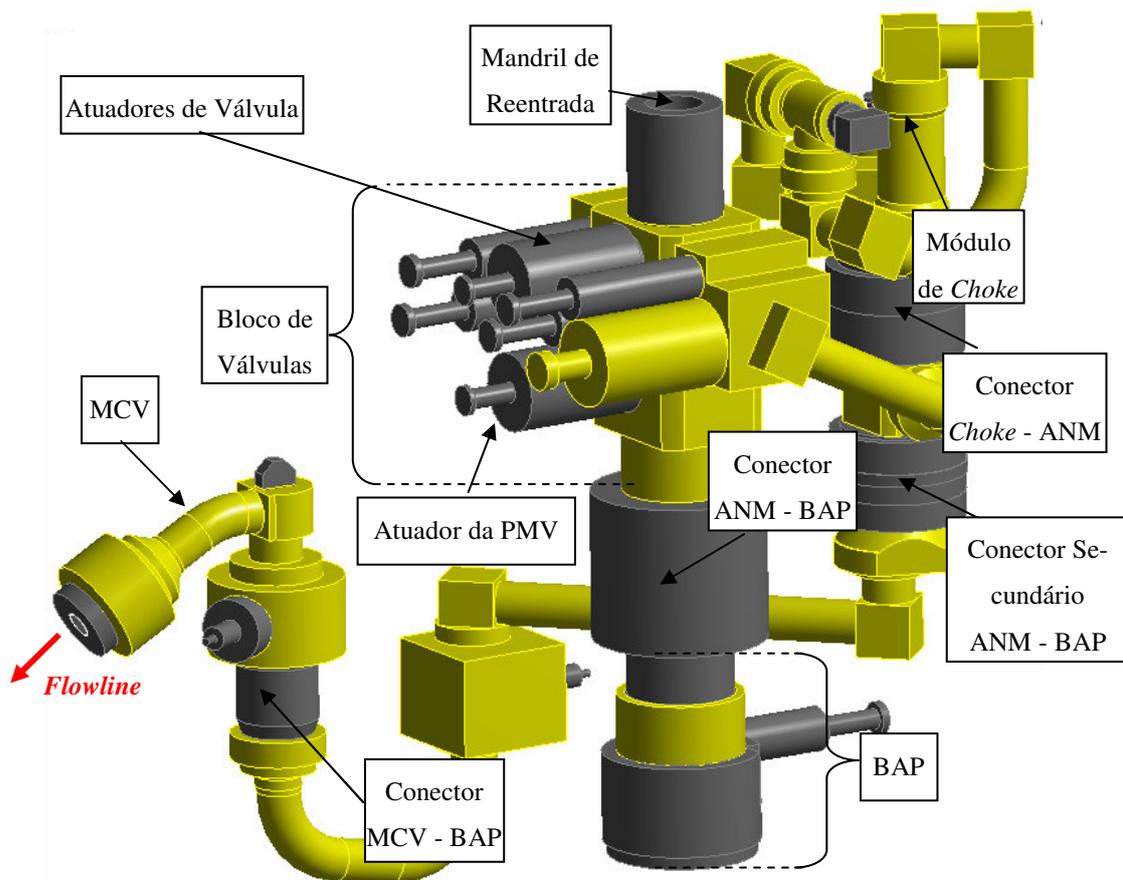


Figura 27: Modelo inicial de Elementos Finitos – Componentes.

A Figura 28 mostra a massa de aço modelada.

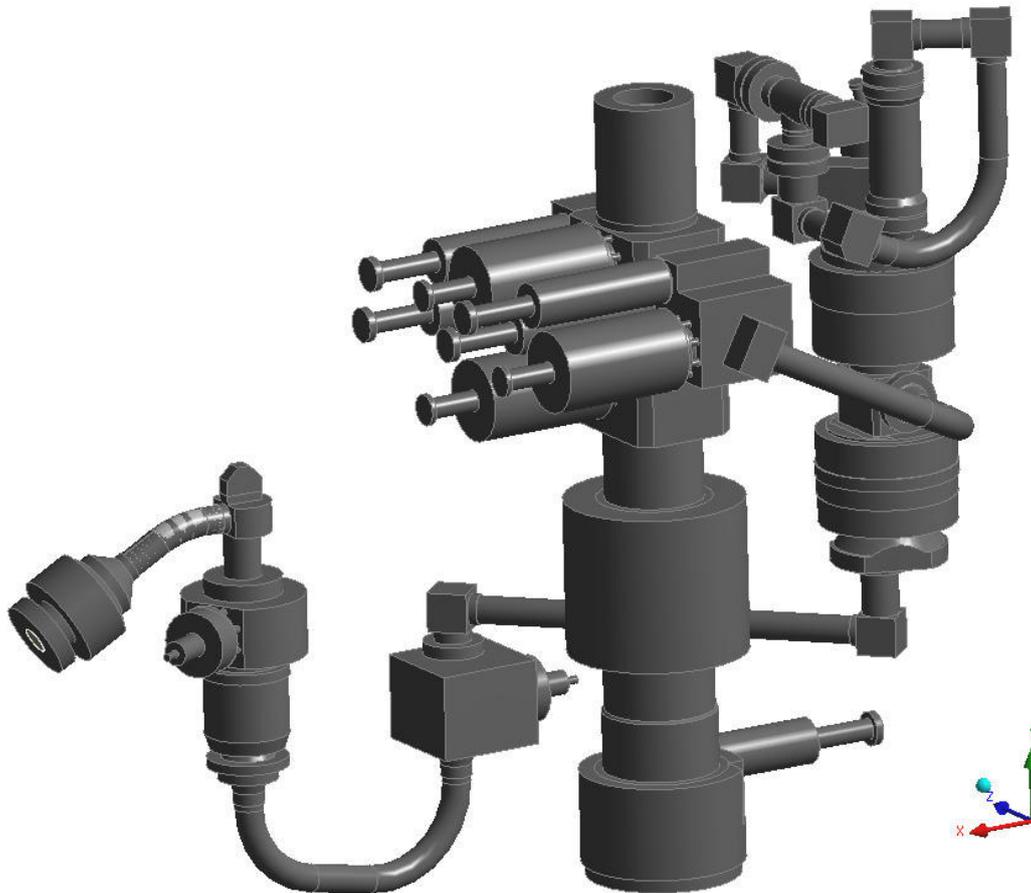


Figura 28: Parte metálica do modelo de Elementos Finitos.

### 7.3.2 Hipóteses Assumidas para as Análises de Elementos Finitos

- O fluido de produção e volumes de água do mar presos são considerados como estagnados, tanto em regime permanente, quanto em transiente;
- O efeito térmico provocado pelo aquecimento da ANM pelo gás, durante a produção, é levado em conta mantendo-se constante a temperatura do volume que o representa;
- O efeito de convecção natural nos fluidos é considerado, por meio da metodologia de cálculo das condutividades térmicas equivalentes;
- As propriedades térmicas e físicas dos materiais envolvidos, bem como os coeficientes de transferência de calor são assumidos como constantes, independentemente da temperatura;
- Volumes pequenos de fluidos, principalmente de água marinha e componentes elastoméricos, têm um efeito não preponderante nos resultados das análises, podendo ser, portanto, omitidos. Na verdade, a modelagem de um volume de aço, substituindo um volume de água marinha, aumenta o conservadorismo da análise, pelo fato da condutividade térmica do aço ser bem maior que a da água, o que implica numa maior perda de calor e capacidade térmica menor, o que implica numa menor quantidade de calor inicialmente armazenada;
- Assume-se que o volume de fluido de produção a montante da primeira válvula da ANM (*Primary Master Valve*), mantém a sua temperatura inicial, uma vez que este permanecerá trocando calor com a massa de fluido do poço;
- Efeitos térmicos benéficos causados pela pintura do equipamento foram desconsiderados;

## 7.4 Dados de Entrada para as Análises de Elementos Finitos

A Tabela 6 lista as propriedades térmicas e físicas dos materiais considerados nas análises de Elementos Finitos:

Tabela 6: Propriedades térmicas e físicas dos materiais considerados nas análises de Elementos Finitos.

<b>Material</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Calor Específico (J/kg.°C)</b>	<b>Condutividade Térmica (W/m.°C)</b>	<b>Viscosidade Dinâmica (cP)</b>	<b>Coefficiente de Expansão Térmica (m/m/°C)</b>
Aço Carbono [12]	7850	460	45	-	11,7 x 10 <sup>-6</sup>
Aço Inconel [12]	10850	457	12,5	-	11,1 x 10 <sup>-6</sup>
NOVOLASTIC HT [10]	950	2512	0,16	-	-
Gás [18]	64	3091	0,061	0,0122	3,32 x 10 <sup>-3</sup>
Água Marinha [12]	1028	3986	5,68	1,76	1,03 x 10 <sup>-4</sup>

## **7.5 Condições de Contorno**

As condições de contorno em uma análise térmica de Elementos Finitos envolvem a prescrição de temperaturas, coeficientes de transferência de calor (convecção com o ambiente marinho) e taxas de transferência de calor em determinada região do modelo.

### **7.5.1 Condições de Contorno para as Análises em Regime Permanente**

1. Temperatura inicial do fluido de produção mantida constante;
2. Condição adiabática (taxa de fluxo de calor nula) nos limites do modelo, como o flange do MCV, o mandril de reentrada e a face inferior do conector da ANM - BAP. Este tipo de condição de contorno é útil nos casos em que grande parte do modelo é exposta a uma determinada condição (convecção com o ambiente marinho), com exceção de algumas faces (por exemplo, o fundo de um copo em contato com a mesa). Esta aplicação de condição de contorno possibilita o desacoplamento da análise térmica de um sistema submarino em várias sub-análises, como é o caso da análise de uma ANM;
3. Convecção com o ambiente marinho, aplicada em todas as faces da ANM que ficarão em contato com a água marinha;

A Figura 29 mostra os locais de aplicação das condições de contorno adiabáticas:

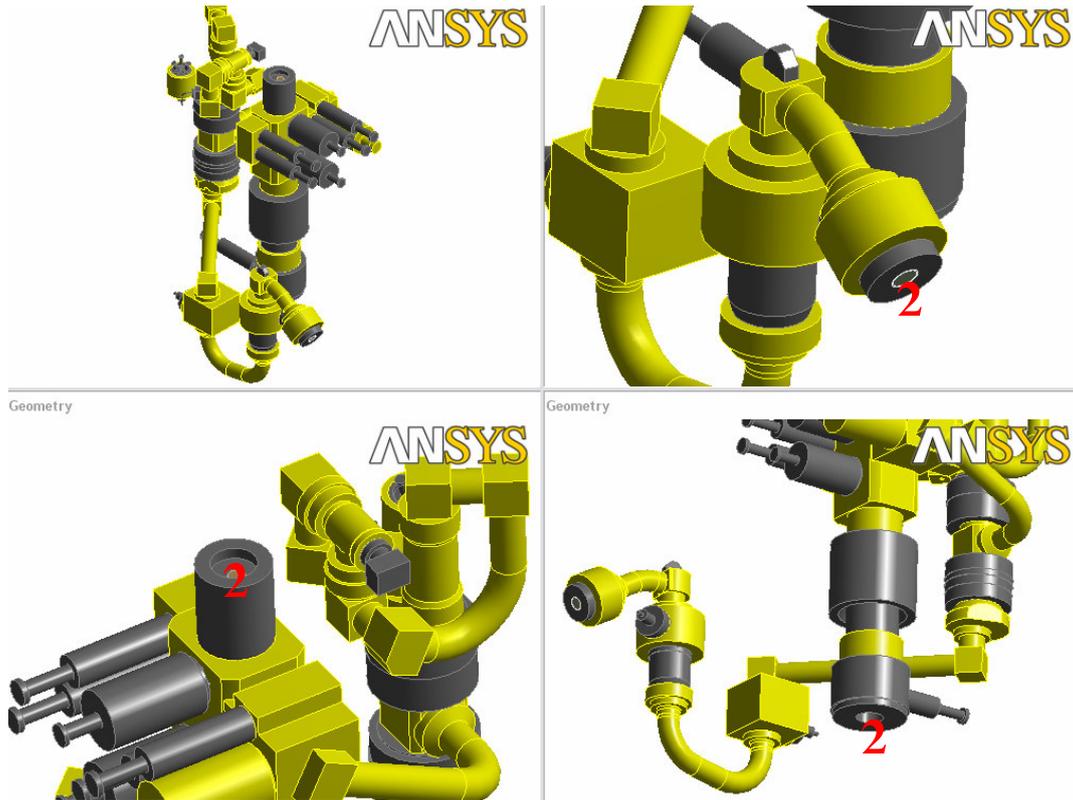


Figura 29: Condições de contorno adiabáticas nos modelos.

