

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA CEFET/RJ**

**Análise da Troca Térmica Para Fluido Newtoniano
em uma Bomba Centrífuga Vertical**

Rayanne Milanez Santos Alencar

Prof. Orientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, D. Sc.

Prof. Coorientador: Juliana Primo Basílio *de Souza*, D. Sc.

**Rio de Janeiro
Junho de 2015**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA CEFET/RJ**

Análise da Troca Térmica para Fluido Newtoniano em uma Bomba Centrífuga Vertical

Rayanne Milanez Santos Alencar

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar, D. Sc.

Prof. Coorientador: Juliana Primo Basílio de Souza, D. Sc.

**Rio de Janeiro
Junho de 2015**

Resumo

Modelos de bombas verticais de maneira geral funcionam confinadas em poços e este confinamento além de fatores como alta potência e vazão volumétrica provocam muitas trocas térmicas. O objetivo deste trabalho é a análise da transferência de calor ocasionada por um fluido newtoniano em temperatura criogênica. O fluido é o gás etileno liquefeito refrigerado. O software a se utilizado para a modelagem dos cálculos foi o Comsol Multiphysics. Foram realizados estudos sobre as trocas térmicas causadas por um fluido newtoniano em movimento: o que ocorre com esse fluido após passar pela bomba; os principais carregamentos envolvidos; e a sugestão de melhorias para o mercado de bombas. O resultado desta análise é satisfatório para monitorar os picos de temperatura do fluido com a previsão de possíveis falhas no processo de bombeamento.

Palavras-Chave: Bomba centrífuga vertical, Etileno, Análise térmica.

Abstract

The theme of the project had as motivation the vertical centrifugal pumps market. Vertical pumps models generally work stuffed into wells and this confinement in addition to factors such as high power and volumetric flow causes a lot of heat exchanges. The aim of this work is the analysis of heat transfer caused by a Newtonian fluid in cryogenic temperature. The fluid is ethylene refrigerated liquefied. The software to be used for modeling of the calculations will be the Comsol Multiphysics. Will be presented the study on the heat exchange caused by a Newtonian fluid in motion; what occurs with this fluid after passing through the pump; the main shipments involved; and the suggestion of improvements for the pumps market. The result of this analysis is satisfactory to monitor fluid temperature peaks with the prediction of possible failures in the pumping process.

Keywords: Centrifugal Pump, Ethylene, Thermal Analysis.

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1.Motivação	1
1.2.Justificativa.....	2
1.3.Objetivos	2
1.4.Metodologia e trabalho realizado	3
1.5.Organização do trabalho	3
Capítulo 2 – O fluido bombeado.....	4
2.1. Fluido escolhido para o bombeamento e transporte – O Etileno	4
2.1.1. Equipamentos do sistema de fluido mecânico	6
Capítulo 3 - Mecânica dos fluidos.....	7
3.1. Noções fundamentais de mecânica dos fluidos	7
3.1.1. Propriedades dos fluidos	7
3.1.1.1. Massa específica (ρ)	7
3.1.1.2. Densidade relativa (d)	7
3.1.1.3. Peso específico (γ)	8
3.1.1.4. Pressão de vapor (P_v)	9
3.1.2. Escoamento em tubulações	10
3.1.2.1. Número de Reynolds.....	10
3.1.2.2. Classificação do escoamento.....	10
3.1.2.3. Teorema de Bernoulli	11
3.1.2.4. Perda de carga (h_f)	13
3.1.2.4.1. Perdas de carga localizadas (h_{fL})	15
3.2. Sistemas Fluidomecânicos	16
3.2.1. Tipos de sistemas de escoamento	16
3.2.2. NPSHd e NPSHr	19
3.3. Bombas centrífugas verticais	19
3.3.1. A bomba para poços úmidos	20
Capítulo 4 - Fenômenos de transporte de calor.....	22
4.1. A Transferência de calor	22
4.1.1. Condução	22
4.1.2. Convecção	24
Capítulo 5 – Metodologia.....	26
5.1. Metodologia para a análise da bomba vertical.....	26
5.1.1. Dados e <i>Layout</i> da bomba vertical em estudo.....	31
5.1.1.1. Classificação e dados de algumas partes da bomba.....	31
5.1.1.2. Classificação dos impelidores.....	31
5.1.1.3. Classificação da descarga.....	31
5.1.1.4. Materiais constituintes.....	32
5.1.1.5. Condições de operação e desempenho.....	32
5.1.2. Esquema de posicionamento da bomba em campo.....	32
5.1.3. Desenho de apresentação da bomba.....	33
5.1.4. Inputs do modelo e da análise de transferência de calor e comportamento do fluido	35
5.1.4.1. Dados para Modelagem.....	36

Capítulo 6 - A análise transferência de calor.....	38
6.1. A Transferência de calor conjugada.....	38
6.2. Relatório das análises.....	39
6.2.1. Materiais	39
6.2.1.1. C ₂ H ₄ (Etileno –líquido).....	39
6.2.1.2. Aço 316L (UNS S31603) (SUS 316L - Sólido).....	40
6.2.2. Modelagem e análises.....	42
6.2.2.1. Transferência de calor.....	42
6.2.2.2. Fonte de calor.....	45
6.2.2.3. Fluxo de calor.....	46
6.2.2.4. Saída total do fluido.....	46
6.2.2.5. Escoamento turbulento, k-ε	47
6.2.2.6. Propriedades do fluido.....	48
6.2.2.7. Entrada de fluido – <i>Inlet</i>	49
6.2.2.8. Saída de fluido – <i>Outlet</i>	49
6.2.2.9. <i>Fan</i>	50
6.2.2.10. Análise Multifísica	51
6.2.2.11. Malha	51
6.2.2.11.1. Análise de Convergência de Malha	51
6.2.3. Resultados	63
6.2.3.1. Plotagens	64
Capítulo 7 - Conclusões e trabalhos futuros.....	72
7.1. Conclusões	72
7.2. Trabalhos Futuros	73
Capítulo 8 - Referências Bibliográficas	74

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1: Variação da pressão de vapor com a temperatura.....	9
FIGURA 3.2: Escoamento laminar-distribuição de velocidade na seção transversal de um tubo	10
FIGURA 3.3: Escoamento turbulento –velocidade na seção transversal de um tubo	11
FIGURA 3.4: Desenho esquemático de um sistema com tubulações em série	17
FIGURA 3.5: Desenho esquemático de um sistema com tubulações em paralelo.....	17
FIGURA 5.1: Variáveis dimensionais para instalação de bomba centrífuga vertical de poço úmido.....	27
FIGURA 5.2: Divisão da bomba vertical em 3 partes.....	29
FIGURA 5.3: Detalhes de outras terminologias para bombas verticais.....	30
FIGURA 5.4: Arranjo da bomba em campo.....	33
FIGURA 5.5: Posicionamento da linha de centro da descarga.....	33
FIGURA 5.6: Modelo da bomba construída no programa Inventor.....	34
FIGURA 5.7: Detalhes de partes internas do corpo de sucção.....	34
FIGURA 5.8: Detalhes do corpo superior.....	35
FIGURA 6.1: Modelos para consideração do etileno na modelagem.....	40
FIGURA 6.2: Sólido de material 316L (UNS S31603).....	41
FIGURA 6.3: Imagem de um <i>bowl</i>	42
FIGURAS 6.4 (a) e (b): Sólidos utilizados para transferência de calor.....	43
FIGURA 6.5: Tanque utilizado na transferência de calor em fluido.....	44
FIGURA 6.6: Simulação do Fluido dentro da bomba.....	44
FIGURA 6.7: Simulação do a bomba dentro do tanque.....	45
FIGURA 6.8: Imagem do contorno utilizado como fonte de calor.....	45
FIGURA 6.9: Modelo completo estabelecido para admitir o fluxo de calor. Formato similar para 8 e 13 <i>bowls</i>	46
FIGURA 6.10: Imagens do contorno utilizado para saída simbólica do fluido (em azul)...	47
FIGURA 6.11: Entrada de fluido – <i>Inlet</i>	49
FIGURA 6.12: Contorno utilizado para saída do fluido - <i>Outlet</i>	49
FIGURA 6.13: Função “ <i>FAN</i> ”.....	50
FIGURA 6.14: Malha 1 no tanque de etileno.....	53
FIGURA 6.15: Malha 1 no corpo da bomba vertical – 13 <i>bowls</i>	53
FIGURA 6.16: Região da malha 1 e resultados após a simulação de velocidade.....	54
FIGURA 6.17: Malha 2 no tanque de etileno.....	55
FIGURA 6.18: Malha 2 no corpo da bomba vertical – 13 <i>bowls</i>	55
FIGURA 6.19: Região da malha 1 e resultados após a simulação de velocidade (m/s)....	56
FIGURA 6.20: Malha 3 na região do tanque.....	58
FIGURA 6.21: Malha 3 na região do corpo da bomba.....	58
FIGURA 6.22: Região da malha 3 após a simulação de velocidade (m/s).....	59
FIGURA 6.23: Malha 4 na região do tanque.....	61
FIGURA 6.24: Malha 4 na região da bomba.....	61
FIGURA 6.25: Região da Malha 4 após simulação de velocidade (m/s).....	62
FIGURA 6.26 (a): Gráfico para o número de elementos em cada malha.....	62

FIGURA 6.26 (b): Gráfico com a avaliação da convergência admitidas na simulação.....	63
FIGURA 6.27: Análise de temperatura 4 <i>bowl</i> s.....	65
FIGURA 6.28: Contornos de temperatura 4 <i>bowl</i> s.....	65
FIGURA 6.29: Análises de temperatura. Vista da seção transversal. Sucção e os 8 <i>bowl</i> s seguintes.....	66
FIGURA 6.30: Análise de temperatura. 13 <i>bowl</i> s.....	67
FIGURA 6.31: Temperatura no tanque. 13 <i>bowl</i> s.....	68
FIGURA 6.32: Análise de fluxo de calor nas paredes do corpo da bomba.....	69
FIGURA 6.33: Gráfico de mapeamento da temperatura do fluido no interior da bomba. Região de Sucção.....	70

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: Propriedades Físicas do Etileno	5
TABELA 5.1: Principais dimensões de cada instalação.....	28
TABELA 6.1: Parâmetros considerados para as análises de fluido na modelagem.....	40
TABELA 6.2: Principais parâmetros utilizados para estabelecimento da fonte de calor.....	46
TABELA 6.3: Parâmetros para a definição e equacionamento do escoamento turbulento.....	48
TABELA 6.4: Principais parâmetros utilizados para a definição da função <i>FAN</i>	50
TABELA 6.5: Principais parâmetros para a modelagem multifísica não Isotérmica	51
TABELA 6.6: Parâmetros para a Malha 1.....	52
TABELA 6.7: Parâmetros da Malha 2.....	55
TABELA 6.8: Parâmetros da Malha 3	57
TABELA 6.9: Parâmetros da Malha 4.....	60
TABELA 6.10: Informações sobre tempo e unidades.....	64

ANEXOS

ANEXO 1: Ábaco de Moody [1] – Versão original em Inglês

ANEXO 2: Rugosidade relativa e coeficiente de atrito para escoamento completamente turbulento [1]

ANEXO 3: Tabela simplificada de acidentes

Capítulo 1

Introdução

O desenvolvimento e o uso contínuo de máquinas de fluxo para geração de energia e de seus sistemas de escoamento são cada vez mais necessários para o setor industrial em suas diversas áreas. Máquinas de fluxo são agentes fornecedores ou receptores de energia mecânica, através da transformação da energia do/ao fluido nas formas de energia cinética. Nelas, o escoamento do fluido é orientado por meio de lâminas ou aletas solidárias a um elemento rotativo – rotor. Os maiores exemplos de máquinas de fluxo vistos com mais frequência são as turbinas hidráulicas e a vapor; as bombas centrífugas; os ventiladores e turbo compressores; turbinas a gás e motores de reação. Já o Sistema Fluidomecânico é o conjunto formado por máquinas e dispositivos cuja função é extrair ou adicionar energia de um fluido de trabalho. Os sistemas fluidomecânicos são constituídos por máquinas de fluido e sistemas hidráulicos e pneumáticos, por exemplo, válvulas e diferenças geométricas entre tubulações.

Neste trabalho será enfatizada a análise térmica da passagem de um fluido em temperaturas criogênicas por um sistema de escoamento contendo uma bomba centrífuga vertical de múltiplos estágios. Tal análise é de fundamental importância para caracterizar a relação entre o comportamento do fluido sob forças de atrito e obstáculos (acidentes e perdas) do sistema e suas reações térmicas, bem como influências que tais reações podem causar ao sistema.

1.1 Motivação

O projeto teve como motivação o mercado de bombas centrífugas verticais. Modelos de bombas verticais de maneira geral funcionam confinadas em poços e este confinamento além de fatores como alta potência e vazão volumétrica provocam muitas trocas térmicas. Atualmente, a maioria dos fabricantes não fazem análises mais profundas com relação às reações térmicas da bombas nos poços.

1.2 Justificativa

A principal justificativa para o presente projeto é a escassez de análises térmicas de controle mais efetivo pelos fabricantes de bombas e sistemas de escoamento. Isto ocorre pelo fato de os projetos de produtos desta área seguirem padronizações e serem estabelecidos, com atualizações de tempos em tempos conforme ocorrência de problemas, estudos e novas normas de segurança. Embora a indústria de sistemas de escoamentos siga normas (API 610 – Bombas/Sistemas e API 682 – Selos mecânicos) e possuam projetos bases, existem diversas formas de montagem de um sistema fluido mecânico bem como diversos tipos de ambientes para instalação desses sistemas. Logo as condições térmicas enfrentadas podem ser as mais variadas possíveis. A falta de melhores análises térmicas está envolvida com a geração de problemas técnicos que podem provocar incêndios e até mesmo explosões em bombas com comprometimento de todo o sistema de escoamento.

1.3 Objetivos

Os principais objetivos a serem alcançados com o projeto são: o estudo sobre as trocas térmicas causadas por um fluido newtoniano em movimento; o que ocorre com

esse fluido no sistema após passar pela bomba centrífuga; os principais carregamentos envolvidos e a sugestão de melhorias para o mercado de bombas.

1.4 Metodologia e trabalho realizado

O procedimento foi dado pela observação direta de um problema de aquecimento com risco de explosão em uma bomba vertical de múltiplos estágios na qual fluido criogênico era bombeado – o etileno. O software para análises de elementos finitos - COMSOL Multiphysics - foi utilizado como principal ferramenta para estudos e conclusões.

1.5 Organização do trabalho

O início do trabalho (capítulos 1, 2, 3 e 4) contempla o embasamento teórico breve sobre o estudo de sistemas fluido mecânicos, transferência de calor e explicação do sistema utilizado.

Nos capítulos que tratam da metodologia e dos resultados (capítulos 5 e 6), ocorre o detalhamento das análises para que possa ser atingida a avaliação do comportamento do fluido no sistema, e dos resultados e recursos. Sempre demonstrando as atividades necessárias para atingir tais objetivos.

Por fim, (final do capítulo 6 e todo o capítulo 7) o projeto contempla as amostragens e avaliações dos resultados obtidos com as conclusões sobre os riscos envolvidos em um escoamento turbulento com fluido em temperaturas criogênicas e sugestão de melhorias para possibilitar a viabilidade de outros projetos semelhantes.

Capítulo 2

O fluido bombeado

Para este trabalho, o fluido a ser bombeado e transportado pelo sistema fluido mecânico é o Etileno líquido refrigerado, também chamado de eteno, na temperatura ambiente e pressão atmosférica. É um gás altamente inflamável e incolor que possui um odor adocicado e sabor característico. O Etileno não é tóxico e possui um efeito anestésico. Neste capítulo serão apresentadas as propriedades e principais características do etileno.

2.1 Fluido escolhido para o bombeamento e transporte - O Etileno

O etileno é uma das mais importantes matérias primas da indústria petroquímica sendo utilizado na síntese de uma série de produtos, tais como: óxido de etileno, etileno glicol, álcool etílico, polietileno, poliestireno, e outros plásticos, etc.

Como mencionado anteriormente, o etileno não é tóxico. No Brasil, a Norma Regulamentadora 15 (NR 15) considera o produto como asfixiante simples e não impõe limites de exposição, entretanto, no ambiente de trabalho, deve-se garantir que a concentração mínima de oxigênio seja de 18% em volume. Mesmo sem considerar o enorme risco de explosão, as situações na qual a concentração de oxigênio estiver abaixo deste valor serão consideradas de risco grave e iminente. Em caso de super exposição ao produto, ele pode causar asfixia e neste caso os sintomas são: náuseas, e pressão na testa e nos olhos, podendo ainda causar perda de consciência e morte [7].

As propriedades físicas do etileno podem ser visualizadas na Tabela 2.1:

Tabela 2.1: Propriedades Físicas do Etileno [7].