### 7.5.2 Condições de Contorno para as Análises em Regime Transiente

As condições de contorno 2 e 3 para as análises em regime transiente são as mesmas que em regime permanente. As condições de aplicação da temperatura inicial (1) são removidas, uma vez que estas análises simulam o resfriamento do equipamento, durante uma parada de produção, com exceção do volume de fluido a montante da PMV, que é mantido à temperatura constante (vide Figura 30).

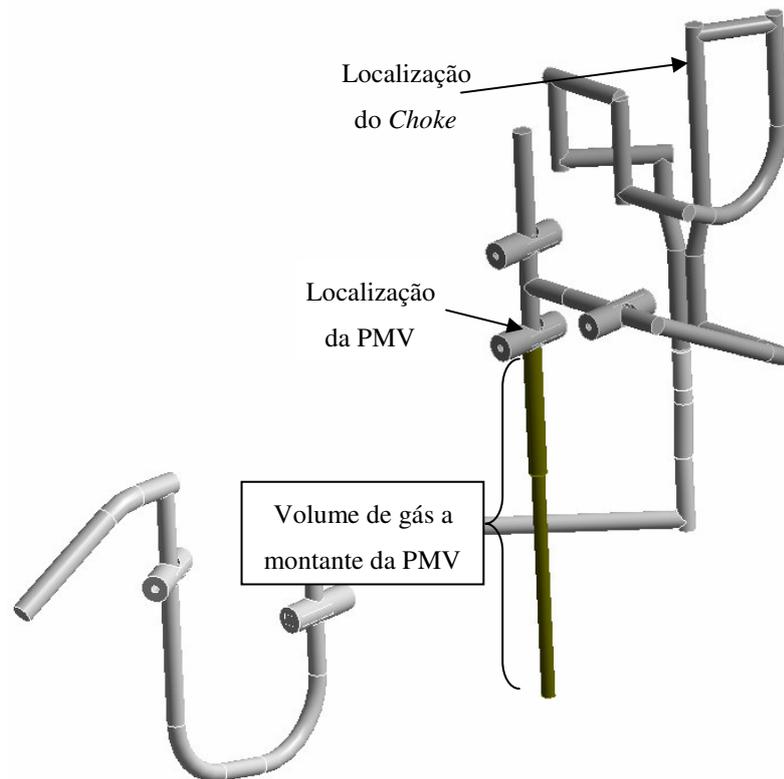


Figura 30: Volumes representando o fluido de produção (gás).

## 7.6 Resultados

Os resultados estão organizados em uma seqüência de concepções para a performance do isolamento térmico da ANM, até o atendimento dos critérios de projeto, tanto do Requisito de Tempo de Parada de Produção, como dos requisitos de máxima temperatura para os quais alguns componentes estão qualificados.

### 7.6.1 Concepção 1

#### Descrição do Modelo

O primeiro *layout* do isolamento foi todo composto com uma camada de isolamento de 2 polegadas. Os conectores hidráulicos e a linha de tomada de gás para o núcleo de sensores não foram isolados. O corpo dos sensores de pressão e temperatura não pode ser isolado, de forma a se evitar medições de temperatura incorretas, por conta da ação do material isolante. A Figura 31 mostra estas regiões em detalhe.

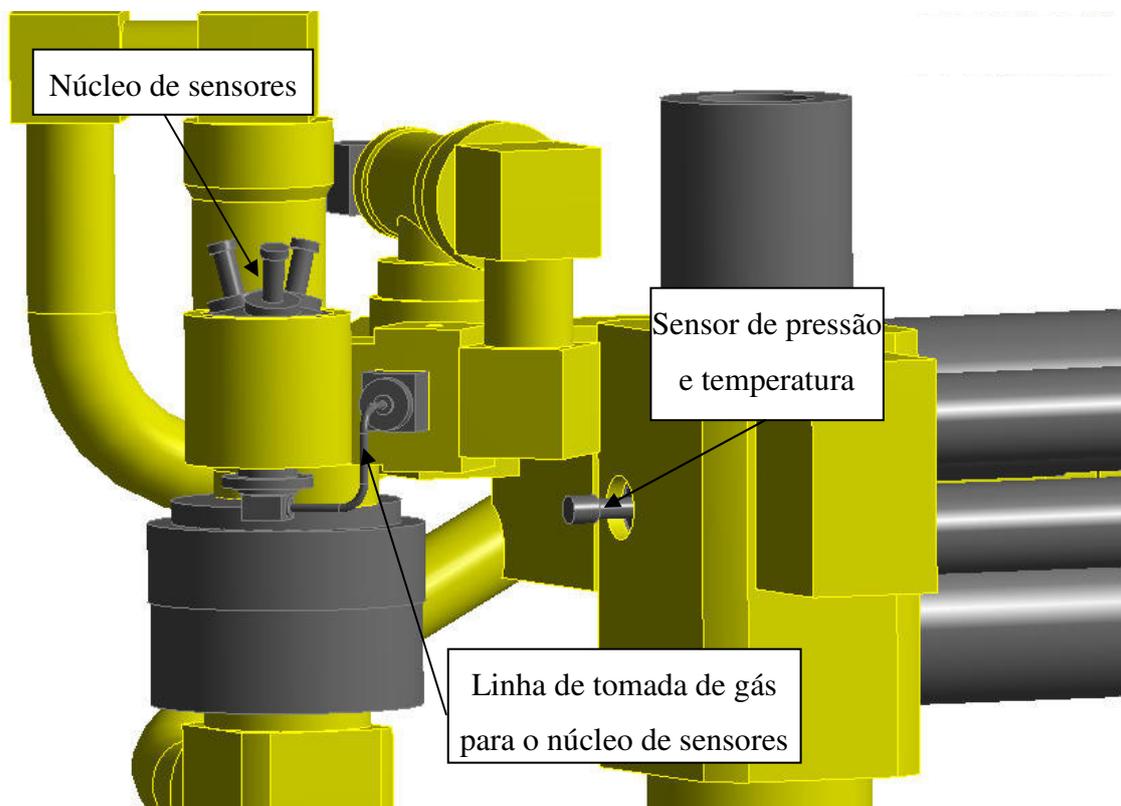


Figura 31: Isolamento em torno dos sensores – Concepção 1.

Os atuadores de válvula são locais de perda de calor para o meio externo, portanto o maior e último atuador, localizado no bloco de válvula, foi inicialmente isolado, de forma a se manter o gás um pouco mais aquecido na saída do bloco.

A Figura 27 mostra o isolamento do atuador.

### **Malha de Elementos Finitos**

A Tabela 7 lista a quantidade de nós e elementos contidos na malha de elementos finitos. O grande número de nós se deve principalmente à camada de revestimento de inonel, na passagem do fluido de produção. A Figura 32 mostra a malha e o detalhe da camada de inonel.

Tabela 7: Malha de Elementos Finitos – Concepção 1.

<b>Malha de Elementos Finitos – Concepção 1</b>	
<b>Número de Nós</b>	<b>Número de Elementos</b>
625677	282116

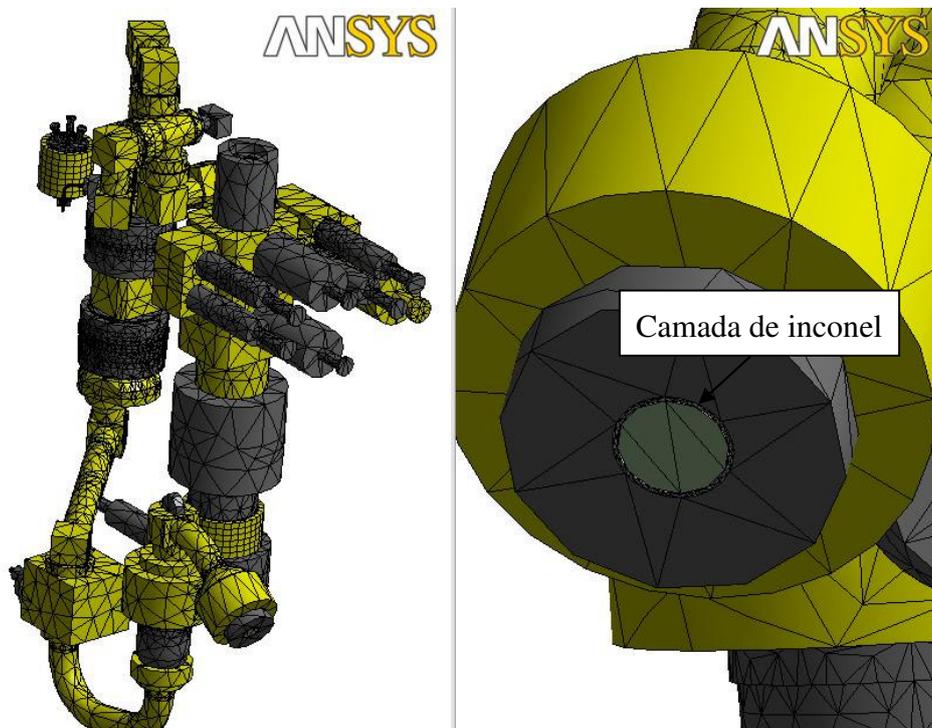


Figura 32: Malha de elementos finitos – Concepção 1.

### **Resultados – Regime Permanente (Operação)**

A Figura 33 mostra a distribuição de temperaturas ao longo do modelo, para a condição de operação. As regiões em cinza claro e escuro apresentam temperaturas iguais ou inferiores á TFH. O indicador azul “Min” e o vermelho “Max” indicam o ponto de mínima e máxima temperatura respectivamente. Estas características estarão presentes em todas as figuras de distribuição de temperatura deste trabalho.

A Figura 34 mostra a distribuição de temperaturas na massa de aço do modelo. As regiões cobertas pelo isolamento térmico estão consideravelmente mais quentes que as descobertas.

A Figura 35 mostra a distribuição de temperaturas, a partir de um corte transversal do bloco de válvulas. Mesmo na região dos atuadores de válvula não isolados, a perda de calor não foi acentuada.

A Figura 36 mostra a distribuição de temperaturas em uma seção um corte do MCV, onde componentes elastoméricos sensíveis a altas temperaturas serão instalados. A temperatura máxima para a qual estes estão qualificados é 80°C, a mesma temperatura do gás naquela região. A temperatura no local de instalação destes componentes está por volta de 68°C.

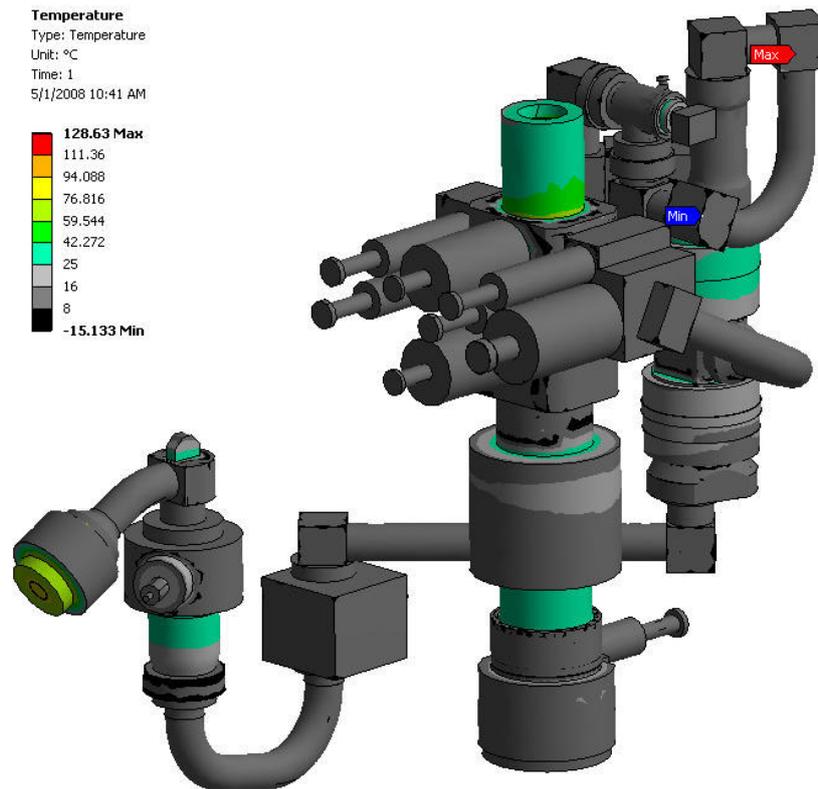


Figura 33: Distribuição de temperaturas durante operação – Concepção 1.

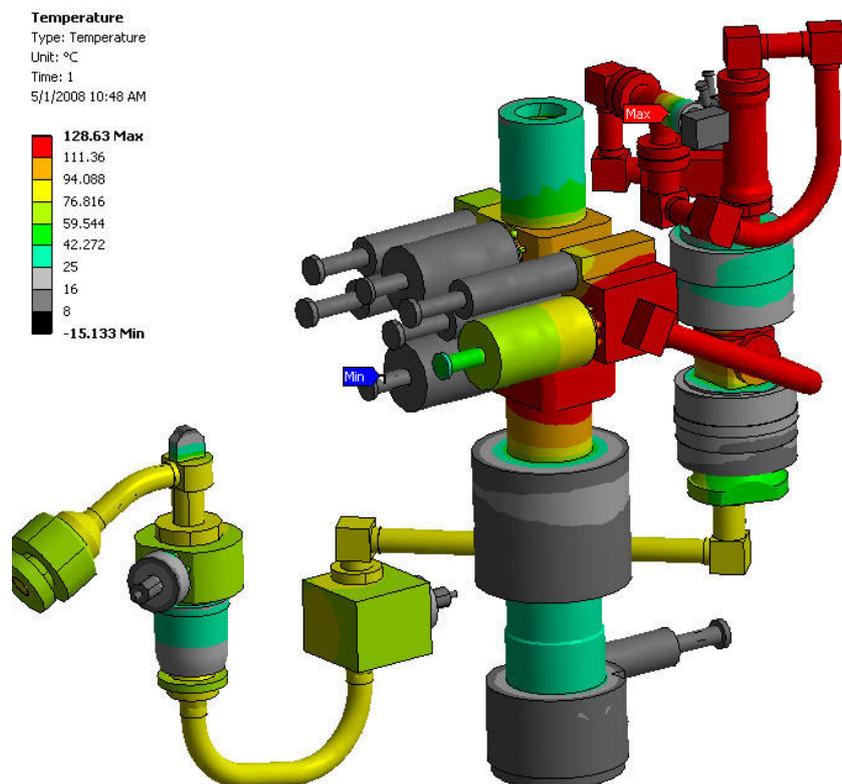


Figura 34: Distribuição de temperaturas (isolamento não mostrado) – Concepção 1.

Temperature  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 1  
5/1/2008 11:00 AM

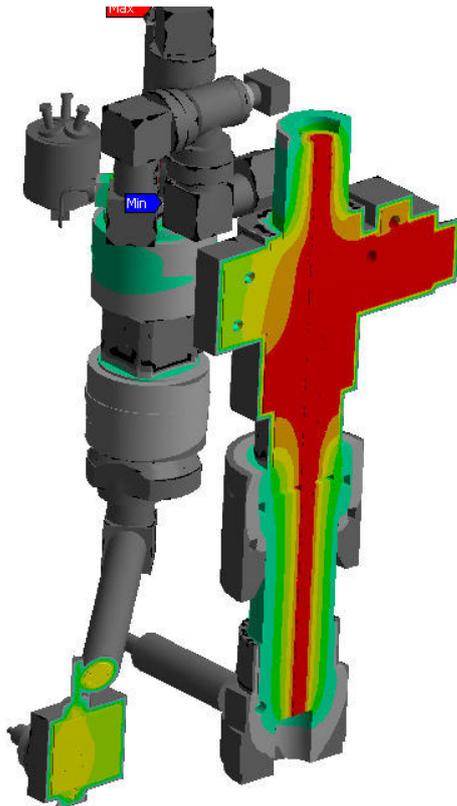
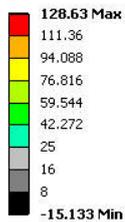


Figura 35: Distribuição de temperaturas em corte transversal do bloco de válvulas, durante operação – Concepção 1.

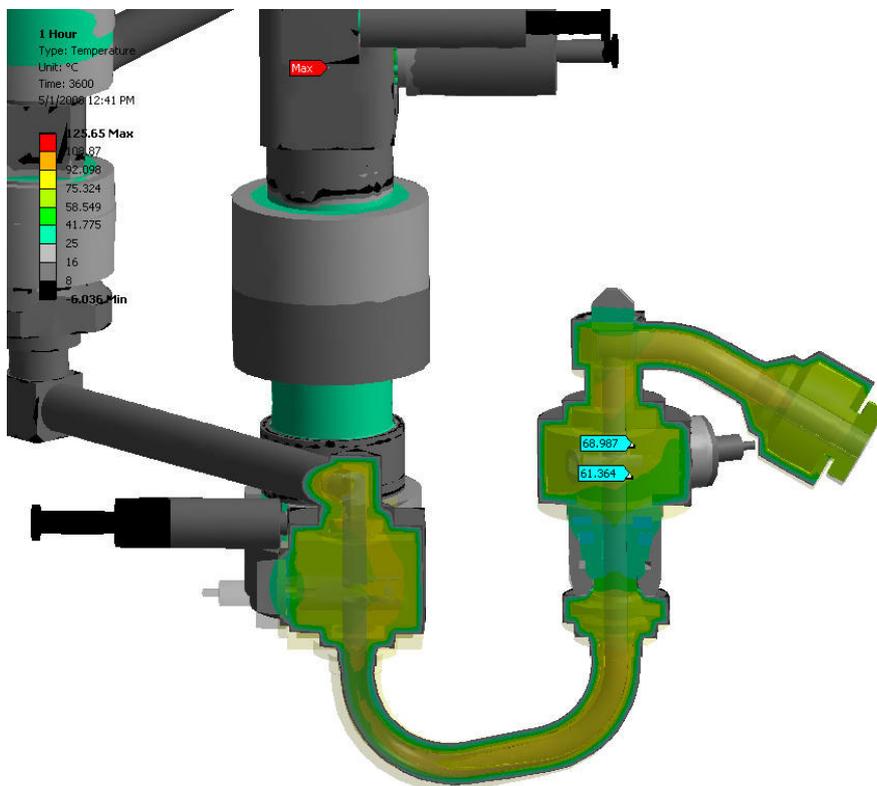


Figura 36: Temperatura nos componentes elastoméricos – Concepção 1.

### **Resultados – Regime Transiente (Parada de Produção)**

Os resultados da análise de parada de produção são mostrados para duas, quatro e seis horas de parada (Requisito de Parada de Produção). Se todo o fluido de produção apresentar temperaturas acima da TFH, o isolamento térmico atende aos requisitos técnicos especificados.

A Figura 37 à Figura 39 mostram a distribuição de temperaturas, após duas, quatro e seis horas de parada da produção, respectivamente.

Com duas horas de parada de produção, duas regiões do fluido de produção apresentam temperaturas iguais ou inferiores à TFH:

- Conector do MCV;
- Mandril de reentrada;

Isto indica baixíssima performance do isolamento térmico, uma vez que o requisito de parada prevê seis horas.

Com quatro e seis horas, estas regiões aumentam e duas novas regiões críticas surgem:

- Conector do módulo de *choke* com a ANM;
- Conector secundário da ANM com a BAP;

A Concepção 1 proposta para o sistema de isolamento da ANM atende ao Requisito de Máxima Temperatura. Os componentes sensíveis a altas temperaturas estão qualificados para a condição de operação do equipamento.

A Concepção 1 não atende ao Requisito de Parada de Produção. Somente por duas horas de parada o equipamento consegue atendê-lo.

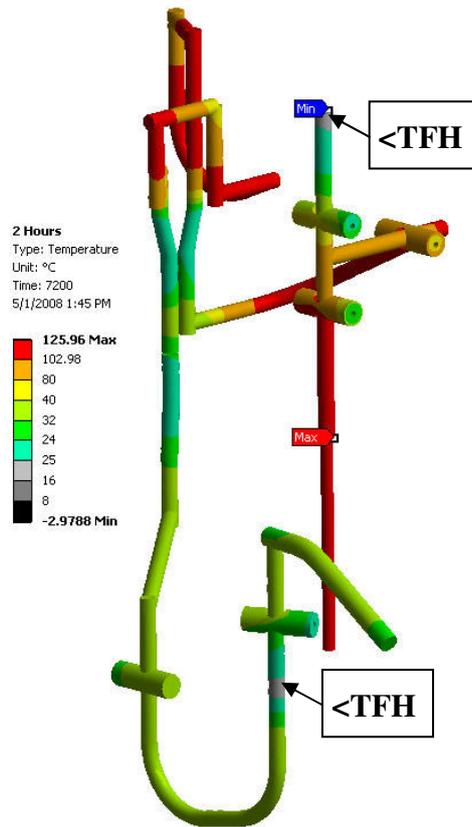


Figura 37: Temperaturas do gás após 2 horas de parada de produção – Concepção 1.

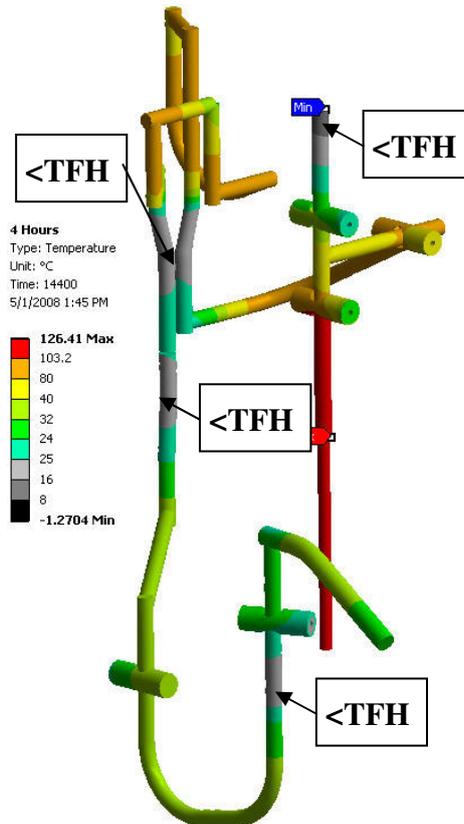


Figura 38: Temperaturas do gás após 4 horas de parada de produção – Concepção 1.

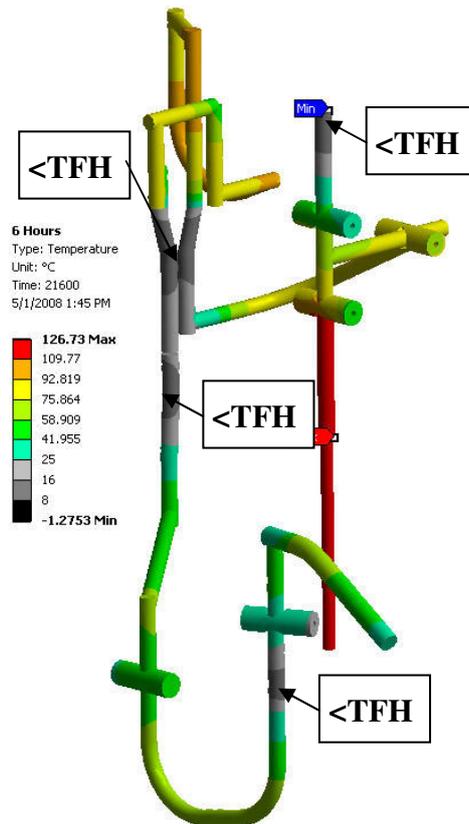


Figura 39: Temperaturas do gás após 6 horas de parada de produção – Conceção 1.