Propriedades Físicas	
Calor latente de fusão a -169,2°C	119,44 KJ/kg; 28,547 kcal/kg
Calor molar específico, gás a 100 kPa a 25°C e pressão constante	1,548 kJ/(kg x K)
Calor molar específico, gás a 100 kPa a 25°C a volume constante	1,244 kJ/(kg x K);
Calor molar específico, líquido a -166,5°C	2,4644 kJ/(kg x K)
Condutividade térmica, gás a 101,325kPa e 0°C	0,01778W/(m x K); 42,5 x 10 ⁻⁶ cal/(s x cm x °C)
Condutividade térmica, líquido a -160°C	0,26987W/(m x K); 645 x 10 ⁻⁶ cal/(s x cm x °C)
Densidade absoluta, gás a 101,325kPa e 0°C	1,261 kg/m ³
Densidade crítica	0,2662 kg/dm ³
Densidade relativa, gás a 101,325kPa e 0°C (ar=1)	0,975
Densidade, líquido a pressão de saturação e -103,7°C	0,5684 kg/L
Fator crítico de compressibilidade	0,270
Fórmula	C ₂ H ₄
Límite de inflamabilidade no ar	2,7 a 36% (molar)
Massa Molecular	28,054
Ponto de ebulição a 101,325kPa	169,44 K; -103,7°C; -154,7°F
Pressão crítica	5120 kPa; 51,2 bar; 742,1 psi; 50,5 atm
Pressão no ponto triplo	0,1 kPa; 0,76 mmHg
Razão do calor específico, gás a 100kPa e 25°C, Cp/Cv	1,244
Solubilidade em água a 101,325 kPa e 0°C	0,226 cm ³ / 1 cm ³ de água;
Temperatura crítica	283,05K; 9,9°C; 49,8°F
Temperatura de auto-ignição	763K; 490°C; 914°F
Temperatura no ponto triplo	104K; -169,2°C; -272,5°F
Tensão superficial a -120°C	19,8 mN/m; 19,8 dyn/cm
Viscosidade, gás a 101,325 kPa a 0°C	0,0093 cP
Viscosidade, líquido a -170°C	0,715 cP
Volume crítico	4,420 dm ³ / kg
Volume específico a 21,1°C e 101,325 kPa	861,5 dm ³ / kg; 13,8 ft ³ / Ib

2.1.1 Equipamentos do sistema fluido mecânico

Todos os equipamentos: válvulas, reguladores de pressão, conexões, tubulações, etc. que se destinem a serem utilizados com etileno, devem ser devidamente testados e condicionados antes do uso. Dois métodos de teste que podem ser utilizados estão listados em ordem de preferência:

a. Pressurizar o sistema com uma mistura de no máximo 5% de hidrogênio em nitrogênio e testar todas as conexões com um detector de condutividade térmica. Ao final do teste o sistema deve ser purgado com o próprio etileno que será utilizado para remover os resíduos da mistura de gases utilizada. Este teste necessita ser realizado por uma pessoa adequadamente treinada, dá resultados muito satisfatórios e o sistema se torna altamente confiável. Este procedimento é especialmente recomendado para processos de alta responsabilidade.

b. Pressurizar o sistema com o próprio etileno e testar todas as conexões e pontos suspeitos com uma mistura de água e detergente. No local onde haja vazamento haverá formação de bolhas. Este teste pode ser feito por quase qualquer pessoa, porém os resultados podem não ser os mais seguros e pequenos vazamentos podem não ser detectados. Este método é especialmente recomendado para etileno industrial podendo ainda ser utilizado para etileno de elevada pureza desde que após a detecção e correção dos vazamentos, seja feita a secagem interna dos equipamentos através da passagem do próprio etileno puro por seu interior até haver plena certeza que toda a umidade residual tenha sido eliminada [7].

Capítulo 3

Mecânica dos Fluidos

Neste capítulo haverá uma breve abordagem sobre as noções fundamentais de mecânica dos fluidos, bem como o que são os sistemas de escoamento, curvas NPSH e, ao final, um resumo sobre funcionamento de bombas centrífugas verticais.

3.1 Noções fundamentais de mecânica dos fluidos

3.1.1 Propriedades dos fluidos

3.1.1.1 Massa específica (ρ)

A massa específica de uma substância é definida como a quantidade de massa que ocupa uma unidade de volume. A unidade que será utilizada nesse trabalho para essa propriedade é kg/m^3 .

3.1.1.2 Densidade relativa (d)

A densidade relativa é a razão entre a massa específica de uma determinada substância e a massa específica de uma substância em uma condição padrão. Para o cálculo da densidade relativa de líquidos e sólidos, a substância utilizada é a água [1].

A densidade relativa será calculada tendo como referência a água a 15°C (59°F). Nessas condições, sua massa específica é de $999,1026 \text{ kg/m}^3$ que, para fins de engenharia, pode ser aproximada para 1000 kg/m^3 [1].

A densidade relativa é calculada então pela seguinte relação:

$$d = \frac{\rho}{\rho_{\text{água}} (15^{\circ}\text{C})} \quad (3.1)$$

Onde:

ρ – Massa específica do material;

$\rho_{\text{água}}$ - Massa específica da água;

Essa propriedade é adimensional, pois é uma razão entre massas específicas.

3.1.1.3 Peso específico (γ)

O peso específico do fluido é definido como a razão entre o peso de uma substância e a unidade de volume. Essa propriedade pode ser calculada pela seguinte equação [1]:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (3.2)$$

onde:

ρ - Massa específica [kg/m³];

g – Aceleração da gravidade [m/s²];

γ – Peso específico;

Dessa forma, a partir das unidades apontadas para os componentes da equação, a unidade do peso específico é N/m³.

3.1.1.4 Pressão de vapor (Pv)

Para uma determinada temperatura abaixo da temperatura crítica, a pressão na qual coexistem as fases líquida e vapor é a pressão de vapor [1].

Além disso, a pressão de vapor varia proporcionalmente à variação da temperatura do fluido (Figura 3.1). Dessa forma, quanto maior o aumento de temperatura, maior será a pressão de vapor correspondente.

No caso de produtos derivados de petróleo, a pressão de vapor é função de sua composição. Portanto, o valor da pressão de vapor nesse caso deve ser obtido a partir de dados experimentais.

Quando a pressão em um líquido é reduzida a níveis iguais ou inferiores a pressão de vapor, o líquido passa abruptamente para a fase vapor. Esse fenômeno é conhecido como cavitação [1].

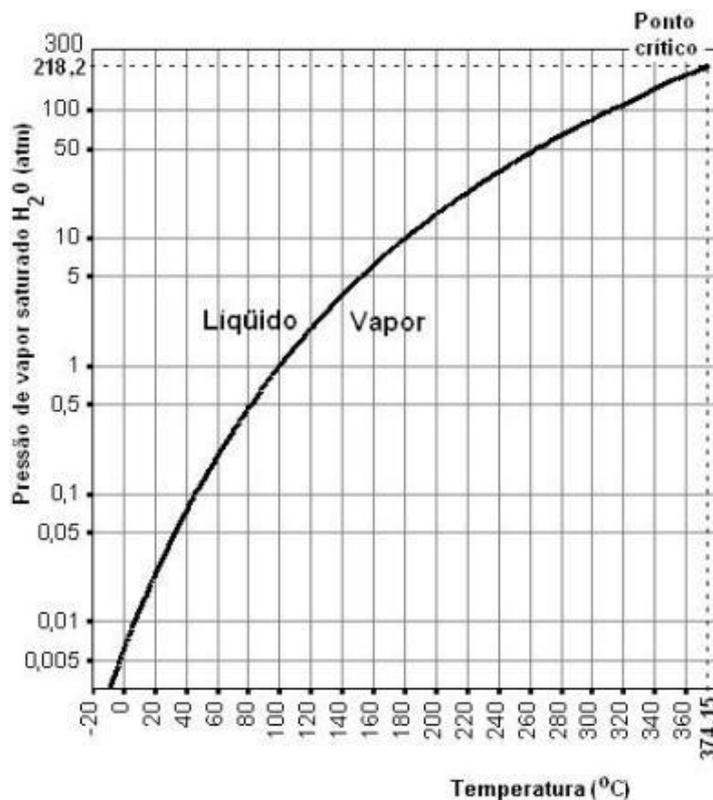


Figura 3.1: Variação da pressão de vapor com a temperatura [2]

3.1.2 Escoamento em tubulações

3.1.2.1 Número de Reynolds

O número de Reynolds é a relação entre força de inércia e a força devido à viscosidade do fluido. Esse número é adimensional e pode ser calculado pela equação 3.3.

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu} \quad (3.3)$$

Onde:

ρ - Massa específica [kg/m³];

v - Velocidade de escoamento [m/s];

D - Diâmetro da tubulação [m];

μ - Viscosidade absoluta do fluido [Pa.s].

3.1.2.2 Classificação do escoamento

3.1.2.2.1 Escoamento laminar

Nesse escoamento as extremidades dos vetores velocidades das partículas numa dada seção de escoamento formam uma superfície parabólica e as linhas de fluido são paralelas à tubulação (Figura 3.2). Além disso, a velocidade máxima se verifica no centro do tubo, já junto às paredes, a velocidade das partículas é praticamente nula [5].



Figura 3.2: Escoamento laminar-distribuição de velocidade na seção transversal de

um tubo

Nesse tipo de escoamento, o número de Reynolds se comporta da seguinte forma:

$Re < 2000$ – Regime laminar

3.1.2.2 Escoamento turbulento

O escoamento turbulento é verificado quando há irregularidade no caminho, valor e orientação da velocidade das partículas. Esse escoamento promove uma distribuição mais uniforme de velocidades [5], conforme mostrado na Figura 3.3.

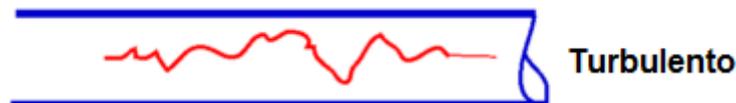


Figura 3.3: Escoamento turbulento – distribuição de velocidade na seção transversal de um tubo

Já o escoamento turbulento, é verificado em número de Reynolds maiores:

$Re > 4000$ – Regime turbulento

Observação: Para $2000 < Re < 4000$, o regime tanto pode ser laminar quanto turbulento (faixa de transição).

3.1.2.3 Teorema de Bernoulli

O teorema de Bernoulli relaciona as variações de pressão com as de velocidade e elevação ao longo da linha de corrente [1]. Esse teorema pode ser representado pela seguinte equação:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{\gamma} + g \cdot z = \text{constante} \quad (3.4)$$

Onde:

P - Pressão dada;

γ – Peso específico;

V – Velocidade do fluido;

g – Aceleração da gravidade;

z – Altura;

ρ – Massa específica;

A equação acima também pode ser também representada da seguinte forma.

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2.g} + z = \text{constante} \quad (3.5)$$

Onde:

P - Pressão dada;

γ – Peso específico;

V – Velocidade do fluido;

g – Aceleração da gravidade;

z – Altura;

No entanto, para utilização dessas expressões, devem ser respeitadas as condições apontadas abaixo.

1. Escoamento em regime permanente
2. Escoamento incompressível
3. Escoamento sem atrito

4. Escoamento ao longo de uma linha de corrente

O teorema de Bernoulli pode ser adaptado aos líquidos reais, passando assim a considerar as perdas de carga (H_f). Dessa forma, a equação passa a ser representada pela expressão 3.6.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2.g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2.g} + H_f \quad (3.6)$$

Onde:

P - Pressão dada (1 = inicial e 2 = final);

γ – Peso específico;

V – Velocidade do fluido (1 = inicial e 2 = final);

g – Aceleração da gravidade;

z – Altura (1 = inicial e 2 = final);

H_f – Perdas de carga;

Nessa equação a perda de carga (H_f) representa a energia perdida por unidade de peso f pelo fluido ao se deslocar do ponto 1 ao ponto 2.

3.1.2.4 Perda de carga (H_f)

A perda de carga representa a energia por unidade de peso perdida no trecho de tubulação em estudo. O valor dessa perda é obtido, a partir da soma entre a perda de carga normal (H_{fn}) e a perda localizada (H_{fl}) [1].

(3.7)

$$Hf = Hfn + Hfl$$

Onde:

H_{fn} – Perda de carga normal;

H_{fl} – Perda de carga localizada;

H_f – Perda de carga total;

A perda de carga normal ocorre nos trechos retos da tubulação, já a localizada é verificada em acessórios/acidentes, como válvulas e joelhos.

Perda de carga normal (H_{fn})

A perda de carga normal mencionada pode ser obtida pela fórmula de *Darcy-Weisbach* [1]:

$$Hfn [m] = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3.8)$$

onde:

f - Coeficiente de atrito;

L – Comprimento do tubo [m];

v – Velocidade de escoamento [m/s];

D – Diâmetro da tubulação [m];

g – Aceleração da gravidade [m/s²].

No regime laminar, o coeficiente de atrito presente na equação 3.8 pode ser determinado pela fórmula de coeficiente de atrito de *Darcy*:

$$f_e = \frac{64}{Re} \quad (3.9)$$

Já para o escoamento turbulento, o fator f pode ser determinado pelo Ábaco de Moody (ANEXO 1). A partir da rugosidade relativa (ϵ/D), que é a relação entre a rugosidade da tubulação e o seu diâmetro, e o número de Reynolds (Re), verifica-se o coeficiente de atrito (f) correspondente. Em escoamentos turbulentos plenamente desenvolvidos, as linhas correspondentes à rugosidade relativa (ϵ/D) tornam-se horizontais nesse diagrama. Nesse caso, o fator f se mostra independente do número de Reynolds. Pode-se utilizar, portanto o gráfico representado no ANEXO 2 em que é necessário apenas entrar na abscissa com o diâmetro da tubulação, seguindo verticalmente até o respectivo material da tubulação para a obtenção do fator f [1].

3.1.2.4.1. Perdas de carga localizadas (h_{fL})

Além da perda de carga ocorrida ao longo do tubo, há também as perdas de carga localizadas causadas por distúrbios locais do fluxo ao passar por acidentes (ANEXO 3).

Essa parcela da perda de carga pode ser determinada pelo método do comprimento equivalente que consiste em fixar um valor de comprimento reto de tubulação correspondente a perda de carga causada por um determinado acidente.

Os valores de comprimento equivalente são tabelados de acordo com o diâmetro nominal da tubulação e com o acidente/acessório em questão.

Com a obtenção dos comprimentos equivalentes de todos os acessórios (n) de uma tubulação, a perda de carga é simplesmente calculada pelas equações 3.10 e 3.11. Primeiramente, é realizada a soma do comprimento reto da tubulação com os comprimentos equivalentes de todos os acessórios. Depois, utiliza-se desse comprimento total para o cálculo da perda de carga envolvendo todos os acessórios e a tubulação [5].

$$L_{total} = L_{reto} + \sum L_i \quad (3.10)$$

$$H_f = f \cdot \frac{L_{total}}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3.11)$$

3.2 Sistemas Fluido mecânicos

Denomina-se Sistema Fluidomecânico o conjunto formado por máquinas e dispositivos cuja função é extrair ou adicionar energia de um fluido de trabalho [5].

Os sistemas fluidomecânicos são constituídos por:

- Máquinas de fluido;
- Sistemas hidráulicos e pneumáticos.

As máquinas de fluido são agentes fornecedores ou receptores de energia mecânica, através da transformação da energia do/ao fluido nas formas de energia de pressão ou cinética

3.2.1 Tipos de sistemas de escoamento

Há dois tipos principais de sistemas de disposição de tubulações:

a. Tubulações equivalentes

Sempre que há um sistema com tubulações que apresentam variações no diâmetro no decorrer de sua extensão, ou com ramificações, uma das maneiras de simplificar o problema é encontrar uma tubulação que seja equivalente ao sistema em estudo. Pode-se dizer que duas tubulações são equivalentes quando são capazes de conduzir à mesma vazão sob a mesma perda de carga.

b. Tubulações em série (Figura 3.4)

Características de um sistema com tubulações em série:

- As curvas são traçadas separadamente;
- Nem sempre os encanamentos são executados com diâmetro uniforme.
- Há a perda de carga total do sistema (somatório das perdas de carga para cada tubo)



Figura 3.4: Desenho esquemático de um sistema com tubulações e bombas em série

a. Tubulações em paralelo (Figura 3.5)

Características de um sistema com tubulações em paralelo

- Tubulações têm rugosidades iguais ou não.
- A vazão Q recebida no entroncamento inicial divide-se entre eles, de acordo com suas características, de modo que, no entroncamento final, volta a assumir o mesmo valor.



Figura 3.5: Desenho esquemático de um sistema com tubulações em paralelo

3.2.2 $NPSH_d$ e $NPSH_r$

A curva de $NPSH_d$ é definida pelas características do sistema projetado. Ela pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$NPSH_d = \frac{P_0 - P_v}{\rho \cdot g} + (Z_1 - Z) - h_{fs} \quad (3.12)$$

Onde

P_0 - Pressão na superfície da água;

P_v - Pressão de vapor (pressão de saturação) para o fluido a temperatura T_1 ;

$(Z_1 - Z)$ - Diferença na altura de uma dada superfície;

ρ - Densidade do fluido, assumida constante;

g - Aceleração gravitacional;

As bombas cinéticas para operarem satisfatoriamente, requerem líquidos livres de vapor na linha de sucção, à entrada do rotor. Se a pressão dentro da bomba cai abaixo da pressão de vapor do líquido, haverá a formação de bolhas de vapor nesse local [4].