## 7.6.2 Concepção 2

### Descrição do Modelo

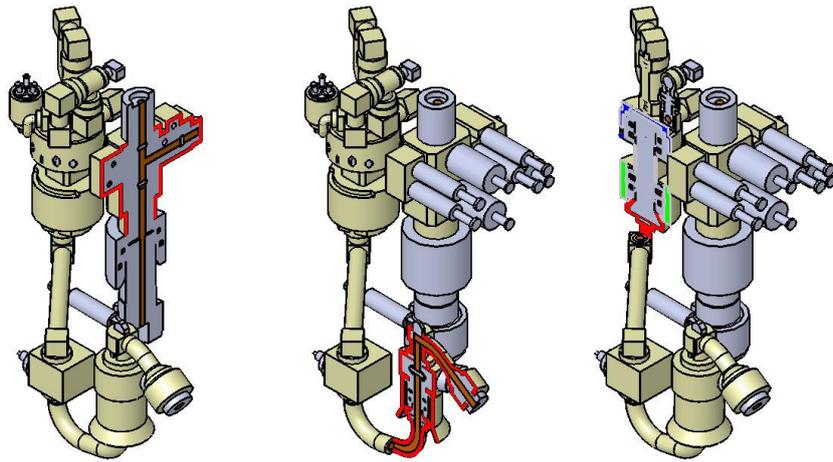
Os resultados da Concepção 1 mostraram uma baixa performance do isolamento térmico proposto. Com apenas duas horas de parada, duas regiões apresentaram temperaturas inferiores à TFH. Para alcançar as seis horas de parada de produção exigidas, sem regiões suscetíveis à formação de hidrato, uma considerável melhoria no sistema de isolamento deve ser efetuada.

O segundo layout de isolamento térmico para a ANM procurou não só melhorar as regiões com isolamento deficiente, mas também reduzir ou eliminar isolamento onde fosse possível. A seguir, as modificações propostas para a Concepção 2 estão listadas e explicadas:

- Isolamento abaixo do conector hidráulico ANM – BAP retirado: o isolamento nesta região não faz sentido, uma vez que, de acordo com a hipótese de troca de calor direta do fluido de produção abaixo da PMV, com o poço, a temperatura é mantida constante;
- Isolamento no atuador de válvula retirado: a Concepção 1 mostrou temperaturas em torno de 92°C na cavidade da válvula com atuador isolado (última válvula do bloco de válvula), após seis horas de parada da produção, possibilitando a redução de isolamento térmico nesta região;
- Isolamento térmico nos conectores *Choke* – ANM e ANM – BAP secundário: estas regiões mostraram-se críticas, após quatro horas de parada da produção. O conector secundário ANM – BAP é instalado em um *hub*, circundado por um funil guia, com a função de guiar a descida da árvore na base adaptadora. A camada de isolamento preencheu esta região quase que totalmente, resultando numa camada de isolamento de 5 polegadas de espessura. Para o conector *Choke* – ANM, definiu-se uma camada de isolamento de 3 polegadas. Algumas “janelas” são necessárias no isolamento deste conector, com o objetivo de deixar à mostra indicadores de nível e travamento do conector. Esta peculiaridade foi a principal razão para o não isolamento deste componente na primeira Concepção;

- Isolamento térmico de duas polegadas de espessura na tomada de gás para o núcleo de sensores: esta região não foi inteiramente modelada na Concepção 1. Para manter-se coerência nas melhorias propostas, esta região passou a ser isolada. A linha não estava preenchida por gás, na Concepção 1;
- Isolamento no conector hidráulico MCV - BAP: esta região do modelo tornou-se crítica, após duas horas de parada de produção. Quando o MCV é instalado na BAP, através do seu conector, um volume de água fica preso entre o conector e a parte da BAP onde ele é travado. Esta “água presa” não prejudica a performance do isolamento, mas ao contrário, beneficia a performance térmica desta região. Acontece que a superfície abaixo da região onde o conector é travado fica exposta à água marinha, o que acarreta numa grande perda de calor desta região. O isolamento unicamente do conector, portanto, não é garantia de atendimento do requisito nesta região. Propôs-se então um dispositivo que libera a saída de água, no momento do travamento do conector, de forma a se evitar a ocorrência de calço hidráulico e impedir a troca da água marinha “aprisionada”. Esta troca acarretaria uma perda de calor constante na região;

A Figura 40 mostra a distribuição das espessuras do isolamento. Onde não especificado, a espessura é de 2 polegadas. A Figura 41 e Figura 42 mostram o modelo preparado para a Concepção 2:



- ESPESSURA DO REVESTIMENTO = 2"
- ESPESSURA DO REVESTIMENTO = 3"
- ESPESSURA DO REVESTIMENTO = 5"

Figura 40: Espessuras da camada de isolamento – Concepção 2.

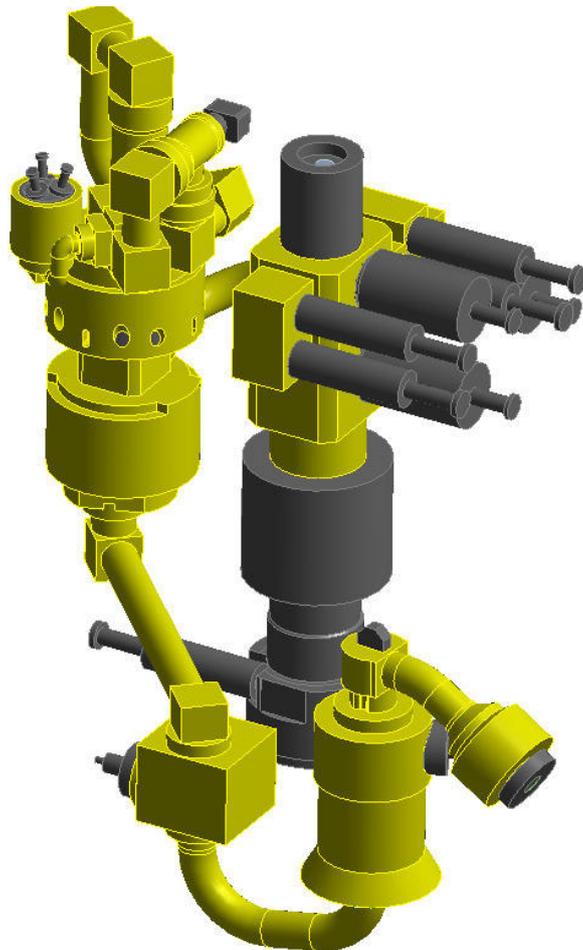


Figura 41: Modelo de Elementos Finitos – Concepção 2.

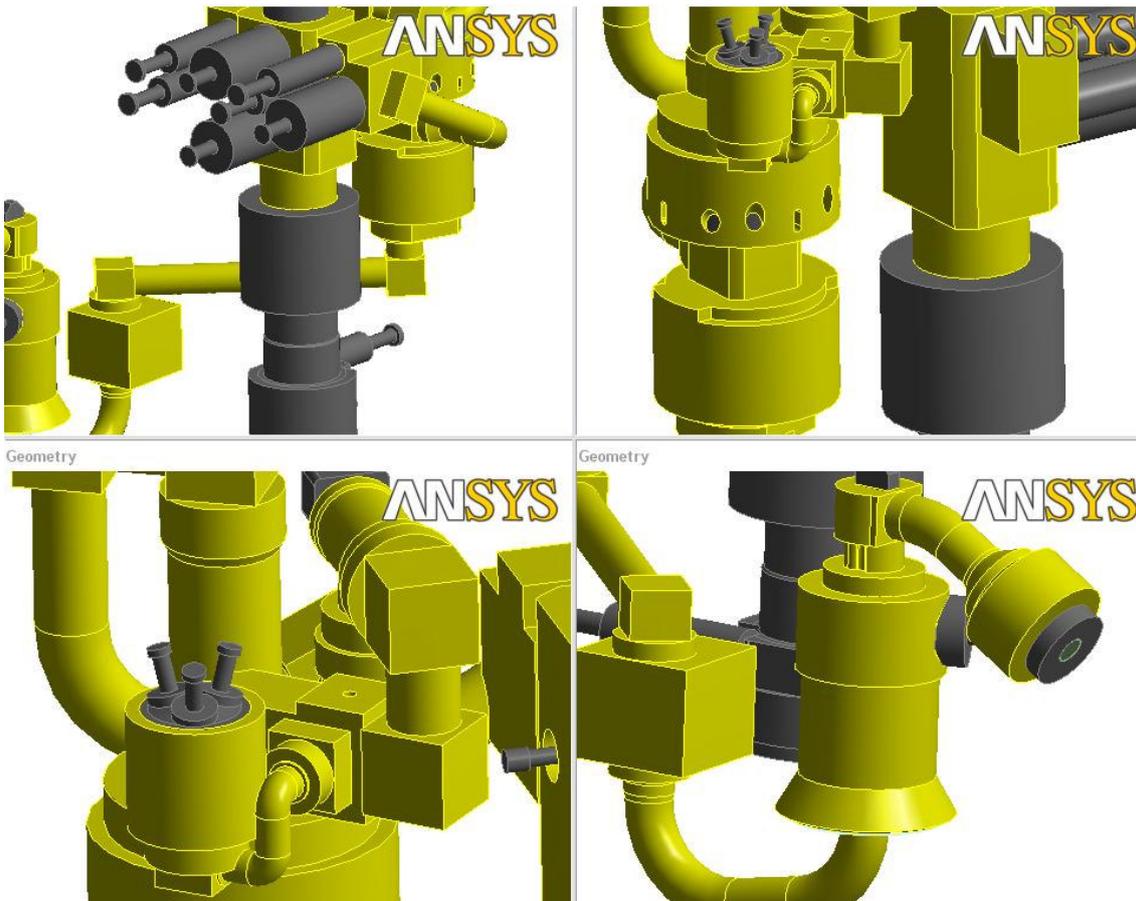


Figura 42: Modelo de Elementos Finitos – Concepção 2.

### Malha de Elementos Finitos

A Tabela 8 lista a quantidade de nós e elementos contidos na malha de Elementos Finitos para a Concepção 2. O balanço entre as reduções e aumentos de isolamento acarretou num pequeno aumento da malha de elementos finitos. A Figura 43 mostra a malha de elementos finitos para a Concepção 2:

Tabela 8: Malha de Elementos Finitos – Concepção 2.

<b>Malha de Elementos Finitos – Concepção 2</b>			
<b>Número de Nós</b>	<b>Aumento ente iterações (%)</b>	<b>Número de Elementos</b>	<b>Variação ente iterações (%)</b>
723857	16	364463	29

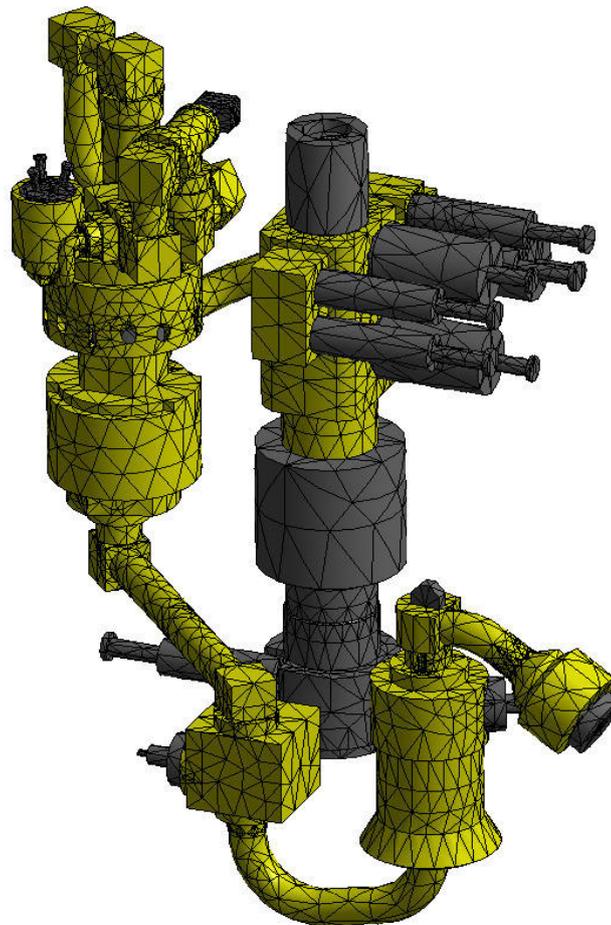


Figura 43: Malha de elementos finitos – Concepção 2.

## **Resultados – Regime Permanente (Operação)**

A Figura 44 mostra a distribuição de temperaturas ao longo do modelo, para a condição de operação. Observe a perda de calor na ligação dos atuadores com o bloco de válvulas e nas janelas do isolamento do conector secundário ANM – BAP.