Por causa do rápido aumento da pressão dentro da bomba, as bolhas se fundem em uma dada zona com ausência de líquido. Este fenômeno é chamado cavitação (de cavidades) e pode reduzir a eficiência da bomba causando ruído, vibrações, fratura do rotor, carcaça e etc [4].

Para evitar a cavitação, as bombas necessitam de certa quantidade de energia no sistema de sucção, conhecido como NPSH (*Net Positive Suction Head*). O NPSH pode ser requerido ($NPSH_r$) ou disponível ($NPSH_d$). Estes são os dois termos de carga mais importantes na discussão de bombas centrífugas [4].

O fabricante normalmente testa a bomba com água a diferentes capacidades, criada estrangulando o lado de sucção. Quando os primeiros sinais de cavitação por vaporização induzida acontecem, a pressão de sucção é anotada. Esta pressão é convertida em carga e o valor é assinalado na curva da bomba, sendo referido como "carga líquida positiva de sucção requerida ($NPSH_r$) ou, às vezes resumidamente como o NPSH. Assim a Carga Líquida Positiva de Sucção (NPSH) é a carga total no flange de sucção da bomba menos a pressão de vapor, convertida a altura de coluna de líquido [4].

Em resumo, a NPSH disponível é definida como:

$NPSH_d = [(Carga\ de\ pressão) + (Carga\ estática) - (Carga\ de\ pressão\ de\ vapor\ do\ líquido) - (Perda\ de\ carga\ por\ fricção\ na\ tubulação,\ válvulas\ e\ conexões)]$ [4].

Todos os termos em "ft.".

Em um determinado sistema, o $NPSH_d$ pode ser aproximado também por medida na sucção da bomba usando-se a fórmula:

$$NPSH_d = h_{ps} - h_{vp_s} \pm h_{g_s} + h_{v_s} \quad (3.13)$$

h_{ps} - Pressão barométrica, em pés.

h_{vp_s} - Pressão de vapor do líquido na temperatura máxima de bombeamento, em pés absoluto.

h_{g_s} - A leitura manométrica na sucção da bomba expressa em pés (+ se $P > P_{atm}$, - se $P < P_{atm}$) corrigida para a linha central da bomba.

h_{v_s} - Carga de velocidade no tubo de sucção na conexão do manômetro, expressa em pés.

3.3 Bombas centrífugas verticais

As bombas centrífugas são aquelas em que a energia fornecida ao líquido é primordialmente do tipo cinética, sendo posteriormente convertida em grande parte em energia de pressão.

O funcionamento da bomba centrífuga é baseado na criação de uma zona de baixa pressão e de uma zona de alta pressão. A zona de baixa pressão se deve ao fato de que o líquido ao receber através das pás o movimento de rotação do impelidor, fica sujeito à força centrífuga que faz com que as partículas do fluido se desloquem em direção à periferia do impelidor. Este deslocamento acarreta a formação de vazios (baixa pressão) na região central que será preenchido por igual quantidade de líquido provida

pela fonte. Dessa forma, é estabelecida a condição de funcionamento com fluxo contínuo (Regime Permanente) [4].

As bombas centrífugas verticais são, em sua maioria, construídas com eixos na horizontal. Embora bombas com eixo vertical também sejam fabricadas, há uma classe de bombas verticais na qual o rotor fica instalado na extremidade inferior de um eixo prolongado e assim mergulhado no fluido. Esta construção é conveniente quando, por exemplo, deseja-se elevar água de um rio ou lago sem submergir o acionador, geralmente um motor elétrico que não suporta a imersão. Estas bombas verticais são destinadas à instalação em um poço inundado com água e são ditas "bombas verticais de poço úmido" que será a bomba utilizada para as análises deste trabalho.

As bombas verticais de poço úmido são chamadas também de bombas verticais tipo turbina. Num passado mais distante, bombas dotadas de difusores eram designadas bombas tipo turbina. Como as turbinas hidráulicas requerem a presença de pás diretoras para controle, as bombas dotadas de difusores com palhetas fixas, portanto, eram denominadas bombas tipo turbina.

Uma bomba centrífuga que contenha mais de um rotor é uma bomba centrífuga multi estágios. Cada estágio fornece ao fluido uma determinada energia, sendo que estas se adicionam. Havendo necessidade de maior energia - mais pressão - aumentamos o número de rotores dispostos em série. Os rotores podem estar montados no mesmo eixo ou, mais raramente, em eixos distintos.

Como em todas as bombas, a energia é fornecida pelo acionador: motor elétrico, motor de combustão interna, turbina a vapor, etc

3.3.1 A bomba para poços úmidos

As bombas verticais para poço úmido são destinadas ao bombeamento de líquidos limpos ou levemente contaminados. Os componentes hidráulicos ficam imersos no líquido bombeado e o motor de acionamento é instalado em área seca, no topo. A

bomba tem descarga e suporte de coluna comun. A bomba vertical para poço úmido tem um eixo vertical com os mancais deslizantes normalmente lubrificados pelo líquido bombeado, o que se chama de Lubrificação Interna.

Precauções:

- a. Não trabalhar com a bomba a seco, sob pena de danos no equipamento e no mancal caso o tenha;
- b. Não bombear produtos líquidos que contenham sólidos em suspensão ou produtos abrasivos;
- c. Não partir a bomba sem que o rotor esteja imerso, passível do não funcionamento do equipamento [6].

Capítulo 4

A Transferência de calor

No capítulo 4 serão brevemente abordadas duas maneiras principais de transferência de calor – condução e convecção. A ênfase estará na abordagem da condução em tubos e sistemas de escoamento, um dos principais objetivos deste trabalho.

4.1. Transferência de calor – Condução e Convecção

Enquanto a Calorimetria estuda quantitativamente a troca de calor entre corpos de diferentes temperaturas, a Transmissão de Calor estuda o fluxo de energia através dos corpos em função do tempo. Existem 3 maneiras de estudar essas transmissões [3].

4.1.1 Condução

Ao se aquecer, por exemplo, a extremidade A de uma barra metálica enquanto a outra extremidade, B, é mantida a uma temperatura menor, existe uma transmissão desse calor da extremidade A (de maior temperatura) em direção à extremidade B (de menor temperatura). Esse fluxo de energia que ocorre em um meio material é denominado condução. A equação que estuda tal fenômeno é [3]:

$$\phi = \frac{K \cdot A \cdot \Delta\theta}{L} \quad (4.1)$$

Onde:

ϕ - Fluxo de calor por condução [cal/s];

K - Condutividade térmica do material [cal/(s.m.°C)];

$\Delta\theta$ - Diferença de temperatura entre as extremidades;

A - Área Transversal ao fluxo de calor;

L - Comprimento Longitudinal do corpo.

Em física, a equação do calor é um modelo matemático para a difusão de calor em sólidos. Este modelo consiste em uma equação de derivadas parciais que muitas vezes é também chamada de equação da difusão (térmica).

Existem diversas variações da equação do calor. Na sua forma mais conhecida, ela modela a condução de calor em um sólido homogêneo, isotrópico e que não possua fontes de calor, e é escrita:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4.2)$$

Aqui, $u = u(x, y, z, t)$ representa o campo de temperaturas e é a função incógnita. η é o coeficiente de difusão térmica.

Na presença de fontes de calor, a equação toma a seguinte forma:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f(x, t) \quad (4.3)$$

Existem bons condutores de fluxo de calor, como os metais; há também maus condutores, ou isolantes, que dificultam esse fluxo. Em termos dos estados físicos, de maneira geral os sólidos são melhores condutores que os líquidos que, por sua vez, são melhores condutores que os materiais gasosos. Neste trabalho, atentaremos para a condução de calor no sistema de escoamento do etileno líquido refrigerado [3].

4.1.2. Convecção

No caso dos meios materiais fluídos (líquidos e gases), existe a transmissão de calor por um meio conhecido como convecção. O aquecimento (ou resfriamento) de qualquer parte do fluído causa uma diminuição (ou aumento) localizada da sua densidade. Devido à mobilidade das moléculas nesses meios, esta variação de densidade faz com que ela se movimente dentro do sistema. No caso de ser aquecida a molécula fica “mais leve” e sobe; o inverso ocorre no caso de ser resfriada. Se uma parte do fluído sobe, outra parte terá de descer, provocando correntes que o “misturam” o fluído, aumentando a transferência e a distribuição da temperatura. Estas correntes são chamadas de correntes de convecção [2].

A convecção térmica é descrita pela lei do resfriamento de Newton, a qual estabelece que a taxa de perda de calor de um corpo é proporcional à diferença nas temperaturas entre o corpo e seus arredores. A taxa de transferência de calor convectiva é dada na forma da equação diferencial:

$$\frac{dQ}{dt} = Q' = h \cdot A \cdot (T_{env} - T(t)) = -h \cdot A \cdot \Delta T(t) \quad (4.4)$$

Onde:

Q - Energia térmica em joules

H - Coeficiente de transferência térmica

A - Área de superfície pela qual o calor está sendo transferido

T - Temperatura da superfície do objeto e interior (uma vez que estas são consideradas como tendo o mesmo valor nesta aproximação)

T_{env} - Temperatura do ambiente; i.e. a temperatura adequadamente distante da superfície

$\Delta T(t)$ - Gradiente térmico dependente do tempo entre o ambiente e o objeto.

Capítulo 5

Metodologia

No capítulo 5 são concedidas informações sobre a bomba vertical selecionada para este trabalho. Também há os detalhes sobre a metodologia e os dados de “*input*” para a realização das simulações que serão concluídas e expostas no capítulo 6.

5.1 Metodologia para a análise da bomba vertical

O tipo de equipamento mecânico escolhido para a análise foi a bomba centrífuga vertical de poço úmido. Na figura 5.1 estão relacionados às variáveis dimensionais para instalação de bomba com detalhamentos na tabela 5.1.

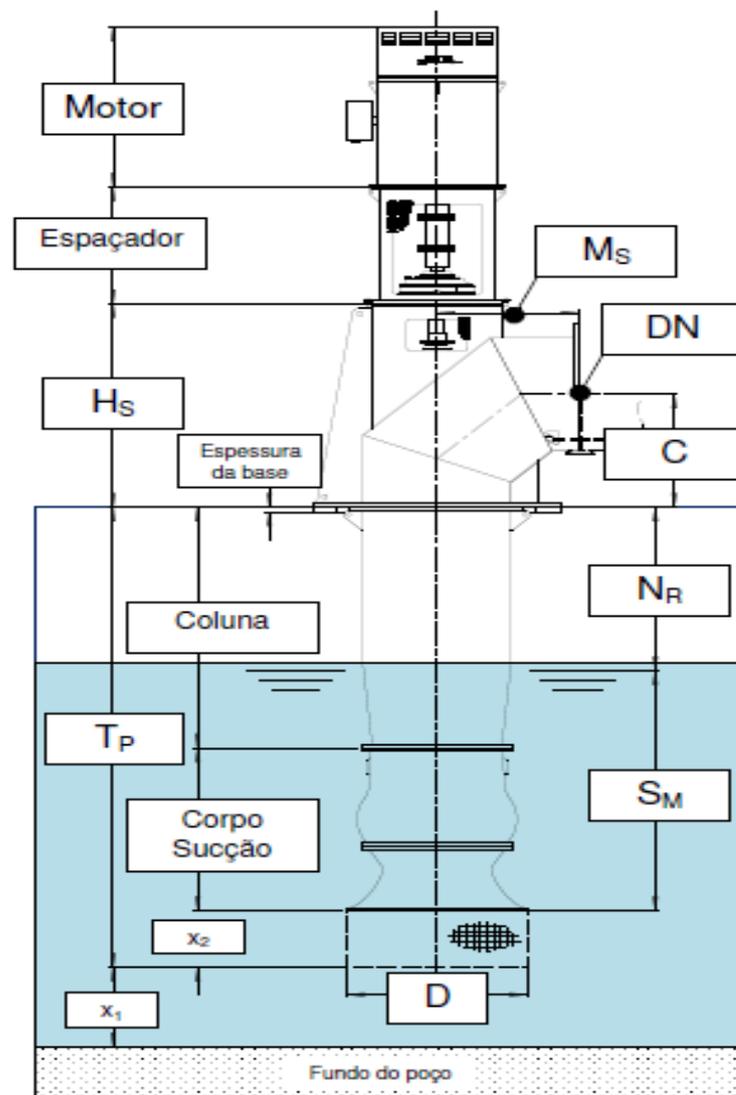


Figura 5.1: Variáveis dimensionais para instalação de bomba centrífuga vertical de poço úmido [6].

Tabela 5.1: Principais dimensões de cada instalação.

Variável	Descrição
DN	Diâmetro do bocal de descarga da bomba
Ms	Comprimento do bocal de descarga
C	Altura do bocal de descarga com relação ao piso
Hs	Altura do suporte do motor
Tp	Comprimento total da bomba (abaixo do piso)
Nr	Nível de fluido no reservatório
Sm	Submergência
D	Diâmetro do bocal de entrada da bomba
X1	Distância da bomba ao fundo do poço
X2	Comprimento do filtro de sucção

O trabalho para o desenvolvimento desta metodologia foi feita a partir do estudo de casos selecionados sobre bombas verticais. Para melhorar o entendimento da metodologia, a bomba vertical foi dividida em três partes principais: corpo superior, corpo de sucção e a coluna intermediária conforme figura 5.2.

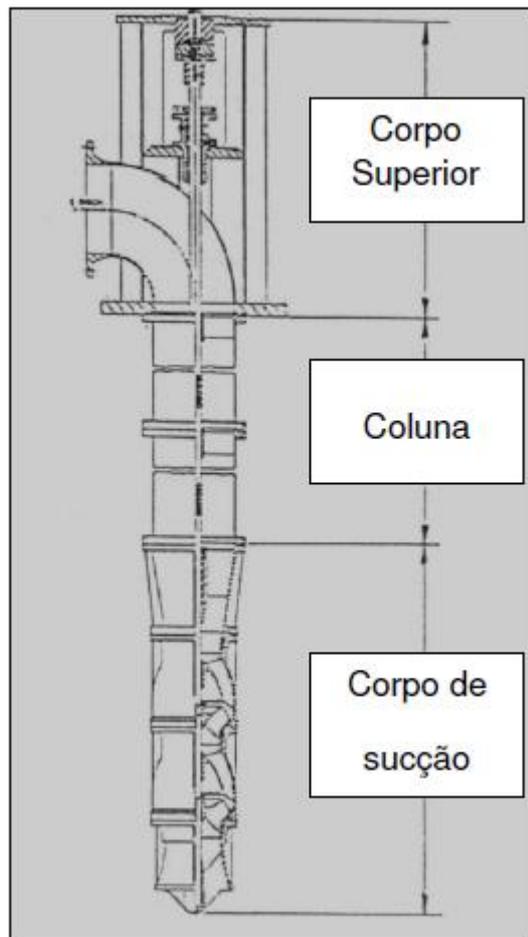


Figura 5.2: Divisão da bomba vertical em 3 partes [6].

Contudo, para melhor esclarecimento de outras terminologias que aparecem na metodologia do trabalho, a figura 5.3 relaciona outras partes de bombas centrífugas verticais.

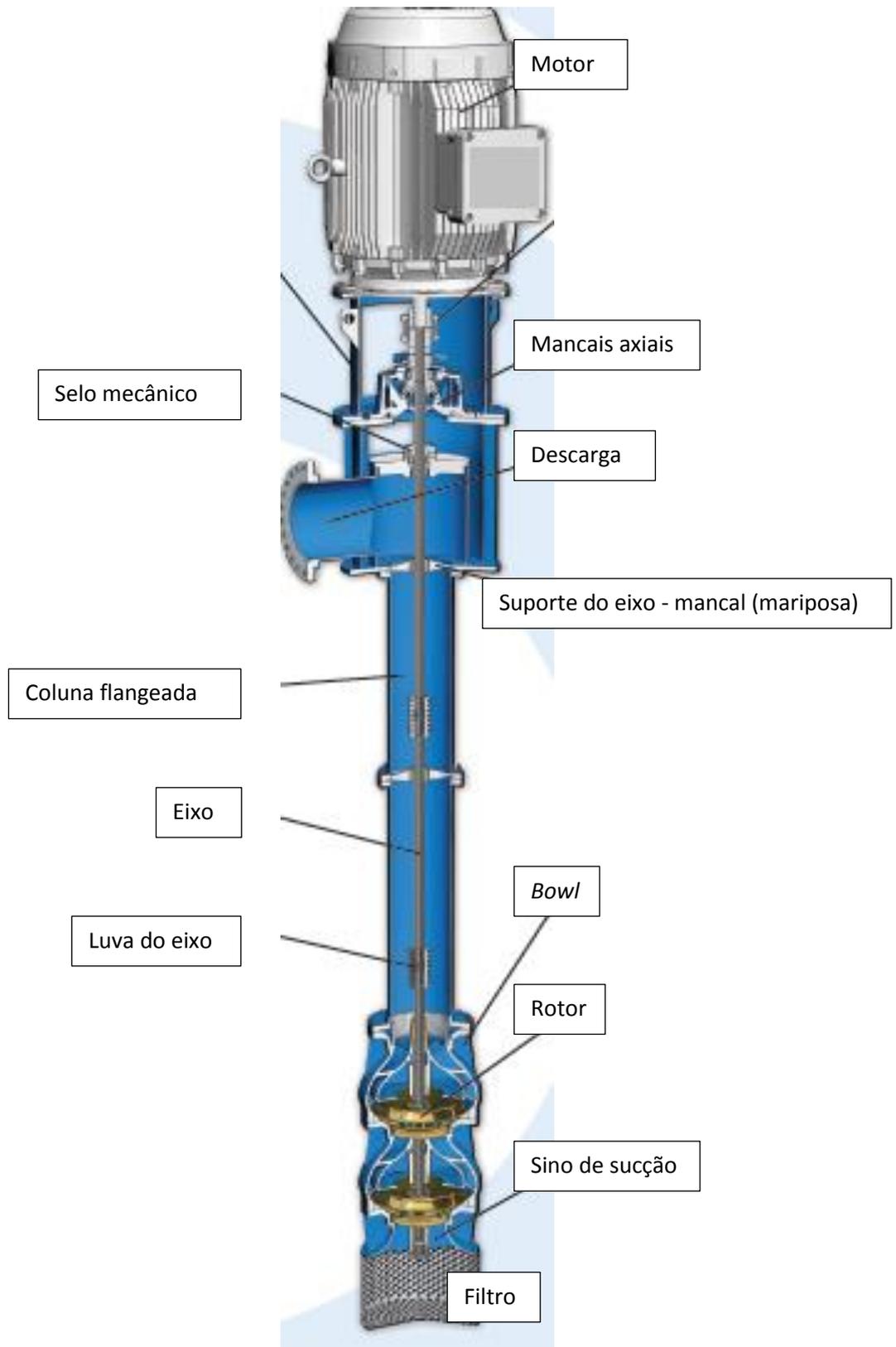


Figura 5.3: Detalhes de outras terminologias para bombas verticais [9].

5.1.1 Dados e *Layout* da bomba vertical em estudo

5.1.1.1 Classificação e dados de algumas partes da bomba

A bomba centrífuga em estudo é vertical suspensa, possui carcaça simples, descarga pela coluna e é conhecida como VS1 segundo classificação da norma API 610 8ª edição. Ela é do tipo múltiplo estágios com 13 impelidores ao longo da estrutura. Esta formação também é chamada de “*Open shaft assembly*” ou “montagem de eixo aberto” na língua portuguesa. A bomba se encontra dentro de um tanque com fluido etileno em temperatura criogênica (-101.9°C) abaixo do nível do piso. Contudo a descarga é fora do tanque. Logo, a classificação do serviço é “Transferência de Etileno Refrigerado”.

5.1.1.2 Classificação dos impelidores

Os impelidores, também conhecidos como rotores são do tipo fechado e possuem fluxo axial.

5.1.1.3 Classificação da descarga

A descarga é do tipo simples e acima do piso conforme figura 5.1.

5.1.1.4 Materiais constituintes

Os materiais usados para a constituição da bomba vertical foram generalizados para as partes que entraram em estudo. Estas partes são o corpo de sucção, a coluna e o corpo superior, sendo material A351 CF 3M para as colunas, *bowls* e impelidores e o K500MONEL para o eixo.

5.1.1.5 Condições de operação e desempenho

Segundo o desenho realizado é considerada a capacidade normal da bomba é de 111.05 m³/h, uma pressão de sucção de 1.91 kg/cm² e uma pressão de descarga de 39.7 kg/cm² e NPSH de 0.38m com serviço contínuo. Quanto a desempenho são consideradas potencia de 165 KW gerada pelo motor com eficiência de 75.5% velocidade de sucção de 7050 m/h. Esses dados são médios e embasados em informações de operação de bombas centrifugas verticais propostas para o tipo de serviço especificado.

5.1.2 Esquema de posicionamento da bomba em campo

O arranjo da bomba e do tanque de etileno em campo é dado conforme esquema da figura 5.4 e 5.5 abaixo:

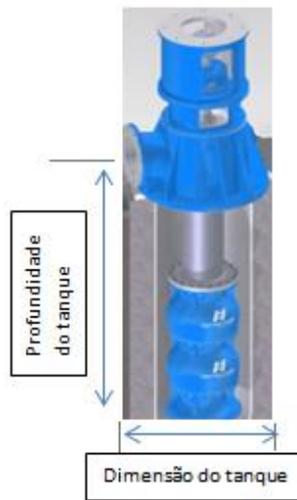


Figura 5.4: Arranjo da bomba em campo



Figura 5.5: Posicionamento da linha de centro da descarga

5.1.3 Desenho de apresentação da bomba

O desenho da bomba em questão teve como base trabalhos de campo em modelos provenientes das principais fabricantes de bombas no Brasil [8], as cotas são próximas à realidade e estimadas em relação ao projeto de bombas do tipo VS1 para o serviço solicitado (transferência de etileno refrigerado) e não serão totalmente detalhadas neste trabalho em razão de não possuírem solicitações fundamentais nas análises de transferência de calor e de fluido abordadas. As figuras 5.6, 5.7 e 5.8 mostram maiores detalhes visuais do modelo da

bomba vertical usada neste trabalho. O software de computador usado para a construção do modelo foi o *Autodesk Inventor Professional* versão 2015.

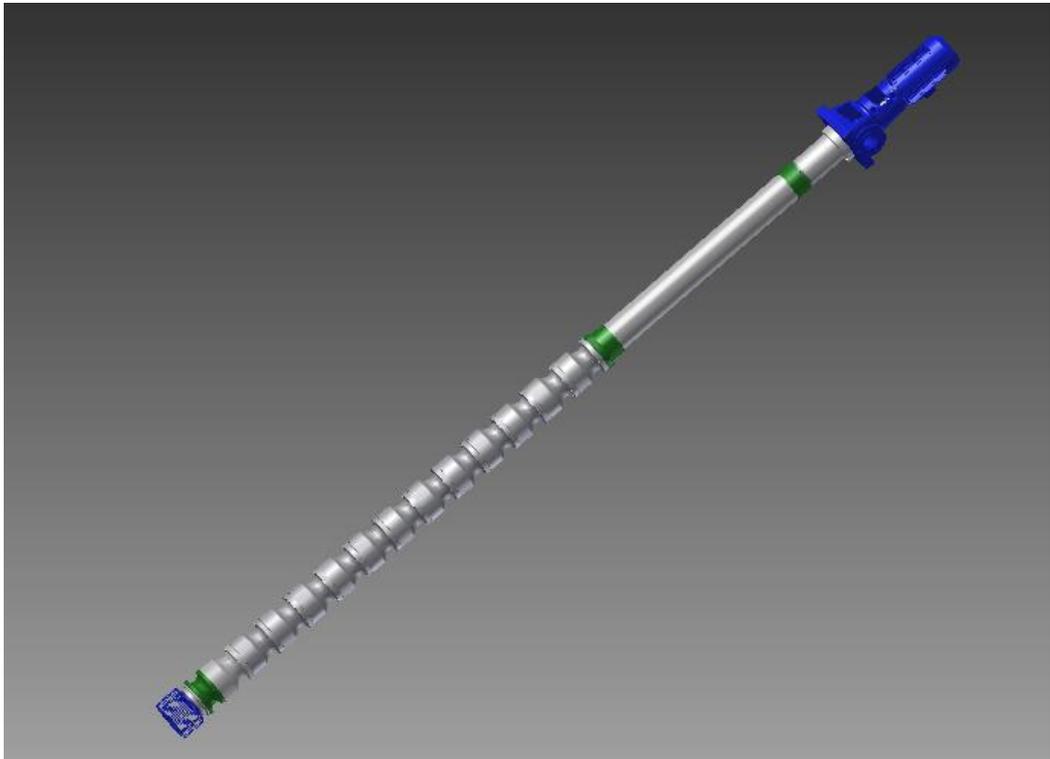


Figura 5.6: Modelo da bomba construída no programa *Inventor*

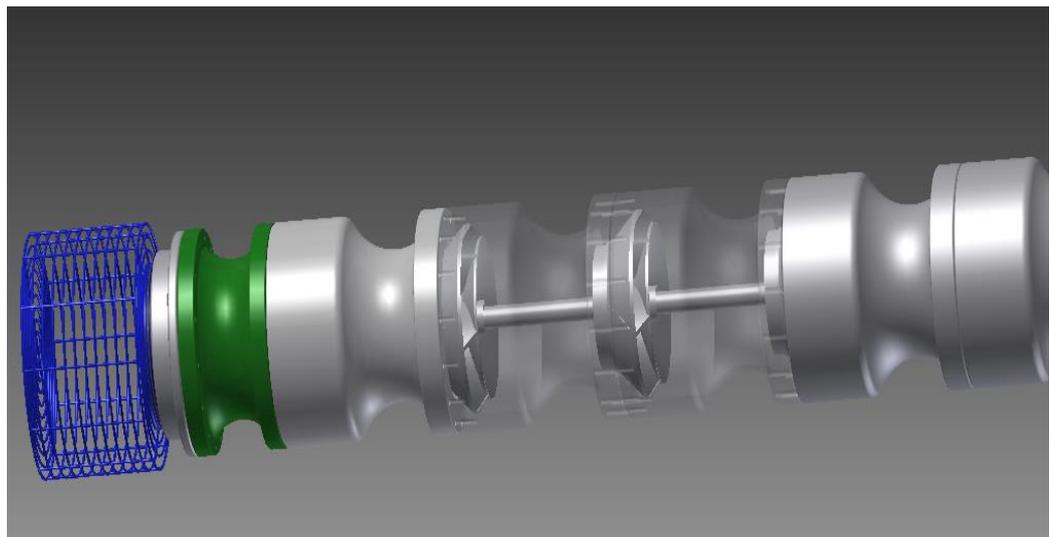


Figura 5.7: Detalhes de partes internas do corpo de sucção



Figura 5.8: Detalhes do corpo superior

5.1.4 *Inputs* do modelo e da análise de transferência de calor e comportamento do fluido

Os dados do modelo realizado neste trabalho são provenientes de estimativas decorrentes de casos de bombas verticais de poços úmidos onde a temperatura do etileno passou por intensas mudanças, o que ocasiona problemas de funcionamento da máquina.

Cálculos de relações térmicas sobre a passagem do fluido dentro da bomba vertical foram feitos. Para este processo, houve a utilização do *software* de elementos finitos *COMSOL MULTIPHYSICS 5.1*. Dados de entrada e condições de contorno foram impostos no *software* que possibilita modelagem sobre as condições térmicas e de transferência de calor.

Em razão da geometria mais complexa da bomba, a modelagem da máquina inteira necessitaria do uso de muitos elementos e de uma malha mais larga. Logo, a modelagem

ocorreu com foco no corpo de sucção. A intenção é encontrar gradientes de temperatura no interior da bomba devido à transferência de etileno. Tais análises não costumam ser feitas e entregues junto aos dados de bombas pelos fabricantes.

O modelo consiste em dois domínios do fluido (etileno refrigerado na região de sucção e no tanque). Há a região sólida, que são o corpo de sucção e colunas propriamente ditas. A temperatura inicial é conhecida devido a medições prévias.

Por fim, com o intuito de simplificar os cálculos, a realidade pode ser aproximada definindo as temperaturas:

- a. - 40°C na região de sucção do fluido
- b. - 30°C na região de descarga

5.1.4.1 Dados para Modelagem

A temperatura de admissão do etileno no domínio de sucção foi definida para 233 K (-40 ° C). A temperatura de admissão do etileno no domínio de descarga foi definida como 243 K (-30 ° C). Esta é apenas uma aproximação das condições reais.

Nos dois casos, foram assumidas as seguintes condições a fim de facilitar os cálculos:

$$Q = 80 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$T_{inlet,suction} = 233 \text{ K} = T \text{ na região de entrada da sucção}$$

$$T_{inlet,discharge} = 243 \text{ K} = T \text{ na região de descarga}$$

$$T_{\infty,air} = 293 \text{ K} = \text{Temperatura do ar}$$

$$\text{Coeficiente de transferência de calor na descarga} = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{Condição de contorno fora da região de sucção} = \text{adiabática}$$

Por causa da simetria, apenas metade da bomba foi modelada em algumas análises. Para modelar a transferência de calor para as paredes da bomba adequadamente, finas camadas de elementos tetraedrais e triangulares foram colocados nas paredes internas. A parte restante da malha também é composta por elementos tetraedrais e triangulares. Plotagens diferentes quanto à velocidade e sua magnitude e em relação à temperatura em diferentes planos de interesse foram efetuadas. Também foram gerados resultados de fluxo de calor entre as superfícies do corpo da bomba.

Para os cálculos, foi feita a modelagem do *bowl* 1 ao 13 da bomba. O modelo é considerado simétrico em torno do eixo vertical de rotação. Com esta suposição a pretensão foi modelar partes da seção transversal. Para esta geometria, elementos triangulares foram gerados a partir de uma malha de superfície. A fonte de calor foi definida a partir da sucção e a magnitude da fonte foi determinada da seguinte forma:

- Em uma capacidade de 80 m³/hr, a eficiência da bomba é igual a 45%.
- Presume-se que a parte restante da potência do motor é convertida em calor, o calor gerado em cada estágio é igual a $0,55 \times 450\text{kW} / 13 = 19,1 \text{ kW}$.
- A temperatura de admissão foi definida como 233,35K, esse é o valor obtido experimentalmente.

Um fenômeno que provavelmente pode ocorrer nestes casos é uma transferência de calor maior na parede exterior do corpo de sucção por causa do aquecimento do etileno. Isto poderia levar a uma temperatura um pouco maior do etileno na sucção e intenso aquecimento até o último estágio.

Capítulo 6

A transferência de calor

No capítulo 6 são concedidas as análises da simulação de Transferência de calor Conjugada sobre a bomba vertical selecionada para este trabalho. Há a aplicação dos dados e das condições iniciais aproximadas a casos reais e a exposição das simulações, bem como as análises gráficas e seus resultados.

6.1 A Transferência de calor conjugada

Para a estrutura da análise utilizada neste trabalho, foi requerido o uso do software *Comsol Multiphysics 5.1* no módulo transferência de calor Conjugada “*Heat Transfer Module*”.

Este módulo ajuda a investigar os efeitos de aquecimento e resfriamento em dispositivos, componentes ou processos. O módulo possui ferramentas de simulação para estudar mecanismos de transferência de calor - condução, convecção e radiação - frequentemente em conjunto com outras físicas, como mecânica estrutural, dinâmica dos fluidos, eletromagnetismo e reações químicas [10].

No *Heat Transfer Module* há um banco de dados de materiais interno que contém as propriedades de diversos fluidos e gases comuns, o que inclui muitos dos dados termodinâmicos. Exemplos desses dados são a condutividade térmica, capacidade térmica e densidade. A biblioteca de materiais, dentro do programa, possui uma fonte para propriedades de material, com os dados ou relações algébricas de materiais sólidos, onde muitas dessas propriedades, como o módulo de *Young* e a condutividade elétrica, dependem da temperatura

[10]. Logo, todas as informações sobre o fluido em questão para este trabalho – o etileno refrigerado – podem ser encontradas na biblioteca de materiais do programa.

Neste trabalho, não foram considerados os estudos sobre radiação, mas, sim, sobre a transferência de calor por condução em sólidos e fluidos em regime turbulento que é o que ocorre na realidade de uma bomba centrífuga vertical de múltiplos estágios.

6.2 Relatório das análises

A intenção das análises foi a verificação das variações de temperatura na estrutura sólida e líquida da bomba conforme a ocorrência da passagem do fluido. O interesse se deu na investigação de um gradiente de temperatura conforme o escoamento do fluido e o mapeamento dessas variações térmicas, fato que pode ocasionar problemas de aquecimento.

Para todas as análises foram considerados parâmetros sobre materiais, fluido e transferência de calor que serão a seguir detalhados.

6.2.1 Materiais

6.2.1.1 C₂H₄ (Etileno-líquido) ou Eteno

Como fluido, o material utilizado foi o Etileno Líquido refrigerado (-101°C). Na modelagem, o etileno se encontra em forma de caixa (tanque) e em uma forma especial dentro da bomba, obedecendo aos contornos da geometria analisada (Figura 6.1 e 6.2). Os parâmetros utilizados na simulação para a análise do fluido foram os descritos conforme Tabela 6.1.