A Figura 45 mostra a distribuição de temperaturas no modelo, sem o sistema de isolamento térmico. Os conectores e todo o MCV são mantidos aquecidos. O módulo de *choke* continua com baixa perda de calor.

A Figura 46 mostra a distribuição de temperaturas, a partir de um corte transversal do bloco de válvulas. A retirada do isolamento do atuador de válvula não comprometeu a performance térmica da ANM.

A Figura 47 mostra a distribuição de temperaturas em uma seção transversal do MCV, onde componentes elastoméricos sensíveis a altas temperaturas serão instalados. A temperatura nesta região está por volta de 79°C, quase chegando aos 80°C, temperatura máxima para a qual estes equipamentos estão qualificados. Esta região recebeu um aumento de isolamento térmico, da Concepção 1 para a 2, por se tornar uma área crítica de formação de hidrato, após duas horas de parada de produção. Este aumento não inviabilizou a operação do equipamento.

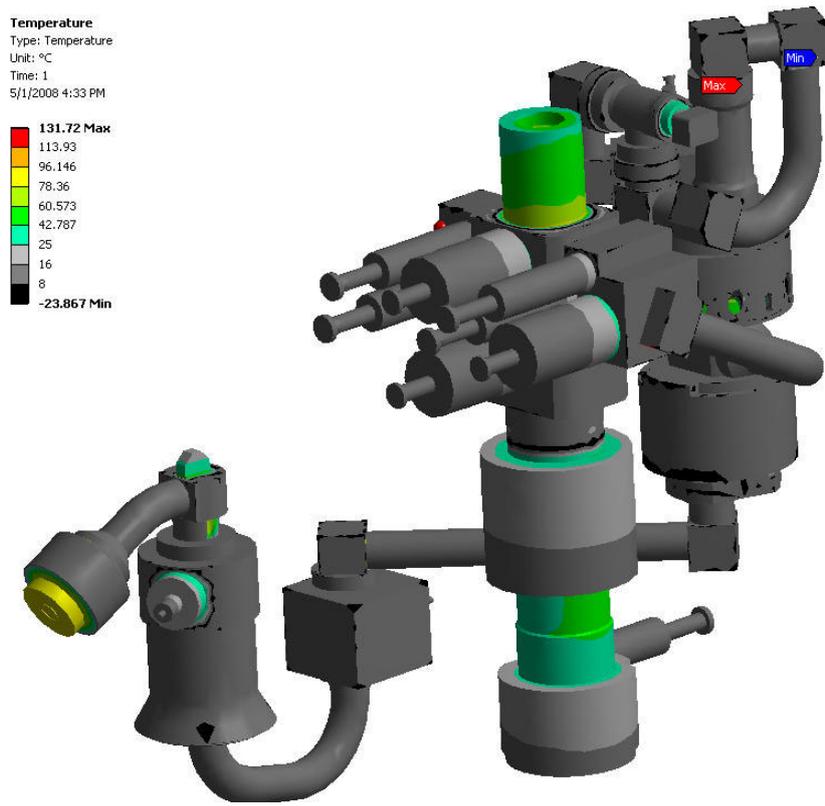


Figura 44: Distribuição de temperaturas durante operação – Concepção 2.

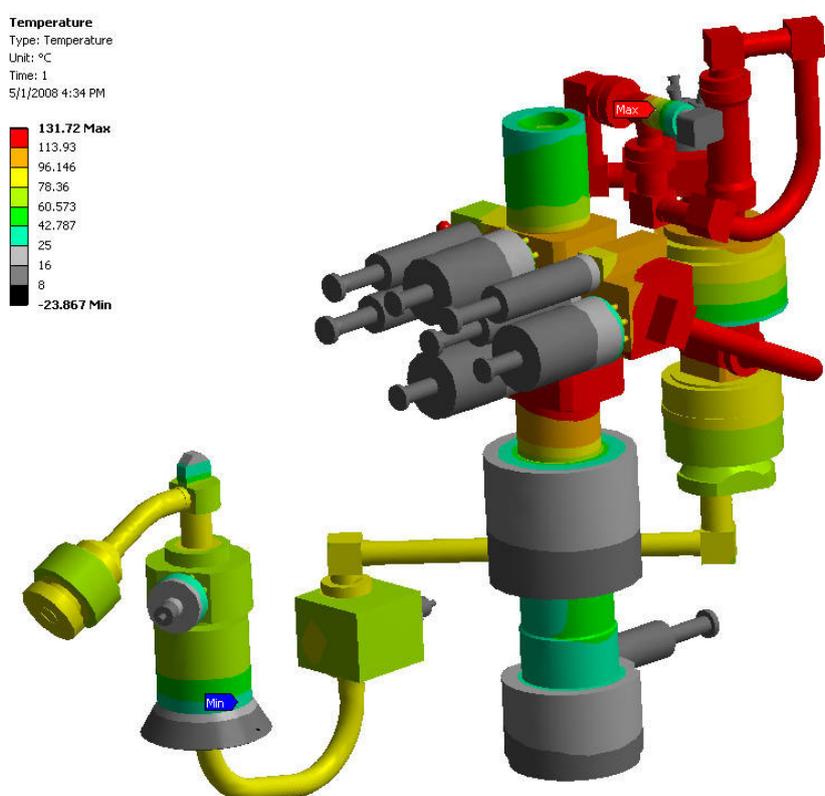


Figura 45: Distribuição de temperaturas (isolamento não mostrado) – Concepção 2.

Temperature  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 1  
5/1/2008 4:45 PM

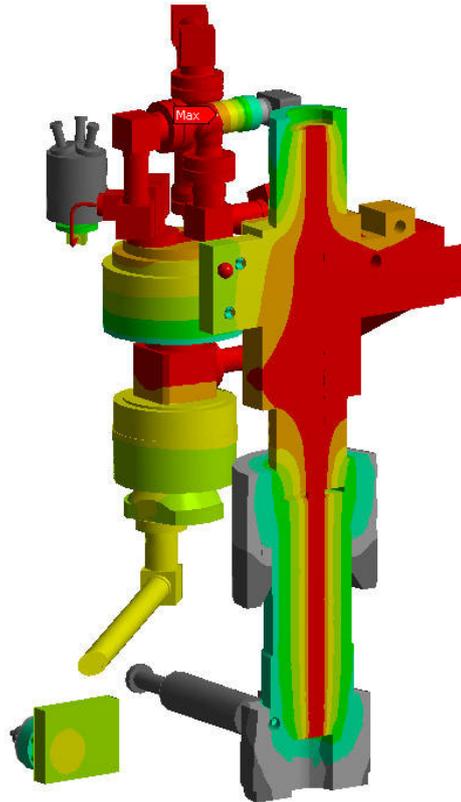
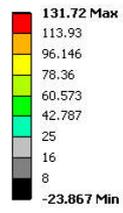


Figura 46: Distribuição de temperaturas em corte transversal do bloco de válvulas, durante operação – Concepção 2.

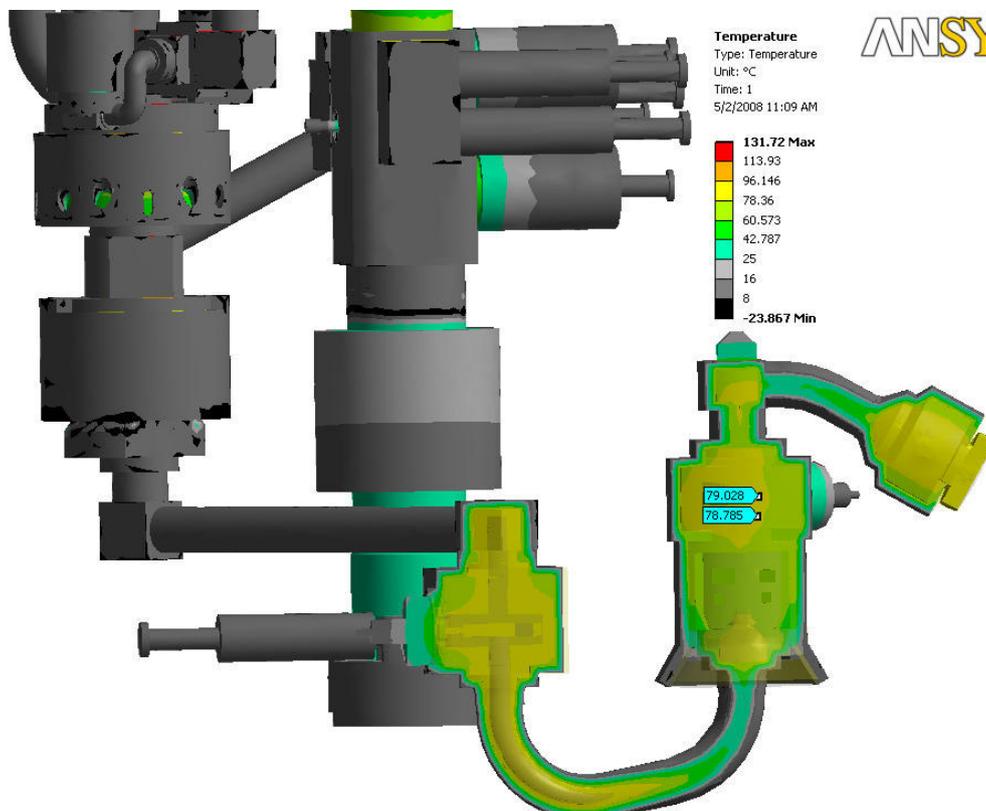


Figura 47: Temperatura nos componentes elastoméricos – Concepção 2.

### **Resultados – Regime Transiente (Parada de Produção)**

A Figura 48 à Figura 50 mostram a distribuição de temperaturas, após duas, quatro e seis horas de parada da produção, respectivamente. Observe que não surgem regiões com temperatura igual ou inferior à TFH, após 2 horas de parada da produção.

Após quatro horas de parada, o volume de gás que preenche o mandril de reen-trada apresenta temperaturas iguais ou inferiores à temperatura de formação de hidrato. Esta região está mais exposta ao ambiente marinho do que realmente estará, após a instalação da ANM, devido ao fato de que é instalado um componente no mandril, chamado *Tree Cap* (Tampa da Árvore), que tem a função de fechar a passagem do fluido de produção na direção do mandril. A tampa possui uma massa considerável de aço, o que significa que o resfriamento nesta região será mais lento.

Outro detalhe é a probabilidade de ocorrência de hidrato nesta região. Conforme mencionado no item 3.1.1 deste trabalho, a probabilidade de formação de hidrato em pontos de alta elevação do equipamento submarino é muito baixa, devido à separação de fases do fluido de produção, durante uma parada de produção. Faz-se necessária a presença de gás e água em contato, para que hidrato possa formar. A região do mandril, portanto, não necessita atender o Requisito de Parada de Produção na sua totalidade.

Não havendo outras regiões do fluido de produção com temperatura igual ou inferior à TFH, a performance do isolamento térmico necessária para atender ao Requisito de Parada de Produção foi atingida.



Figura 48: Temperaturas do gás após 2 horas de parada de produção – Concepção 2.