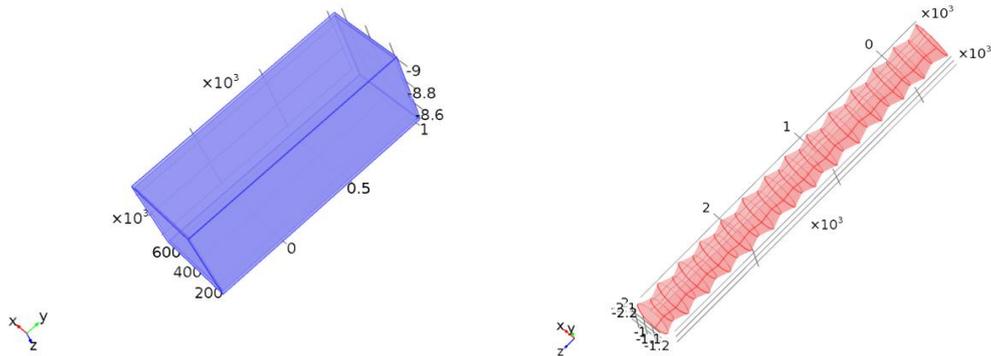


Figura 6.1: Modelos para consideração do etileno na modelagem

Tabela 6.1: Parâmetros considerados para as análises de fluido na modelagem.

Nome	Valor
Capacidade térmica a Pressão constante [J/(kg*K)]	2464,4
Densidade [kg/L]	0,5684
Viscosidade dinâmica [Pa*s]	0,715
Condutividade térmica [W/(m*K)]	5

6.2.1.2 Aço 316L (UNS S31603) (SUS 316L - Sólido)

O aço constituinte do corpo da bomba foi o aço UNS S31603 – 316L e foi modelado como domínio de toda a estrutura do corpo da bomba (Figura 6.2). Materiais do eixo e das luvas do eixo, bem como os dos rotores não foram considerados para esta análise pelo fato de não estarem diretamente ligados às paredes do corpo da bomba, onde está o maior interesse de estudo. Os parâmetros e o equacionamento utilizados para a modelagem do sólido estão expostos na Tabela 6.3.

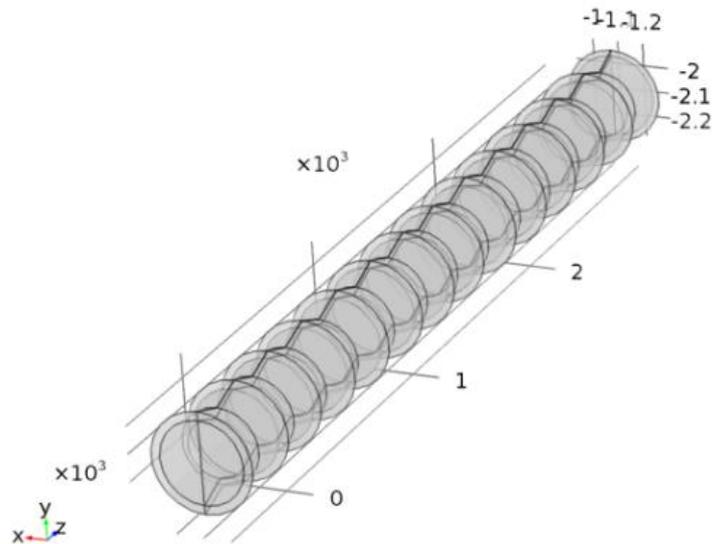


Figura 6.2: Sólida de material 316L (UNS S31603) (SUS 316L) utilizado para a modelagem

Primeiramente, a análise de transferência de calor conjugada foi feita em um só *bowl* (figura 6.3) da bomba como teste de aceitação da geração de malha devido a geometria do corpo da bomba. Mas, como há o interesse na análise de mais de um *bowl*, foram usados 4, 8 e 13 *bowls* para acompanhar mais aproximadamente as variações das velocidades de fluido, de transferência de calor e de temperatura na estrutura.

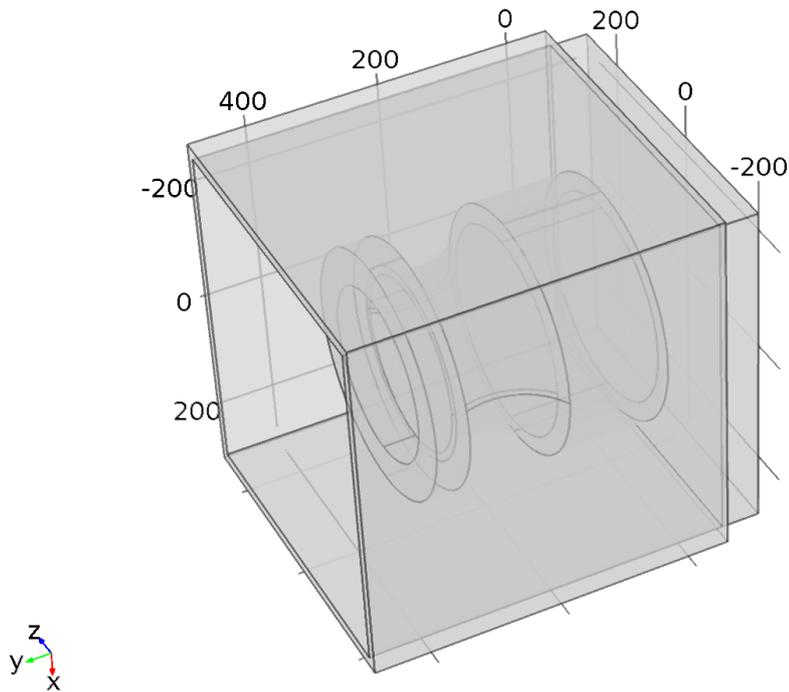


Figura 6.3: Imagem de um *bowl*.

6.2.2 Modelagem e análises

6.2.2.1 Transferência de calor

Para as análises de transferência de calor foram utilizados equações correspondentes a seguir:

Equações

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q \quad (6.1)$$

$$\mathbf{q} = -k \cdot \nabla T \quad (6.2)$$

Onde:

ρ - Densidade

C_p – Capacidade térmica a Pressão constante

u – Velocidade em m/s^2

T - Temperatura

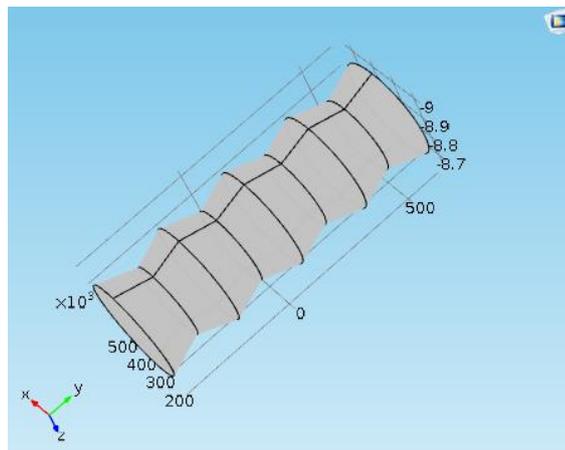
K – Condutividade térmica

Q – Calor gerado em Joule

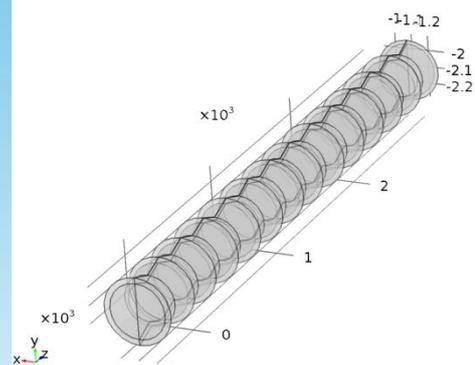
q – Calor por condução

a. Transferência de calor em sólidos

Para a transferência de calor em sólidos foram utilizados os modelos das figuras 6.4 (a) e (b) para 4 a 13 *bowls* respectivamente.



(a)



(b)

Figuras 6.4 (a) e (b): Sólidos utilizados para transferência de calor.

b. Transferência de calor em fluidos

Para a transferência de calor em fluidos foram utilizados os modelos das figuras 6.5 e 6.6 para 4 a 13 *bowls*. Logo, há uma modelagem para o fluido (figura 6.7) dentro da bomba e exterior a mesma (tanque) independente da quantidade de *bowls*.

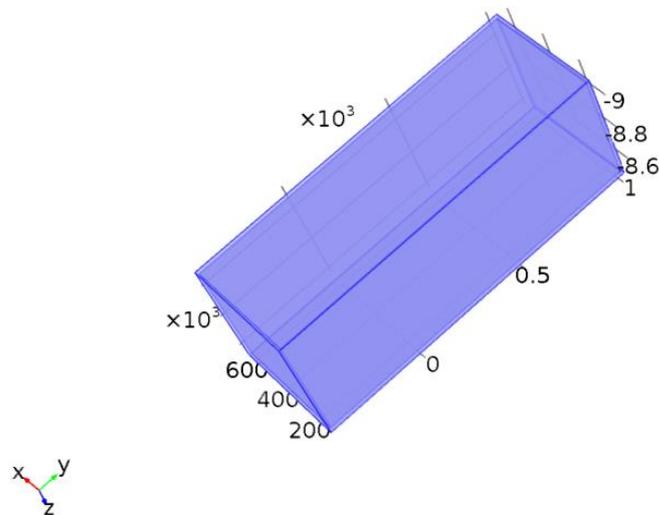


Figura 6.5: Tanque utilizado na transferência de calor em fluido

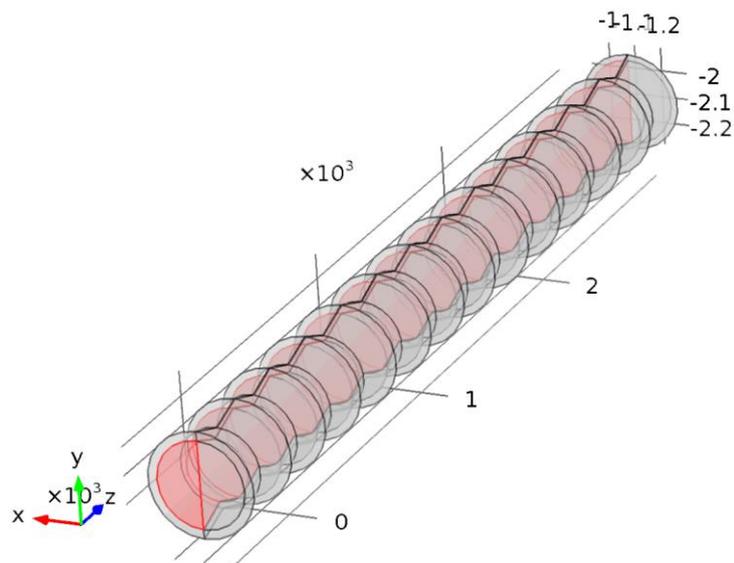


Figura 6.6: Simulação do Fluido dentro da bomba

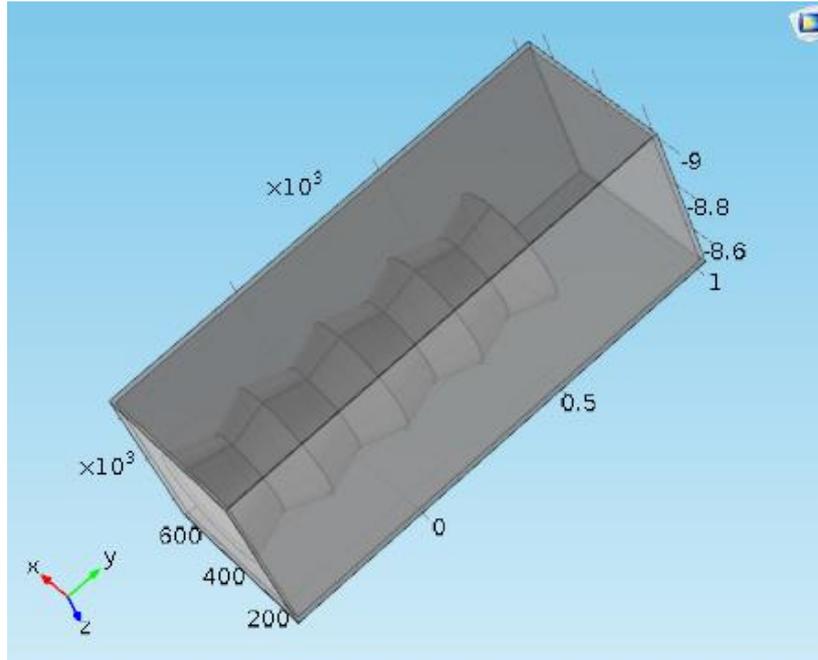


Figura 6.7: Simulação da bomba dentro do tanque

6.2.2.2 Fonte de calor

Como fonte de calor foi utilizado o contorno exibido na figura 6.8. A análise possui equacionamento definido e seus principais parâmetros podem ser vistos na Tabela 6.2.

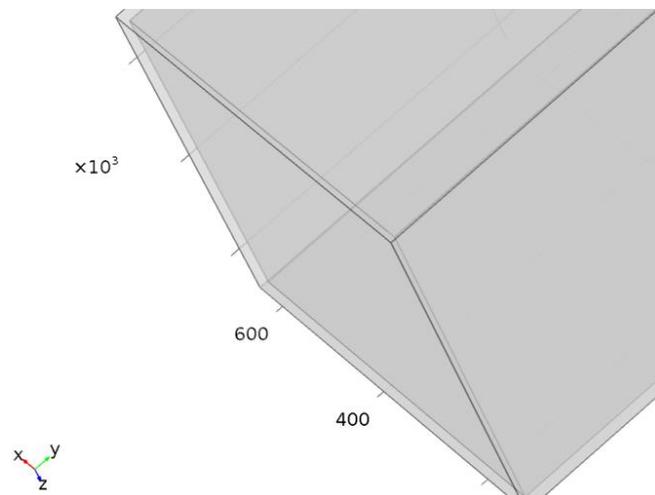


Figura 6.8: Imagem do contorno utilizado como fonte de calor.

Tabela 6.2: Principais parâmetros utilizados para estabelecimento da fonte de calor.

Parâmetros	
Descrição	Valor
Fonte de calor	233K
Taxa de transferência de calor por estágio da bomba	19100 W

6.2.2.3 Fluxo de calor

O fluxo de calor corresponde a todo o modelo (figura 6.9) de forma a simplificar o processamento das análises e aproximar a simulação da realidade.

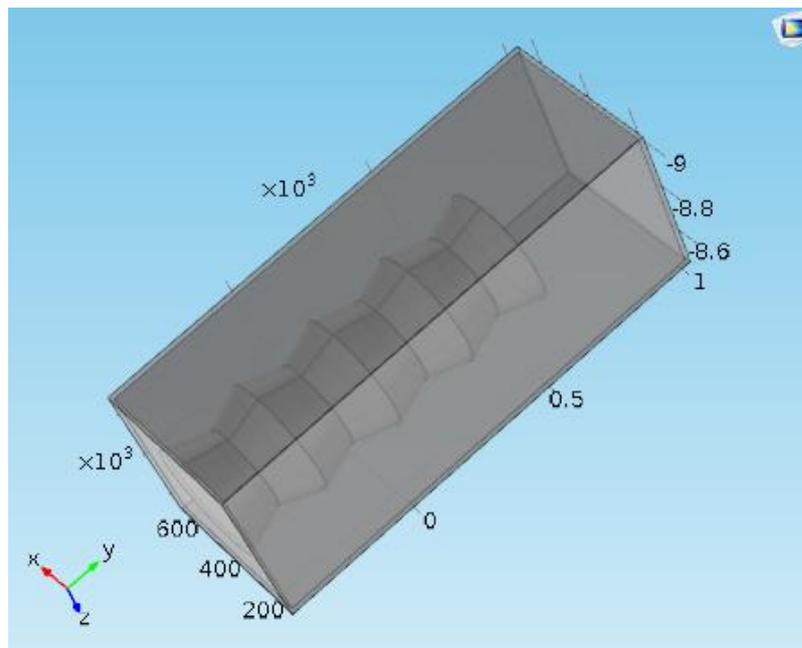


Figura 6.9: Modelo completo estabelecido para admitir o fluxo de calor. Formato similar para 8 e 13 *bowls*.

6.2.2.4. Saída total do fluido

A condição de contorno para a saída total do fluxo de calor pode ser vista na figura 6.10.

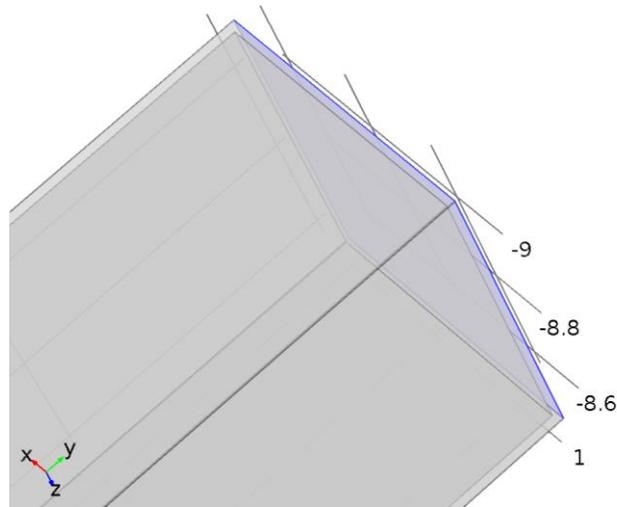


Figura 6.10: Imagens do contorno utilizado para saída simbólica do fluido (em azul).

6.2.2.5 Escoamento turbulento, $k-\epsilon$

Para a análise do escoamento turbulento dentro do corpo da bomba há o equacionamento apropriado proveniente do banco de equações do *software* de elementos finitos. Os Parâmetros para a definição e equacionamento da análise de escoamento estão exibidos na Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Parâmetros para a definição e equacionamento do escoamento turbulento

Parâmetros	
Descrição	Valor
Discretização de fluidos	P1 + P1
Compressibilidade	Incompressível
Tipo de modelo de escoamento turbulento	<i>RANS</i>
Modelo de escoamento turbulento	k - ϵ
Pressão de referencia	1[atm]
Corrente de difusão	<i>On</i>
Parâmetro do modelo turbulento	1.44
Parâmetro do modelo turbulento	1.92
Parâmetro do modelo turbulento	0.09
Parâmetro do modelo turbulento	1.0
Parâmetro do modelo turbulento	1.3
Lei de parede constante	5.2
Parâmetro do modelo turbulento	0.41
CFL expressão numérica	Automático
Escala de velocidade	1[m/s]
Fator da escala de comprimentos	0.035

6.2.2.6 Propriedades do fluido

Como parâmetros convenientes para maiores detalhamentos das propriedades do fluido utilizadas pelo programa têm-se a viscosidade dinâmica e as funções de forma todas provenientes do banco de equações do *software* de elementos finitos.

6.2.2.7 Entrada de fluido – *Inlet*

A condição de contorno utilizada para a entrada do fluido pode ser vista na figura 6.11.

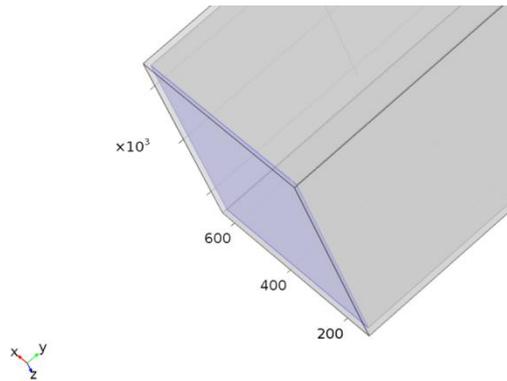


Figura 6.11: Entrada de fluido - *Inlet*

6.2.2.8 Saída de fluido – *Outlet*

A condição de contorno utilizada para a saída do fluido pode ser vista na figura 6.12.

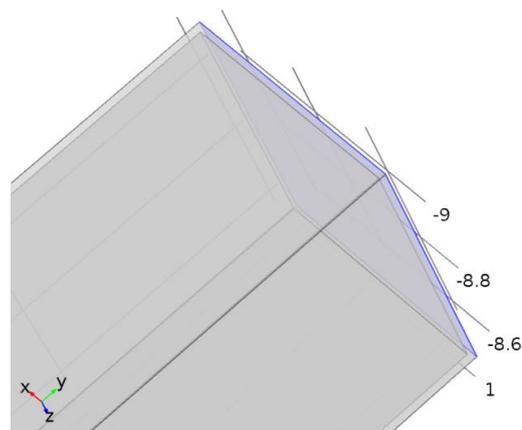


Figura 6.12: Contorno utilizado para saída do fluido - *Outlet* .

6.2.2.9 Função *FAN* (“Ventoinha” de fluxo axial)

A função *FAN* é um recurso do programa de elementos finitos que simula uma “ventoinha” de fluxo axial. Foi utilizada para direcionar a pressão exercida pelo fluido nas paredes internas e externas do *bowl* (Figura 6.13) simulando a movimentação do fluido devido à rotação dos impelidores (rotores). A Tabela 6.4 demonstra os principais parâmetros utilizados para esta análise.

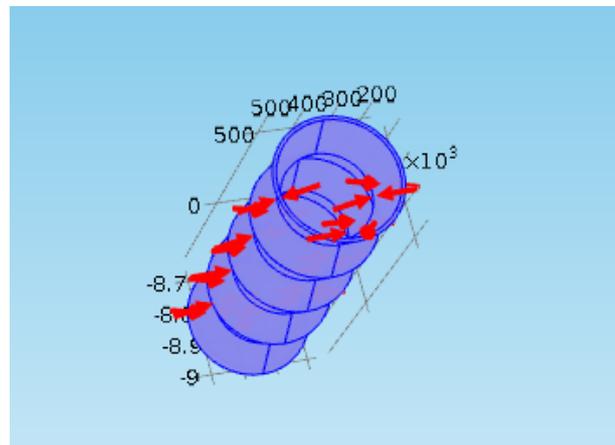


Figura 6.13: Função “*FAN*”

Tabela 6.4: Principais parâmetros utilizados para a definição da função *FAN*. “ventoinha”.

Parâmetros	
Descrição	Valor
Direção de escoamento	<i>Inlet</i>
Pressão de sucção	15690
Tipo de Interpolação	Linear
Vazão	80 m ³ /s
Pressão estática	15960 Pa
Velocidade linear de escoamento	0.022
Pressão estática	5120000 PA
Direção de escoamento	Normal
Escala de referencia para velocidade	1[m/s]

6.2.2.10 Análise Multifísica

Para a análise multifísica foi modelado um escoamento não isotérmico, nos quais os principais parâmetros podem ser vistos na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Principais parâmetros para a modelagem multifísica não Isotérmica

Parâmetros	
Descrição	Valor
Modelo para o escoamento turbulento	Kays - Crawford
Escoamento	Escoamento turbulento, $k - \epsilon$ (spf)
Transferência de calor	Transferência de calor (ht)

6.2.2.11 Malha

Foram criadas malhas tetraedrais para as análises (figura 6.14). Para refinamento do modelo, foi elaborada a análise por convergência de malha para 13 *bowl*s.

6.2.2.11.1 Análise de Convergência de Malha

Para a análise de convergência de malha foram efetuados refinamentos em relação a primeira malha gerada conforme a sequência a seguir:

a- Malha 1 (extra grossa):

Malha considerada extra grossa. Parâmetros das análises e da malha podem ser vistos nas Tabela 6.6 e imagens da malha encontram-se nas figuras 6.14 e 6.15. Na figura 6.16 está o

detalhe de uma região da malha após a simulação. No caso, a simulação é a de velocidade do fluido.

Tabela 6.6: Parâmetros para a Malha 1

Estatísticas da malha	
Propriedades	Valor
Mínima qualidade de elementos	2.436E-4
Média de qualidade de elementos	0.1924
Elementos tetraedrais	1924
Elementos triangulares	1624
Tamanho máximo de elementos	1200
Tamanho mínimo de elementos	217
Fator de curvatura	0.9
Resolução de regiões estreitas	0.2
Taxa de crescimento de elementos	1.85
Tamanho pré-definido	Extra grossa
Elementos pontuais	580
Elementos vertex	124

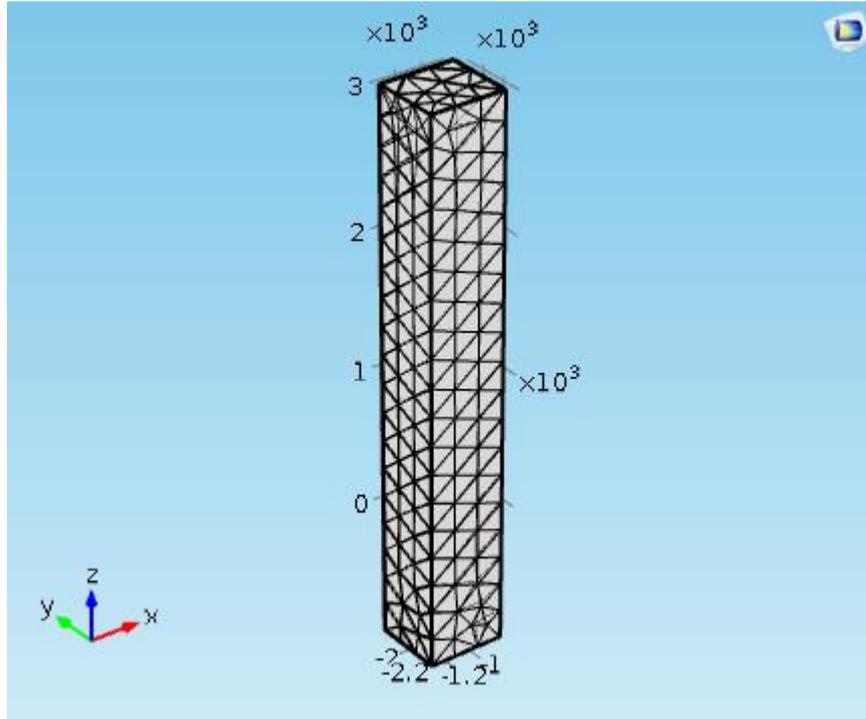


Figura 6.14: Malha 1 no tanque de etileno.

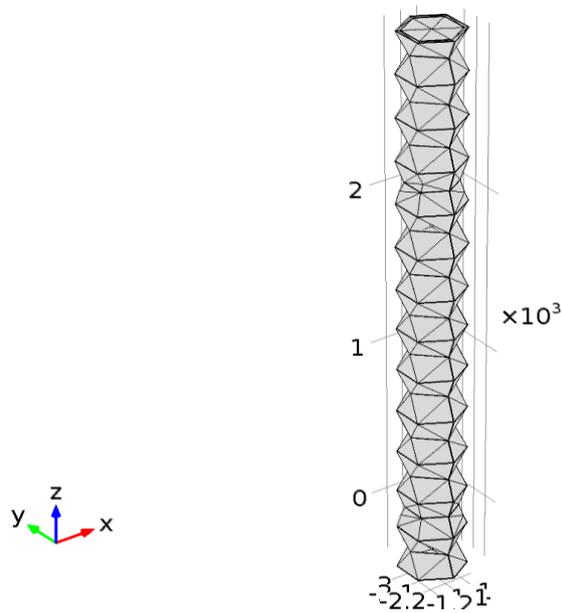


Figura 6.15: Malha 1 no corpo da bomba vertical – 13 *bowls*

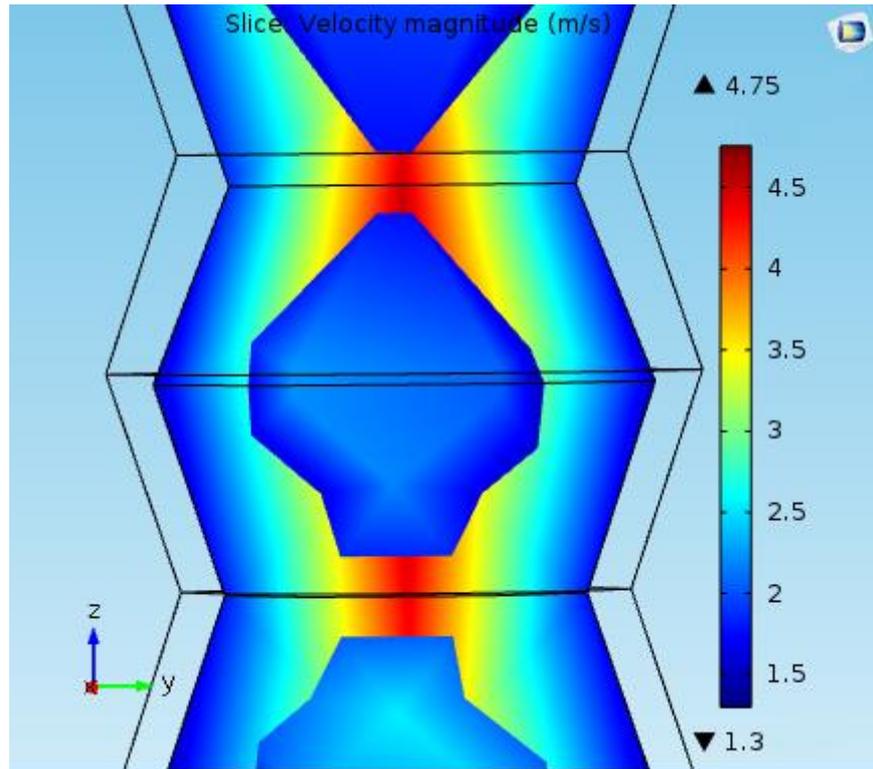


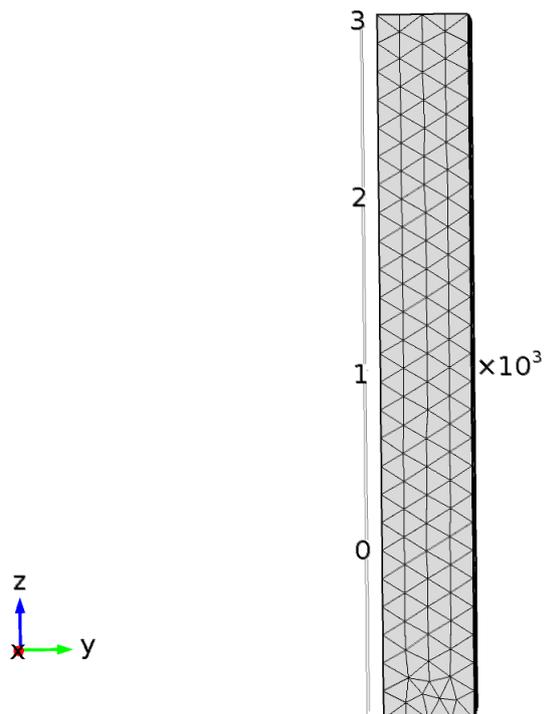
Figura 6.16: Região da malha 1 e resultados após a simulação de velocidade (m/s).

b- Malha 2 (grossa):

Malha considerada grossa. Parâmetros das análises e da malha podem ser vistos nas Tabela 6.7 e imagens da malha encontram-se nas figuras 6.17 e 6.18. Na figura 6.19 está o detalhe de uma região da malha após a simulação. No caso, a simulação é a de velocidade do fluido.

Tabela 6.7: Parâmetros da Malha 2

Estatísticas de malha	
Propriedades	Valor
Qualidade mínima de elementos	4.451E-5
Média de qualidades de elementos	0.1904
Elementos tetraedrais	5297
Elementos triangulares	3028
Elementos de ponto	716
Elementos Vertex	124
Tamanho máximo de elementos	762
Tamanho mínimo de elementos	160
Fator de curvatura	0.8
Resolução de regiões estreitas	0.3
Taxa de crescimento de elementos	1.7
Tamanho predefinido	grossa

**Figura 6.17:** Malha 2 no tanque de etileno

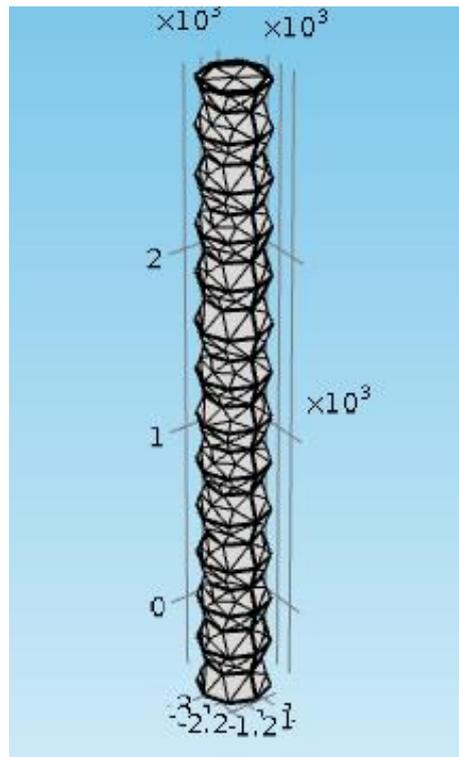


Figura 6.18: Malha 2 no corpo da bomba vertical – 13 *bowls*

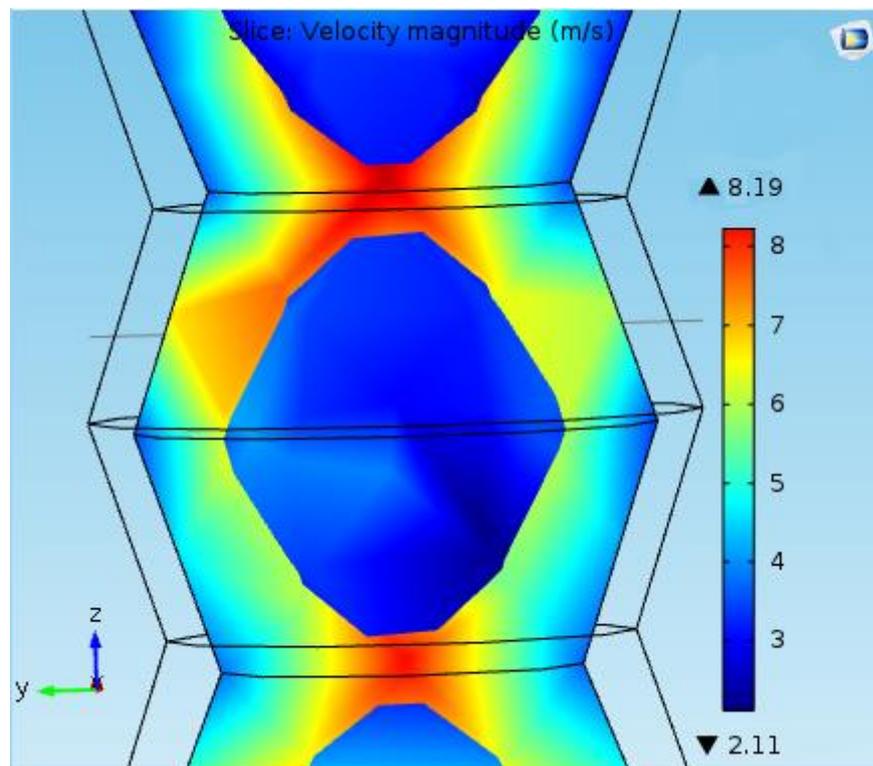


Figura 6.19: Região da malha 1 e resultados após a simulação de velocidade (m/s).

c- Malha 3 (normal):

Malha considerada ideal para a geometria. Parâmetros das análises e da malha podem ser vistos nas Tabela 6.8 e imagens da malha encontram-se nas figuras 6.20 e 6.21. Na figura 6.22 está o detalhe de uma região da malha após a simulação. No caso, a simulação é a de velocidade do fluido.