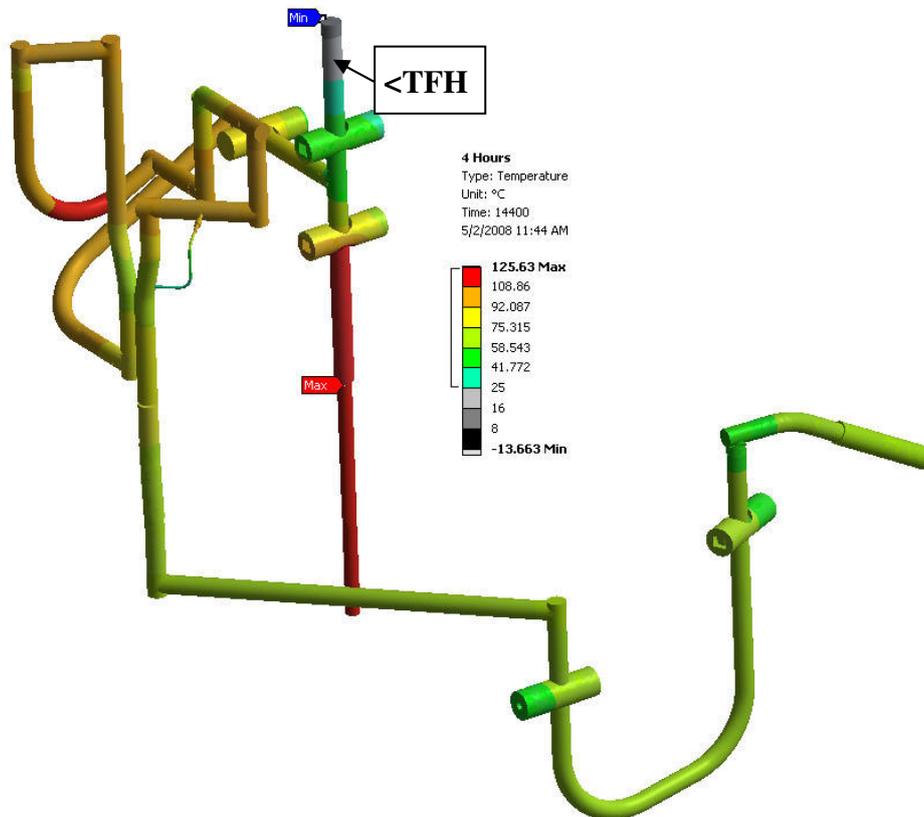


Figura 49: Temperaturas do gás após 4 horas de parada de produção – Concepção 2.

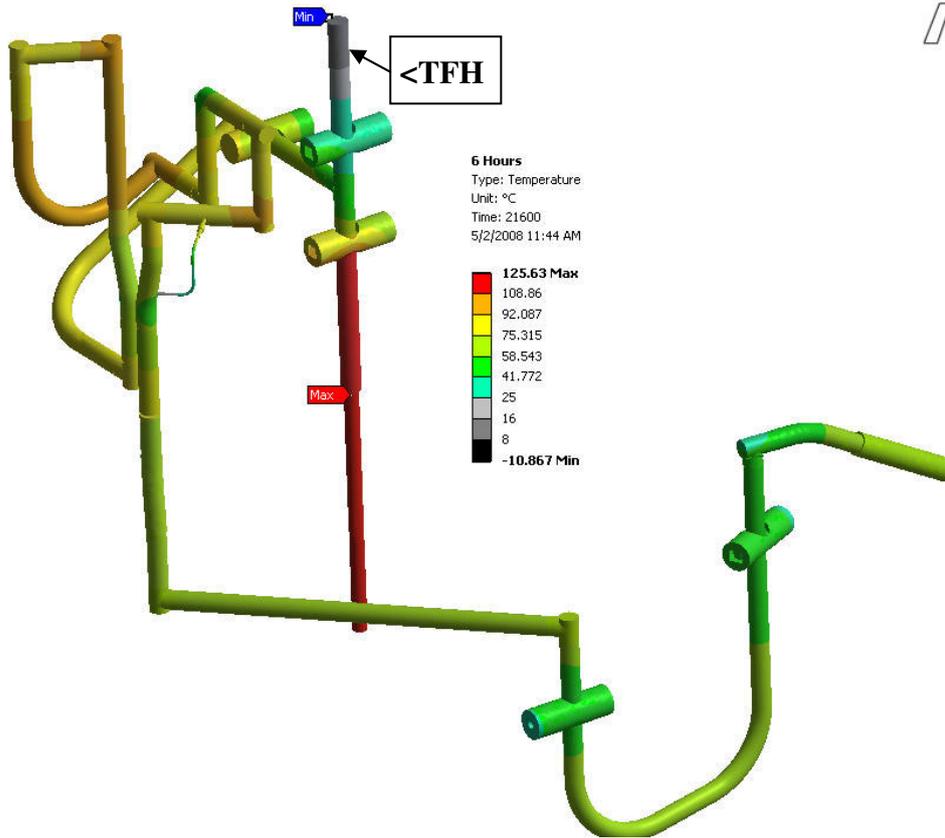


Figura 50: Temperaturas do gás após 6 horas de parada de produção – Concepção 2.

## 7.7 Análise de Sensibilidade da Malha de Elementos Finitos

Em todo estudo baseado em modelagem numérica, uma investigação sobre o grau de precisão e os erros inerentes a modelagens desta categoria faz-se necessária.

Conforme mencionado no item 6.2.1 deste trabalho, o elemento finito utilizado para as análises possui apenas um grau de liberdade por nó: temperatura. Além disso, o elemento possui três nós por aresta, um em cada extremidade e um central [5].

A análise de sensibilidade foi feita a partir de um modelo com malha de elementos finitos mais refinada, baseado no modelo da Concepção 2, conforme descrito a seguir. Os resultados serão comparados, em alguns pontos chave do fluido de produção.

### 7.7.1 Descrição do Modelo

O modelo é idêntico ao modelo preparado para a Concepção 2. Este atende aos requisitos de projeto estabelecidos.

### 7.7.2 Malha de Elementos Finitos

A Tabela 9 lista a quantidade de nós e elementos contidos na malha de elementos finitos para o modelo refinado. O aumento do número de nós foi de 25%. Esta possui 906190 nós, uma malha pesada, no que concerne à capacidade computacional. A Figura 51 mostra a malha de elementos finitos para o Modelo Refinado. A Figura 52 compara as duas malhas. A malha refinada se mostra mais uniforme e melhor estruturada que a preparada para a Concepção 2.

Tabela 9: Malha de Elementos Finitos – Modelo Refinado

<b>Malha de Elementos Finitos – Modelo Refinado</b>			
<b>Número de Nós</b>	<b>Aumento em relação à Concepção 2 (%)</b>	<b>Número de Elementos</b>	<b>Aumento em relação à Concepção 2 (%)</b>
906190	25	444939	22

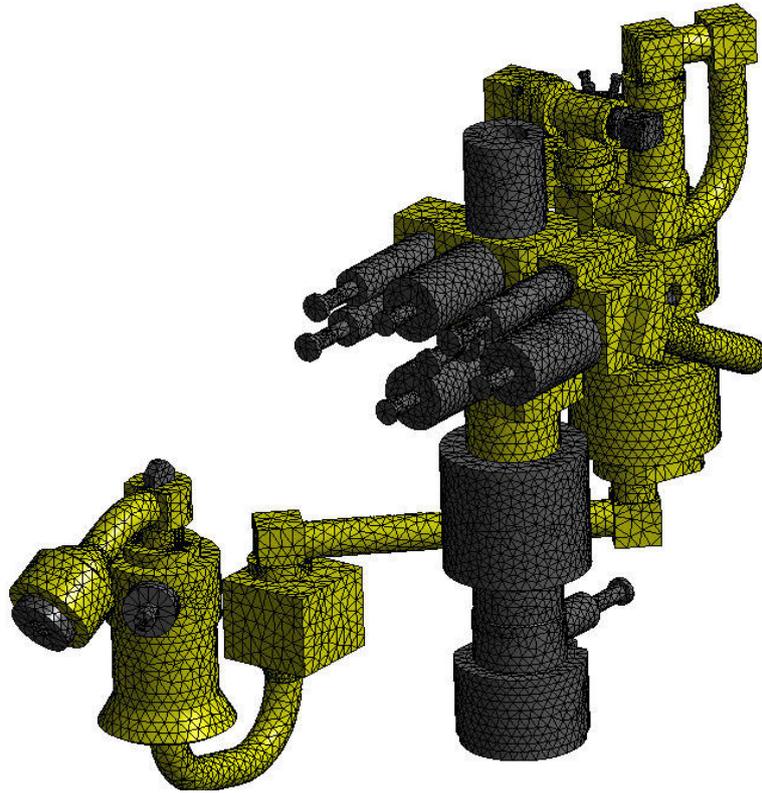


Figura 51: Malha de elementos finitos – Modelo Refinado.

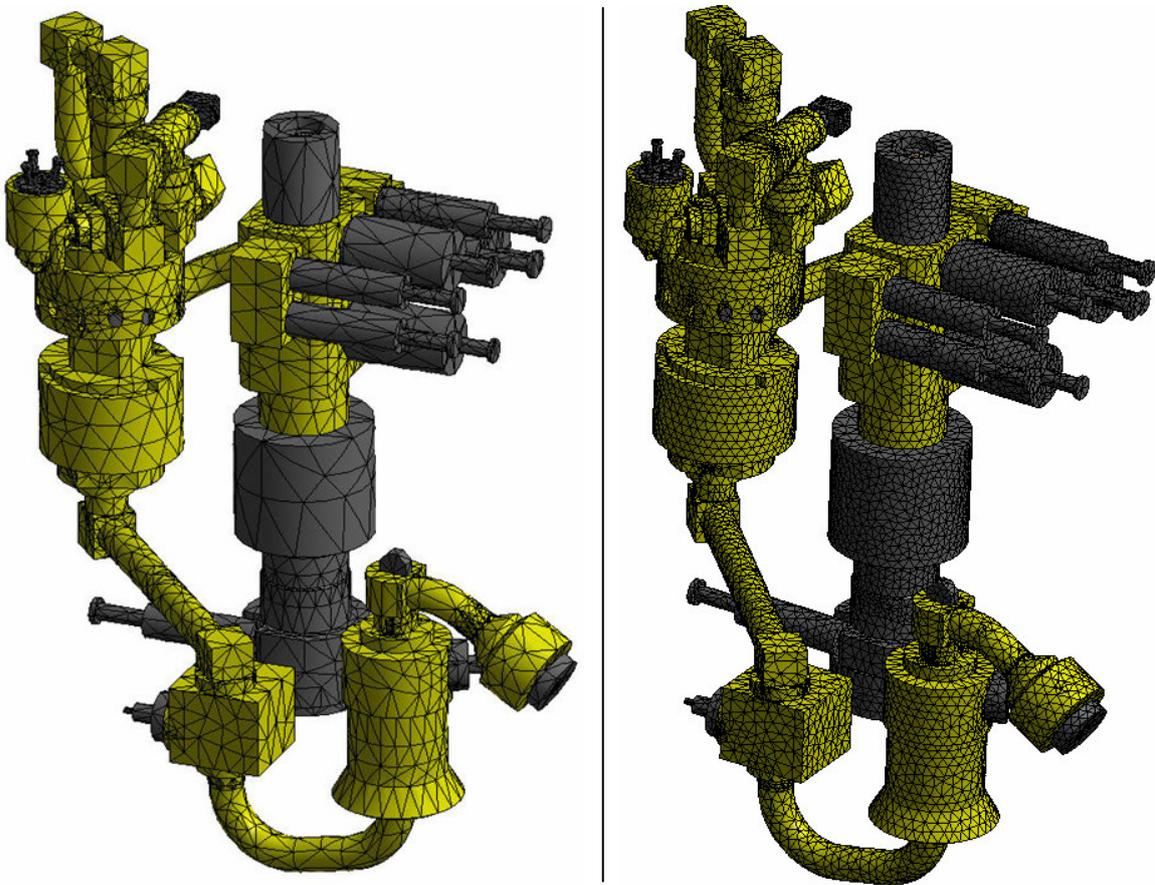


Figura 52: Comparação entre malhas da Concepção 2 e do Modelo Refinado.

### Comparação de Resultados

Para comparar os resultados obtidos com a malha refinada, com a malha da Concepção 2, monitorou-se a temperatura em alguns pontos importantes do fluido de produção, durante as seis horas de parada da produção. A Figura 53 mostra os pontos escolhidos. São eles:

- Válvula PMV (*Primary Master Valve*);
- Mandril de Reentrada;
- Módulo de *Choke*;
- MCV;

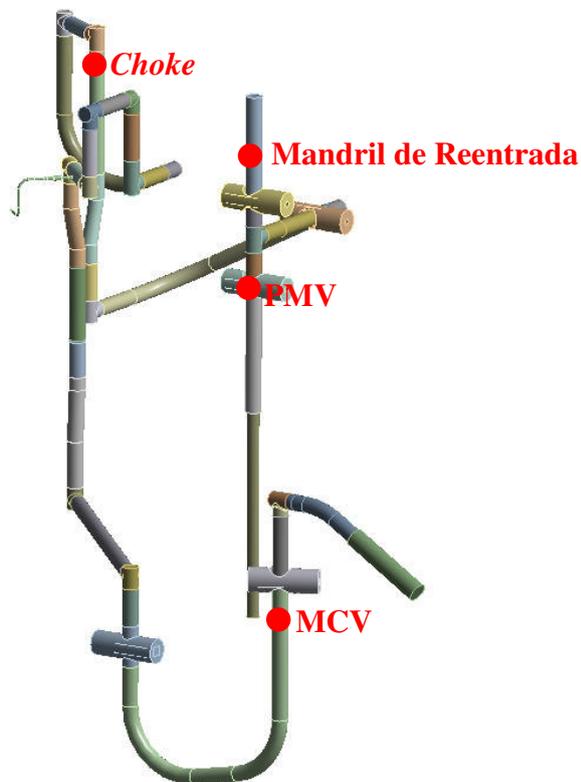


Figura 53: Pontos de monitoramento da temperatura.

A Tabela 10 lista os resultados comparados:

Tabela 10: Resultados Comparados, Concepção 2 – Modelo Refinado.

Horas	PMV			Mandril de Reentrada			Módulo de Choke			MCV		
	Iteração 2	Refinado	%	Iteração 2	Refinado	%	Iteração 2	Refinado	%	Iteração 2	Refinado	%
0	125	125	0.00	125	125	0.00	125	125	0.00	80	80	0.00
1	105.1	106.08	0.92	68.676	68.842	0.24	119.33	119.33	0.00	74.293	74.521	0.31
2	93.358	96.938	3.69	45.575	46.69	2.39	114.47	114.53	0.05	70.168	70.404	0.34
3	91.906	90.572	-1.47	38.308	39.341	2.63	110.18	110.12	-0.05	66.233	66.537	0.46
4	90.002	89.627	-0.42	34.564	34.699	0.39	105.55	105.58	0.03	62.425	62.739	0.50
5	85.405	85.291	-0.13	30.299	30.074	-0.75	100.88	101.26	0.38	59.233	60.022	1.31
6	79.776	80.921	1.41	24.282	22.739	-6.79	97.112	97.215	0.11	56.322	56.124	-0.35

Observe que a maior variação entre os resultados ocorreu para o mandril de re-entrada, após seis horas de parada (6.79%).

A Figura 54 à Figura 58 mostram o gráfico das temperaturas, ao longo de seis horas de parada, para os dois modelos. O refinamento da malha não promoveu mudanças relevantes nos resultados.

Como mencionado anteriormente, a simulação numérica pelo Método dos Elementos Finitos de um problema de física térmica não requer malhas ultra-refinadas e mapeadas. Esta é uma das razões de ter-se optado pela utilização deste método, em vez do Método da Dinâmica dos Fluidos Computacional, que demandaria recursos computacionais e tempo de preparo e rodada bem superiores.

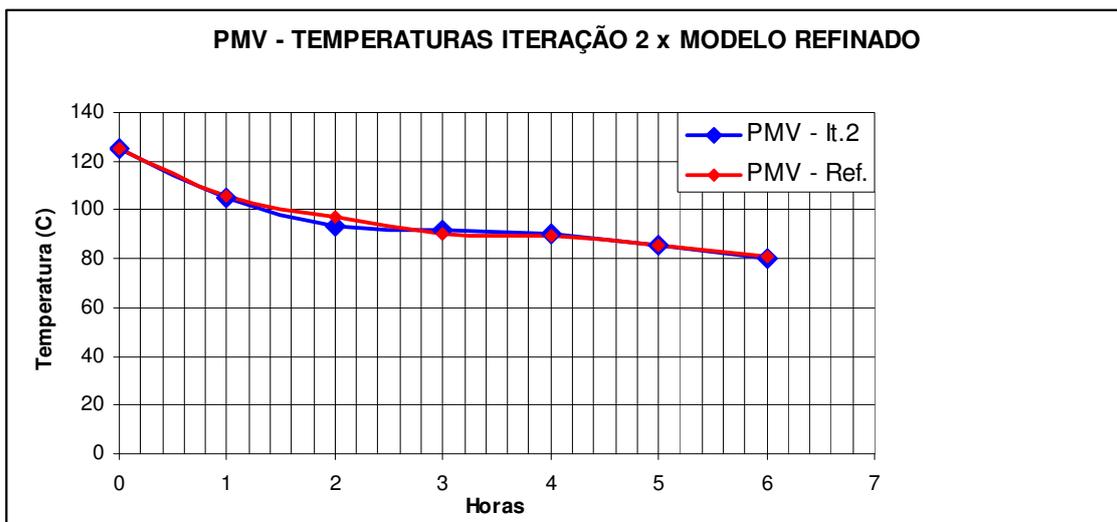


Figura 54: Temperatura ao longo de seis horas de parada, para a PMV - Comparação entre Concepção 2 e do Modelo Refinado.

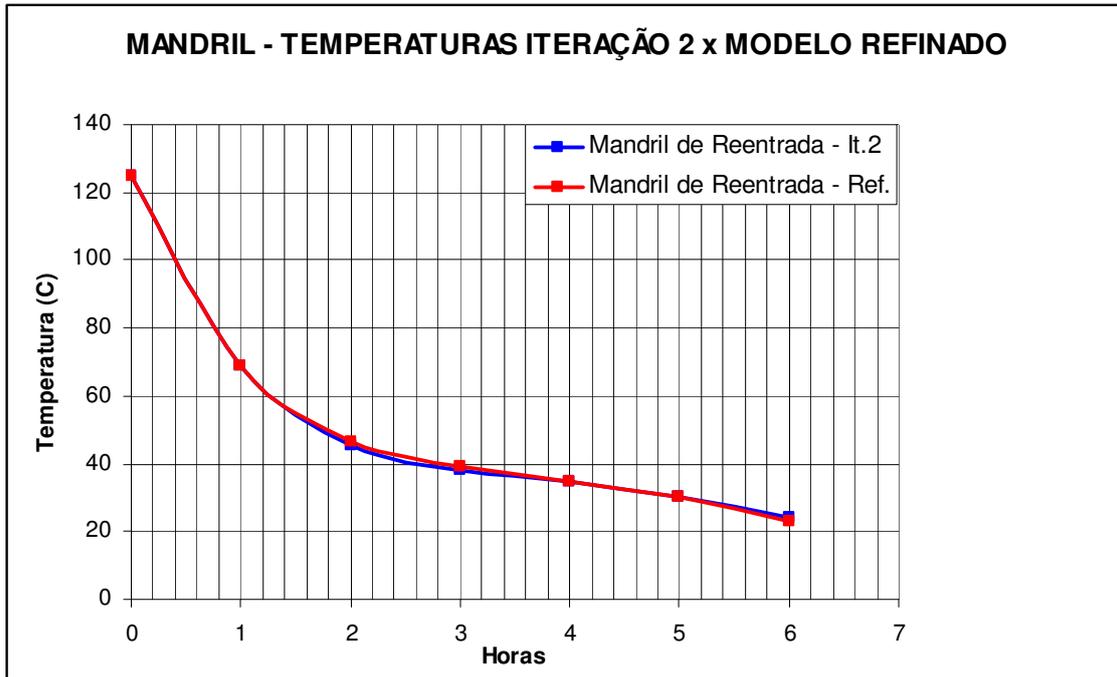


Figura 55: Temperatura ao longo de seis horas de parada, para o mandril - Comparação entre Concepção 2 e do Modelo Refinado.

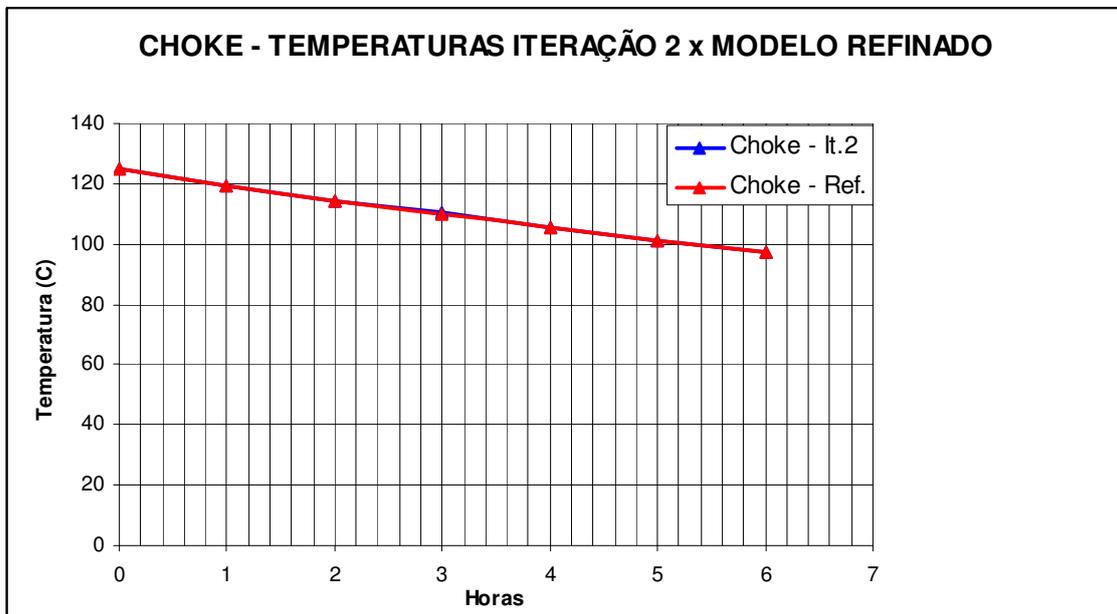


Figura 56: Temperatura ao longo de seis horas de parada, para o *choke* - Comparação entre Concepção 2 e do Modelo Refinado.

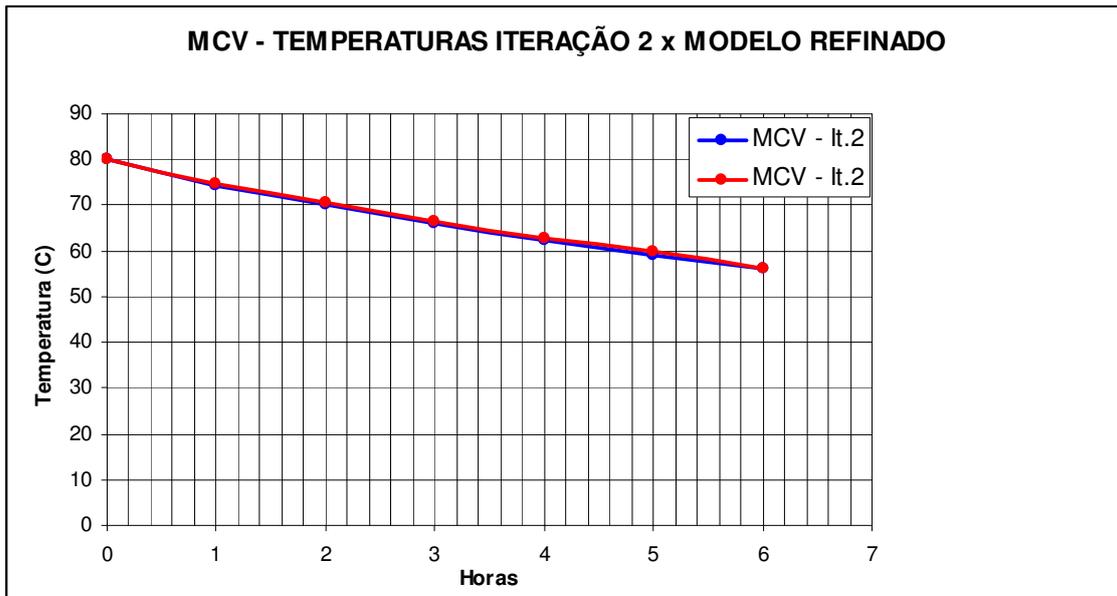


Figura 57: Temperatura ao longo de seis horas de parada, para a MCV - Comparação entre Concepção 2 e do Modelo Refinado.