Tabela 6.8: Parâmetros da Malha 3

Estatísticas da malha 1	
Propriedades	Valores
Propriedades	2.525E-4
Qualidade mínima de elementos	0.3168
Média de qualidades de elementos	11964
Elementos tetraedrais	6244
Elementos triangulares	1144
Elementos de ponto	124
Elementos Vertex	601
Tamanho máximo de elementos	112
Tamanho mínimo de elementos	0.7
Fator de curvatura	0.4
Resolução de regiões estreitas	1.6
Taxa de crescimento de elementos	Normal

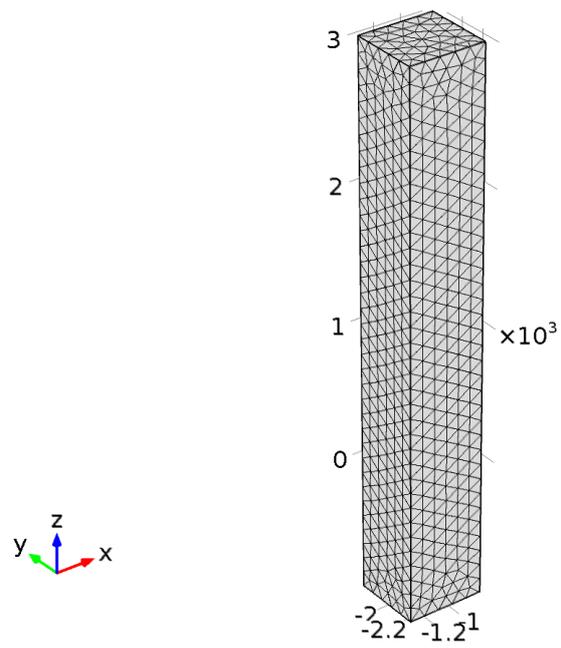


Figura 6.20: Malha 3 na região do tanque

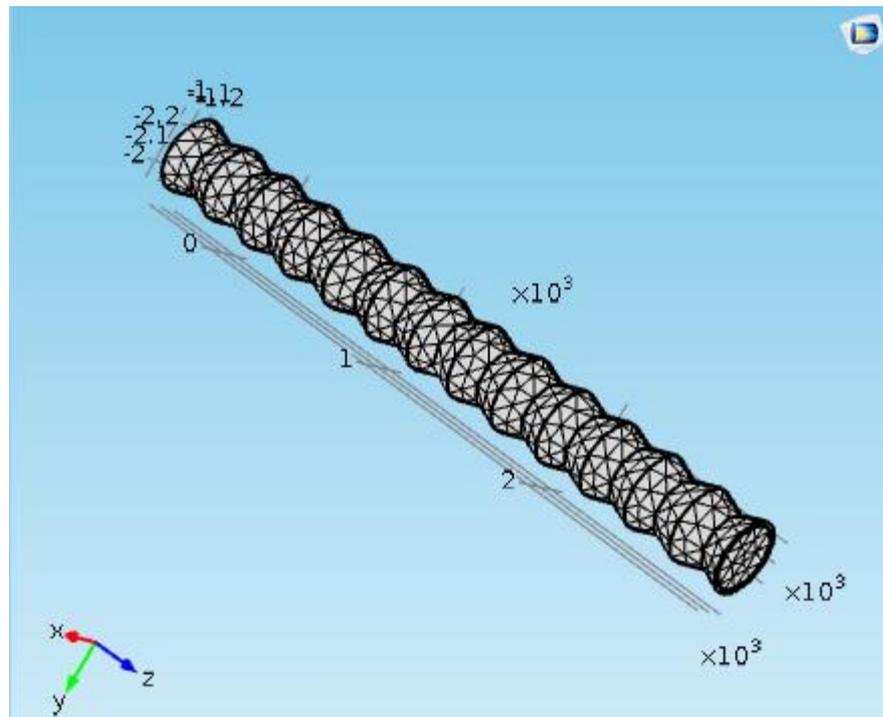


Figura 6.21: Malha 3 na região do corpo da bomba

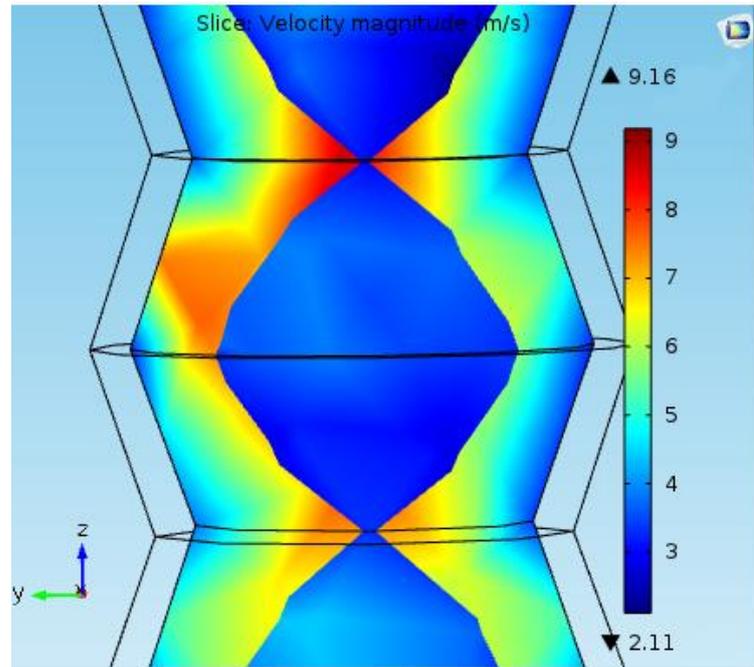


Figura 6.22: Região da malha 3 após a simulação de velocidade (m/s)

d- Malha 4 (Melhor):

Malha mais refinada. Parâmetros das análises podem ser vistos nas Tabela 6.9 e imagens da malha encontram-se nas figuras 6.23 e 6.24. Na figura 6.25 está o detalhe de uma região da malha após a simulação. No caso, a simulação é a de velocidade do fluido.

Tabela 6.9: Parâmetros da malha 4.

Estatísticas de malha	
Propriedades	Valor
Qualidade mínima de elementos	0.06302
Média da qualidade de elementos	0.5091
Elementos tetraedrais	19370
Elementos triangulares	9895
Elementos de ponto	2573
Elementos Vertex	124
Tamanho máximo de elementos	321
Tamanho mínimo de elementos	40.1
Fator de curvatura	0.5
Resolução de regiões estreitas	0.6
Taxa de crescimento de elementos	1.45
Tamanho predefinido	Melhor (fina)

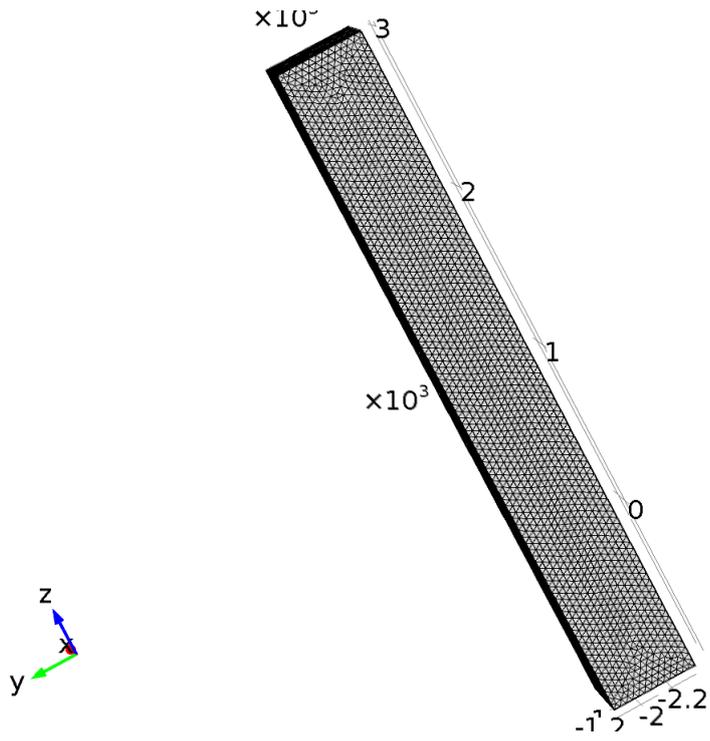


Figura 6.23: Malha 4 na região do tanque.

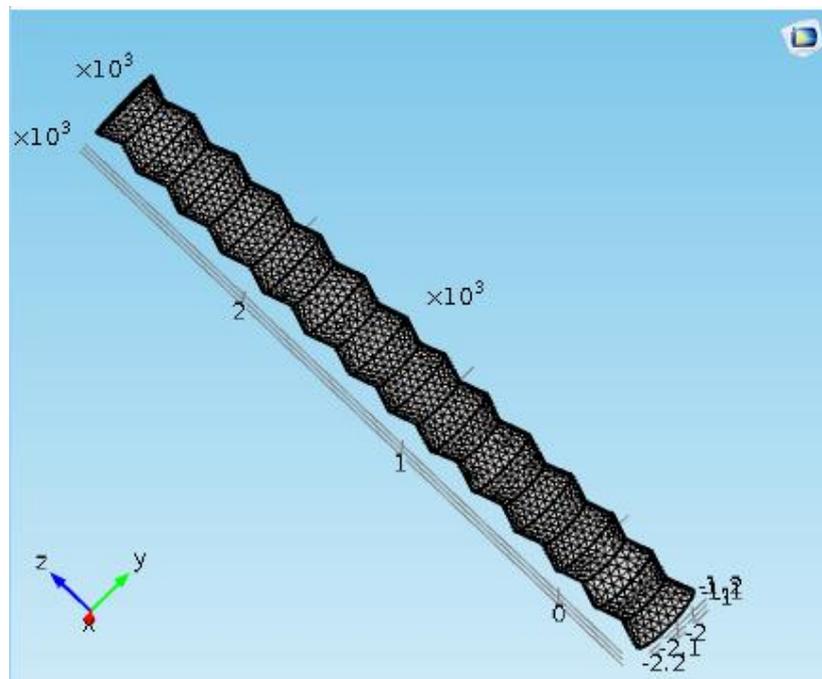


Figura 6.24: Malha 4 na região da bomba.

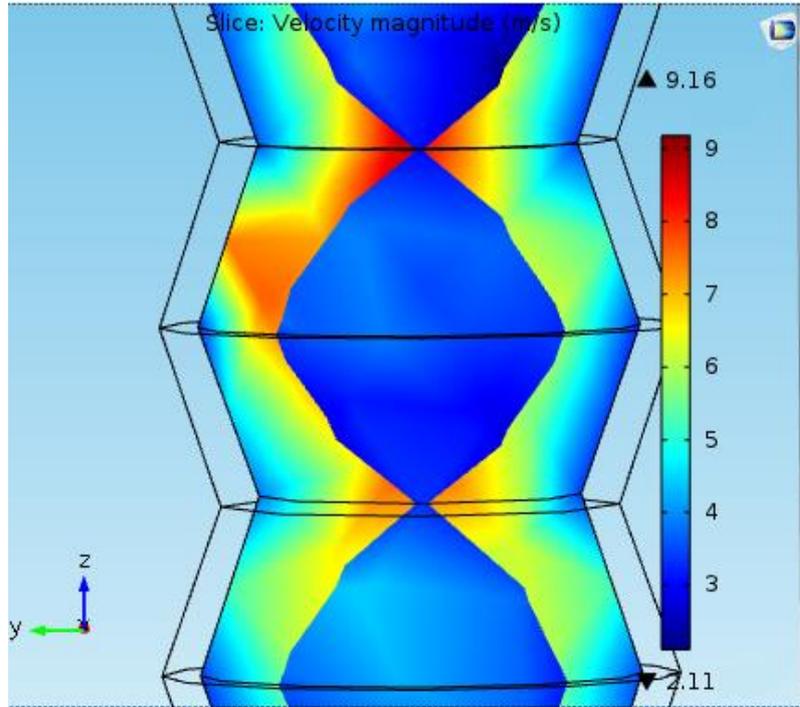


Figura 6.25: Região da Malha 4 após simulação de velocidade (m/s).

Os gráficos da figuras 6.26 (a) e 6.26 (b), tem como consideração a análise de convergência de malha e mostra o tamanho dos elementos em relação a análise de velocidade após a simulação.

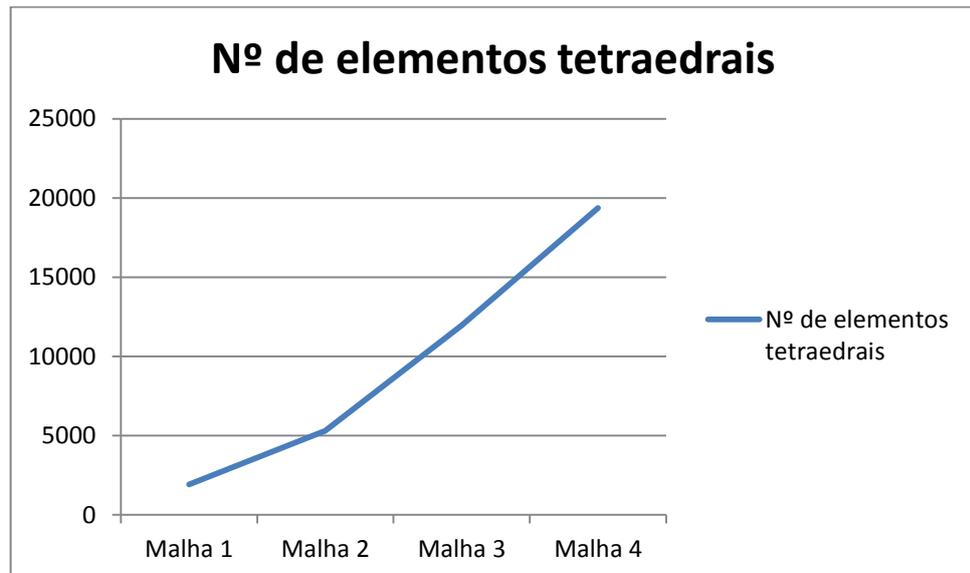


Figura 6.26 (a): Gráfico para o número de elementos em cada malha

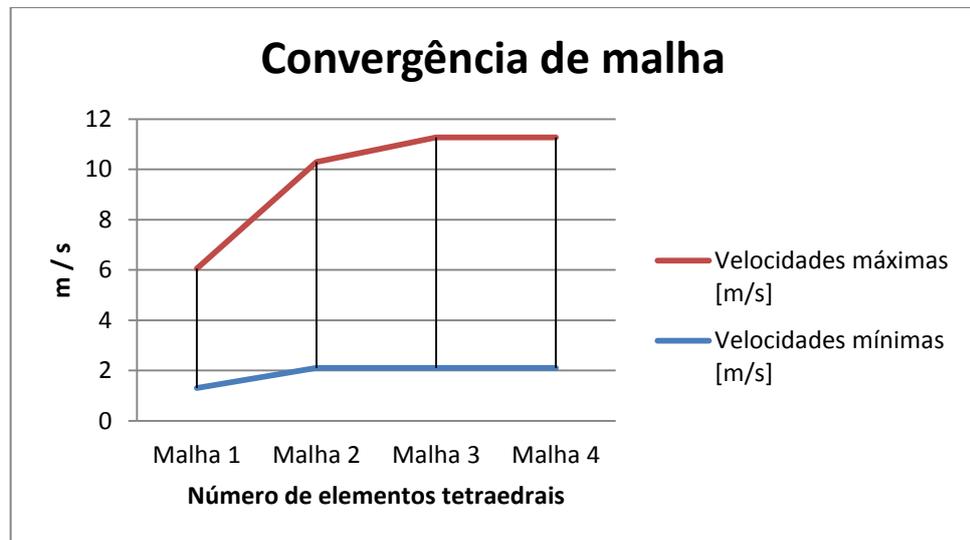


Figura 6.26 (b): Gráfico com a avaliação da convergência admitidas na simulação nas malhas 1,2, 3 e 4

Após análise gráfica, pode-se considerar que os modelos apresentam valores constantes e iguais de velocidades a partir da Malha 3, o que influi na condição de que a malha 3 com refinamento normal é a mais adequada ao estudo. Um maior refinamento, então, geraria valores muito parecidos ou idênticos com os da Malha 3 e exigiria maior quantidade de memória e de processamento utilizado pelo programa de elementos finitos.