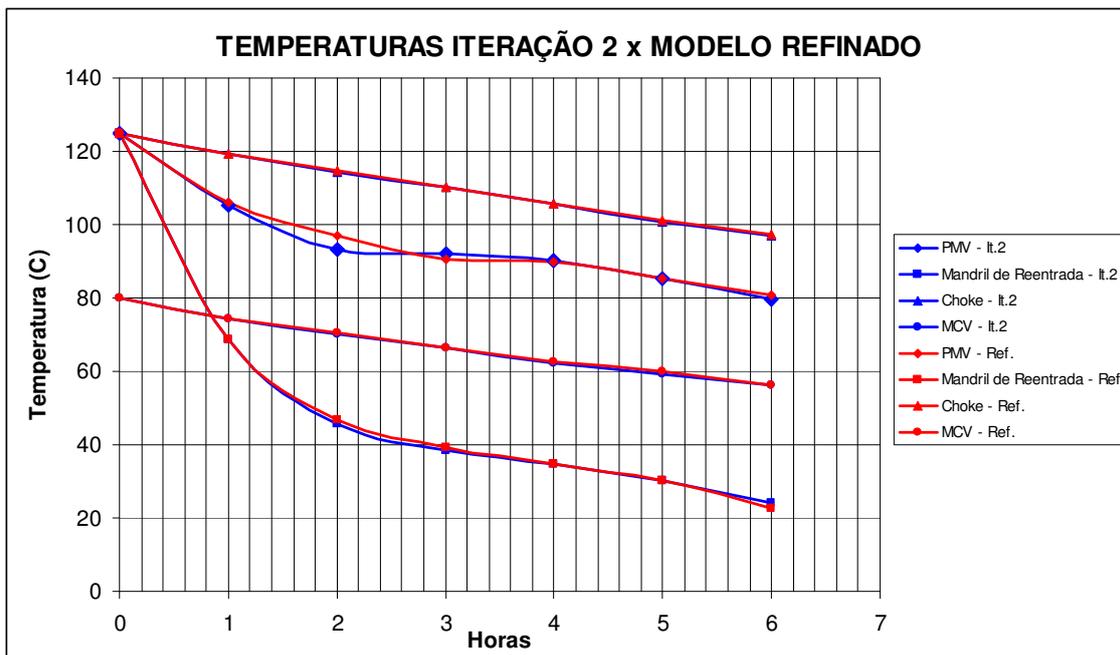


Figura 58: Temperatura ao longo de seis horas de parada - Comparação entre Concepção 2 e do Modelo Refinado.

## 8 CONCLUSÕES

### 8.1 Síntese do Trabalho

Esta dissertação abordou um dos grandes desafios que a Engenharia *Offshore* deve enfrentar, com o avanço das explorações petrolíferas em águas ultra-profundas: o Gerenciamento do Escoamento. A indústria petrolífera vem promovendo uma injeção contínua e crescente de recursos em pesquisa e desenvolvimento de assuntos relacionados à garantia da manutenção do livre escoamento da produção dos sistemas submarinos de produção de petróleo e gás (SSP's).

O Gerenciamento do Escoamento é uma área de estudo relativamente jovem, se comparada às demais áreas que compõem o desenvolvimento de um SSP, como a área de geofísica, responsável pela identificação de reservatórios de hidrocarbonetos e crucial para a exploração marinha de petróleo; a área de novas tecnologias de perfuração de poços, desenvolvida desde o início da exploração marinha de petróleo; a tecnologia de equipamentos, onde alguns equipamentos e operações tornaram-se obsoletos ou continuam sendo melhorados, etc. A indústria petrolífera passou a dar mais atenção ao Gerenciamento do Escoamento com a ocorrência dos problemas relacionados a esta área, como a formação de bloqueios de hidrato e o acúmulo de parafinas e incrustações.

Esta dissertação teve como objetivo apresentar todo o processo de desenvolvimento do sistema de isolamento térmico de um equipamento submarino de exploração de petróleo e gás, desde a seleção do material térmico-isolante a ser utilizado, até o refinamento do projeto, de forma a atender os requisitos técnicos especificados.

Primeiramente, os equipamentos submarinos *Manifolds* e *Árvores de Natal* foram descritos, de forma a elucidar as suas funções e características, justificando-se assim a necessidade de desenvolver um sistema de isolamento térmico.

Na seqüência do trabalho, o Gerenciamento de Escoamento foi abordado, dando-se ênfase ao parâmetro crítico, a formação de hidrato. O isolamento térmico de um SSP busca primordialmente evitar esta ocorrência.

Várias soluções foram e ainda são testadas para o gerenciamento da formação de hidrato. Tentativas como sistemas de resistências elétricas e a aplicação de corrente elé-

trica nos equipamentos, de forma a manter os equipamentos e o fluido de produção aquecidos, apresentaram pouca viabilidade técnica e econômica. Isolamento térmico é ainda a solução adotada.

Após isto, os materiais térmico-isolantes utilizados na indústria petrolífera foram apresentados, as suas principais características, vantagens e desvantagens foram abordadas, bem como o extenso processo de seleção de um ou mais materiais, para aplicações específicas em um SSP. É importante ressaltar que o desenvolvimento de novos materiais térmico-isolantes é contínuo, uma vez que os disponíveis para serem aplicados no momento, logo não serão mais qualificados para novas aplicações que surgirão com o avanço exploratório em ambientes marinhos cada vez mais inóspitos.

Partindo para o dimensionamento do isolamento térmico, as ferramentas computacionais disponíveis foram abordadas. A utilização de simulação computacional no desenvolvimento de sistemas submarinos é massiva, desde os estudos de geofísica, até a administração do sistema em operação. Da mesma forma, o isolamento térmico de um equipamento submarino é primordialmente desenvolvido por meio de simulações computacionais. O Método dos Elementos Finitos (MEF) foi o escolhido para simular os cenários térmicos aos quais uma árvore de natal molhada (ANM) será exposta, objetivando o dimensionamento do isolamento térmico.

A aplicação do isolamento térmico de uma ANM foi mostrada, iniciando-se pelo preparo do modelo numérico baseado no MEF. Componentes que não terão influência na performance térmica do equipamento foram omitidos. Basicamente, as paredes de aço que compõem o caminho que o fluido de produção fará, durante a operação e desligamento do equipamento, foram consideradas, compondo-se o volume de aço do modelo. O sistema de isolamento é então aplicado, de forma a envolver este volume, com o intuito de mantê-lo aquecido.

## 8.2 Comentários

O desenvolvimento do sistema de isolamento térmico de um equipamento submarino possui duas metas a serem atingidas diretamente opostas: **Monitoramento das Máximas Temperaturas e Desaceleração do Resfriamento Durante uma Parada de Produção**. Em outras palavras, estas metas são profundamente conectadas e o desenvolvimento deve considerar ambas, simultaneamente e com a mesma ponderação. O direcionamento para uma delas, separadamente, acarretará um inevitável afastamento da outra.

O primeiro layout de isolamento proposto alcançou somente a primeira meta. As temperaturas máximas, durante a operação da ANM, estavam bem abaixo dos limites pré-estabelecidos.

A “folga” com relação aos limites de temperatura máxima foi indubitavelmente a grande responsável pelo não atendimento da segunda meta. Os baixos valores para as temperaturas máximas indicam um sistema de isolamento deficiente, no que concernem às perdas de calor do equipamento, principalmente durante uma parada de produção, quando o equipamento é resfriado pelo ambiente marinho, ao longo do tempo. O layout atendeu apenas duas horas. A meta previa seis horas.

Uma vez que as metas não foram completamente alcançadas, um novo layout foi proposto, com modificações baseadas nos resultados obtidos com o primeiro. Mais uma vez, com o intuito de não atacar as metas separadamente, o novo layout não visou apenas a inclusão de isolamento térmico, mas também a remoção ou redução em regiões onde este era desvantajoso ou desnecessário.

Um ponto de preocupação para alcançar as metas com o segundo layout era o conector MCV – BAP, onde componentes sensíveis a altas temperaturas estarão localizados. Este ponto não atingiu a segunda meta, demandando, assim, um aumento de isolamento, o que poderia acarretar no não atendimento da primeira meta. Procurou-se então promover um aumento mínimo de isolamento neste ponto, com intuito de atender à segunda meta, sem desatender à primeira.

O segundo layout de isolamento atendeu às duas metas. Um pouco mais de isolamento no conector MCV-BAP faria com que este ponto do modelo não mais atendes-se à primeira meta.

Mostrou-se que o processo de desenvolvimento do sistema de isolamento deve ser balanceado, de forma a não “esquentar” muito, onde não é necessário ou onde este comportamento térmico é indesejado e nem permitir o resfriamento rápido em outras partes.

O Método dos Elementos Finitos comprovou-se ser um método numérico versátil, que demanda recursos computacionais medianos, providenciando resultados com precisão adequada e em tempo hábil de projeto.

Os resultados obtidos com este trabalho poderão ser comparados com os observados com o equipamento real muito em breve.

### **8.3 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Como descrito ao longo desta dissertação de mestrado, a metodologia implementada apresenta ainda algumas particularidades a serem aprimoradas ou comprovadas como aceitáveis, para o desenvolvimento de um projeto de isolamento térmico de sistemas submarinos. A seguir são listadas algumas:

- Comparação de modelagens por Elementos Finitos e por Dinâmica dos Fluidos Computacional, não só dos resultados finais, mas também dos tempos relacionados à geração de modelos e às rodadas de análises;
- Comparação da utilização de correlações matemáticas para o cálculo dos coeficientes de condutividade térmica equivalentes, com a simulação direta da convecção interna dos fluidos;
- Avaliação da influência da variação das propriedades físicas e térmicas dos materiais envolvidos nas análises, com a temperatura;
- Comparação dos resultados numéricos com testes em escala real dos equipamentos analisados, de forma a validar a modelagem numérica como ferramenta de projeto;

## 9 REFERÊNCIAS

- [1] API 6A – ISO 10423, *Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment*, American Petroleum Institute, 2004.
- [2] API 17D, *Specification for Subsea Wellhead and Christmas Tree Equipment*, American Petroleum Institute, 1992.
- [3] API RP-2A – LRFD, *Recommended Practices for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Load and Resistance Factor Design*, American Petroleum Institute, 1993.
- [4] ANSYS Inc., *ANSYS Simulation Software 11.0*, 2006.
- [5] ANSYS Inc., *Release 11.0 Documentation for ANSYS, Element Reference Element Library*, 2006.
- [6] BREDERO SHAW Inc., *Thermotite-Polypropylene Insulation Systems*, Bredero Shaw Brochure, 2005.
- [7] DASSAULT SYSTEMES Inc., *SolidWorks Office 2007 SP5.0 Software*, 2007.
- [8] DONOHOUSE, D. e COLLEGE, A., *Effects of Hydrate Formation on Gas Composition: A physical chemistry and environmental science question*, NOARDI, 2000.
- [9] FMC Technologies Inc., *Flow Management Course, Houston – Texas, Estados Unidos*, 2006 (Publicação Interna).
- [10] FMC Technologies Inc., *Product Data Sheet – Novolastic™ HT Subsea Thermal Insulation, Houston – Texas, Estados Unidos*, 2003.
- [11] HEYDARI, A., SHAYESTEH, K. e KAMALZADEH, L., *Prediction of Hydrate Formation Temperature for Natural Gas Using Artificial Neural Network*, Department of Chemical Engineering, Mohaghegh-e-Ardebily Universit, Ardebil, Oil and Gas Business, 2006.
- [12] HOLMAN, J.P., *Heat Transfer*, 9ª ed., Ed. Mc Graw Hill, 2002.
- [13] JANOFF, D., e DAVALATH, J., *Application of Insulation Material for Deep-water Subsea Completion and Production Equipment*, OTC 14119, *Offshore Technology Conference, Houston – Texas, Estados Unidos*, 2002.
- [14] MARTINS, R., *Curso Básico de Manifolds*, FMC Technologies, 2006 (Publicação Interna).

- [15] MARTINS, R., Curso Básico de ANM's, FMC Technologies, 2006 (Publicação Interna).
- [16] ÖZISIK, M., Transferência de Calor – Um Texto Básico, Ed. Guanabara Koo-  
gan, 1990.
- [17] PETROBRAS, ET: 3500.00-1516-273-PSE-076 – Árvore de Natal Molhada  
GLL/DLL Vertical HPHT, Projeto Mexilhão, 2006.
- [18] PETROBRAS, I-FD 3926.00-1500-942-PSA-001 – *Attachment Internal Fluid  
Parameters*, Projeto Mexilhão, 2007.
- [19] SANTOS, R., Análise de Linhas Flexíveis Sob o Efeito de Cargas Térmicas.  
Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [20] TELLEBORG Inc., Thermal Insulation Brochure, Engineered Systems, 2003.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)