6.2.3 Resultados

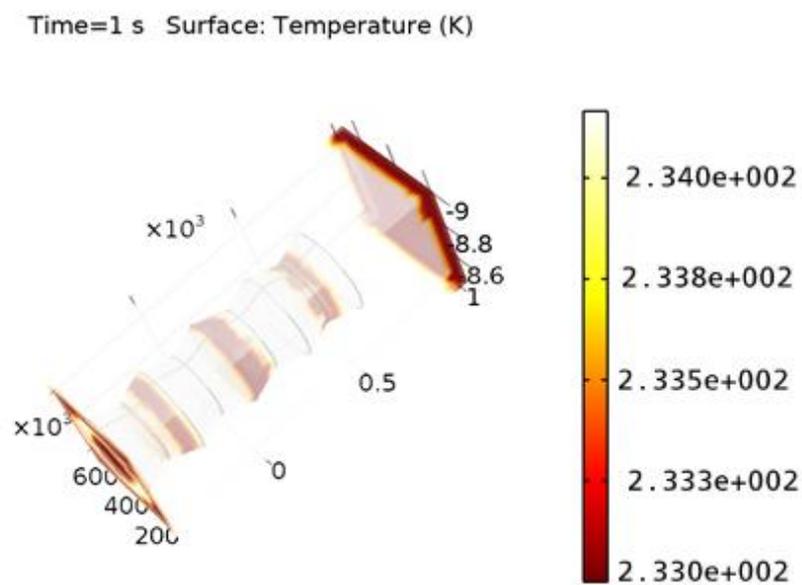
Para a computação dos Resultados houve a necessidade do cumprimento de requisitos sobre a memória utilizada e sobre a dependência do tempo que pode ser visto na tabela 6.19.

Tabela 6.10: Informações sobre tempo e unidades

Tempo	Unidade
Taxa (0,0.1,1)	s

6.2.3.1. Plotagens

A seguir, serão demonstradas todas as plotagens geradas pela simulação produzida pelo programa de elementos finitos. As análises de temperatura do fluido correspondem às figuras 6.27, 6.28, 6.29, 6.30 e 6.31. Já a análise de fluxo de calor nas paredes do corpo da bomba corresponde à figura 6.32.

**Figura 6.27:** Análise de temperatura 4 *bowls*.

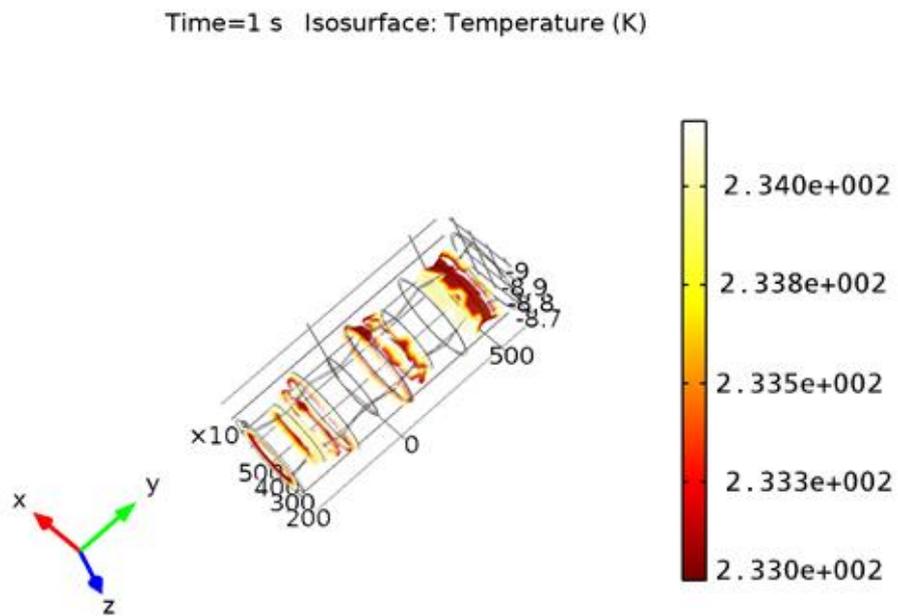


Figura 6.28: Contornos de temperatura 4 *bowls*.

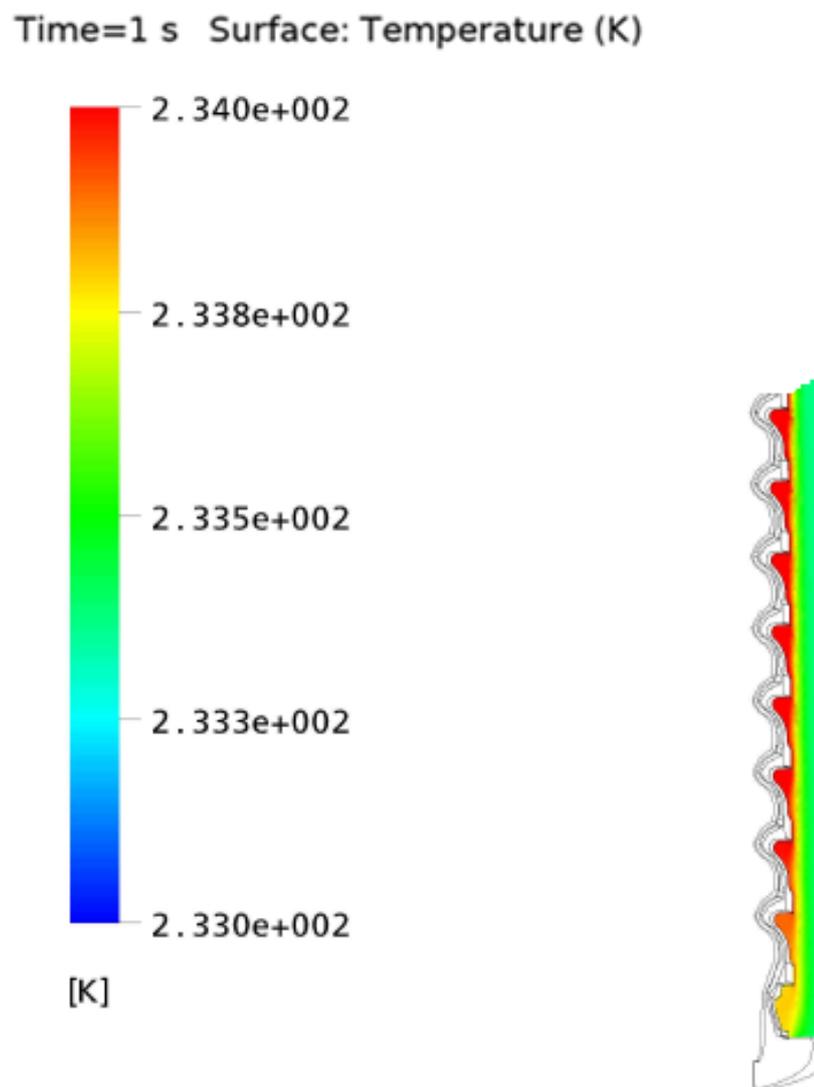


Figura 6.29: Análises de temperatura. Vista da seção transversal. Sução e os 8 *bowls* seguintes

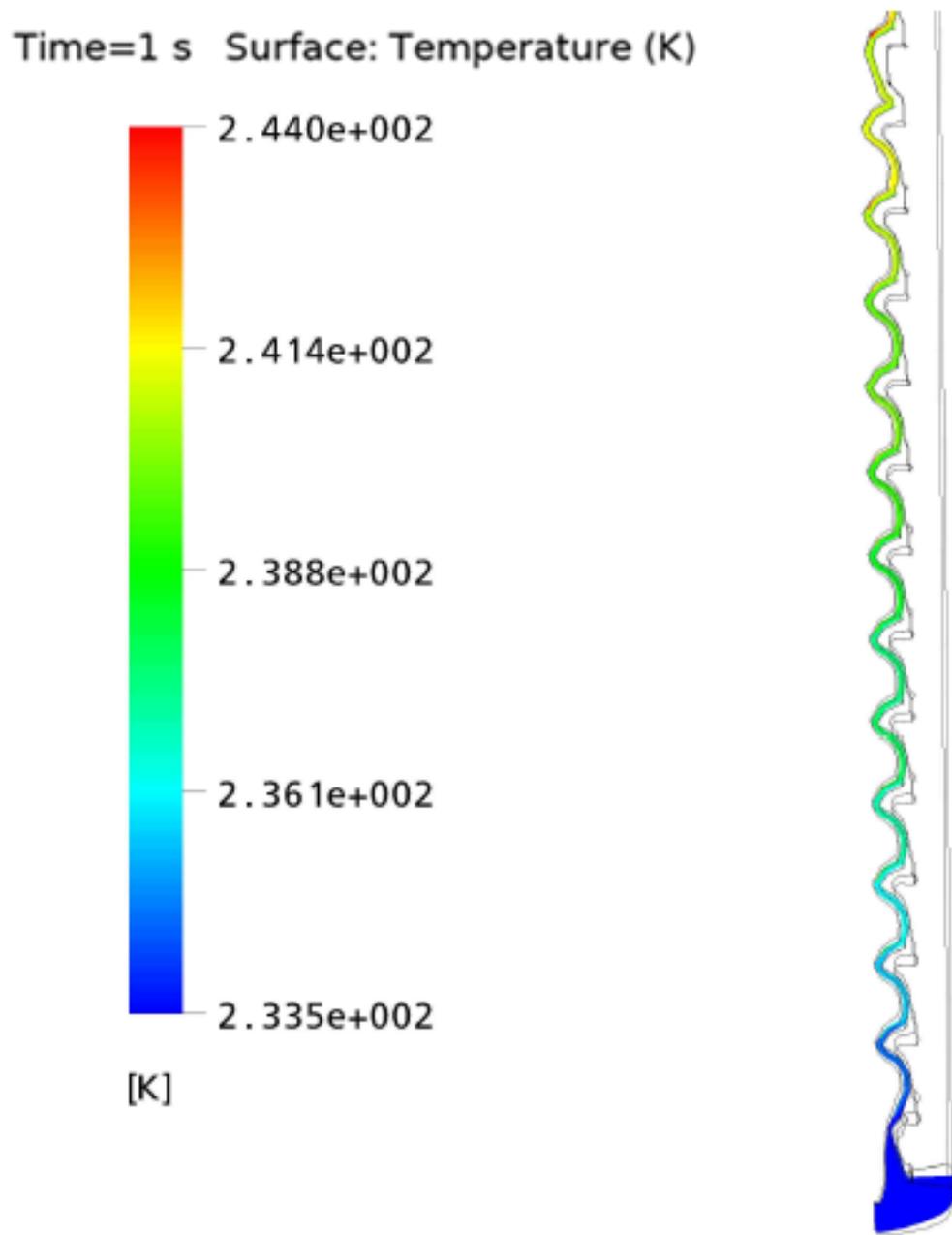


Figura 6.30: Análise de temperatura. 13 *bowls*.

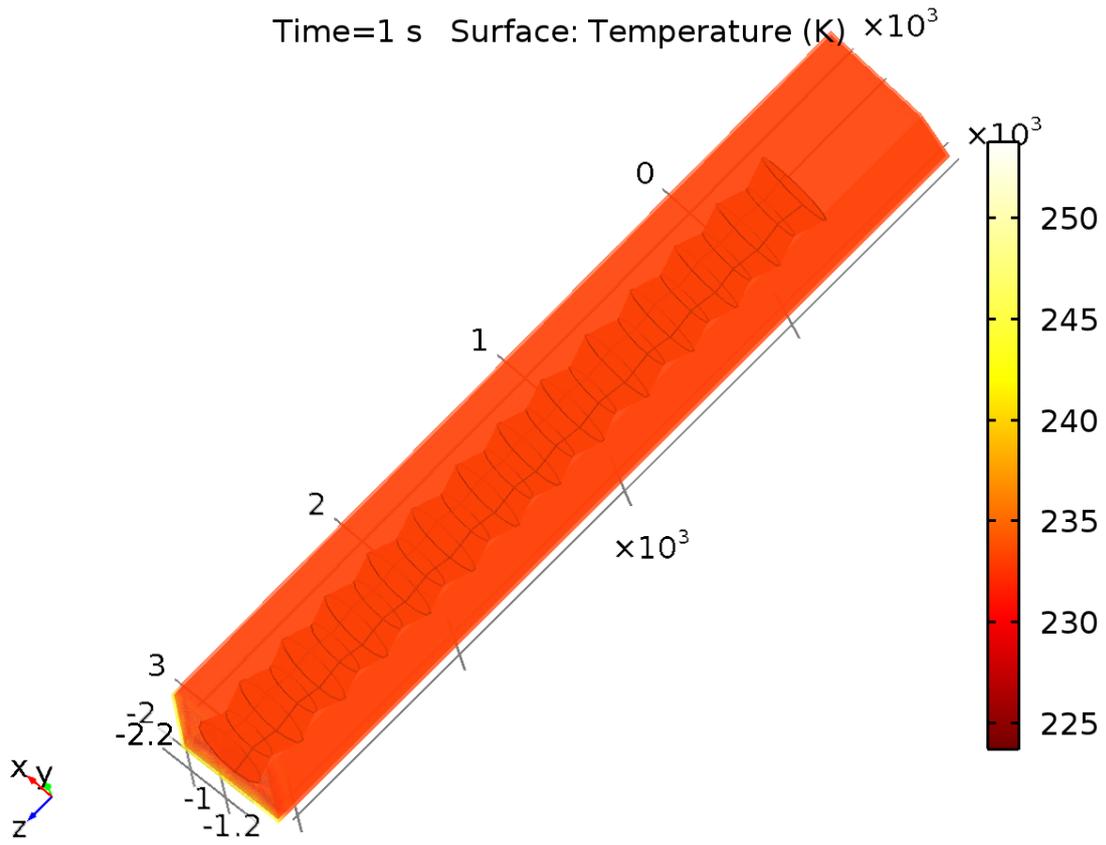


Figura 6.31: Temperatura no tanque. 13 *bowls*.

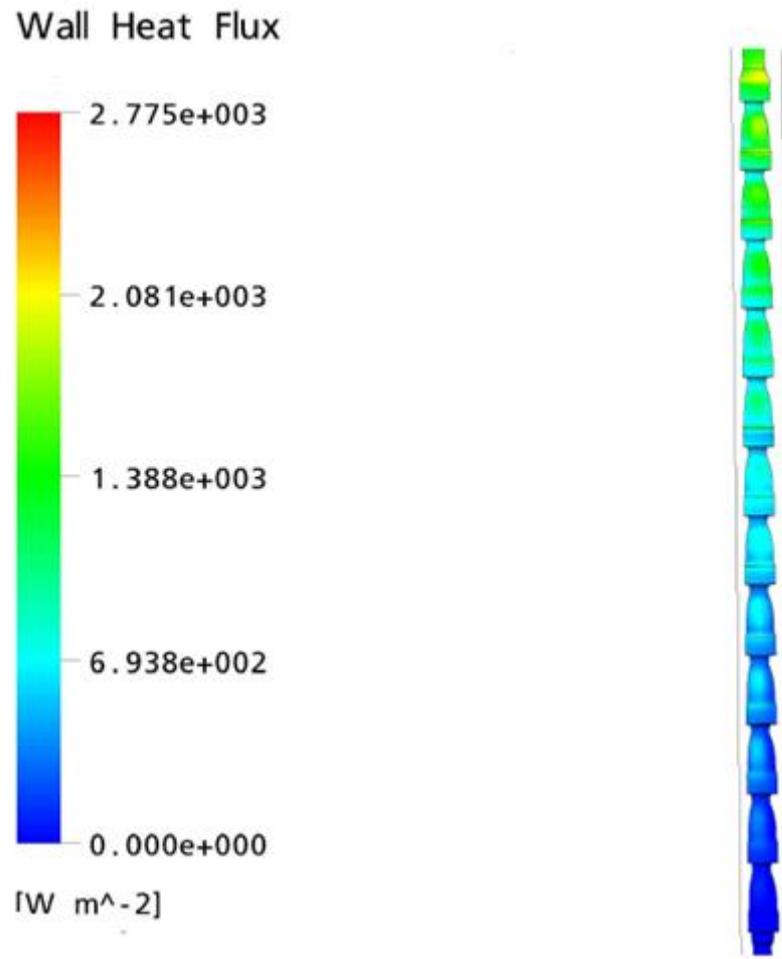


Figura 6.32: Análise de fluxo de calor nas paredes do corpo da bomba.

Dadas às análises de convergência de malha é possível identificar e mapear o aquecimento do fluido por dentro do corpo da bomba centrífuga. O gráfico na figura 6.33 exhibe o mapeamento das variações de temperatura encontradas nas análises com relação à ordem de estágios:

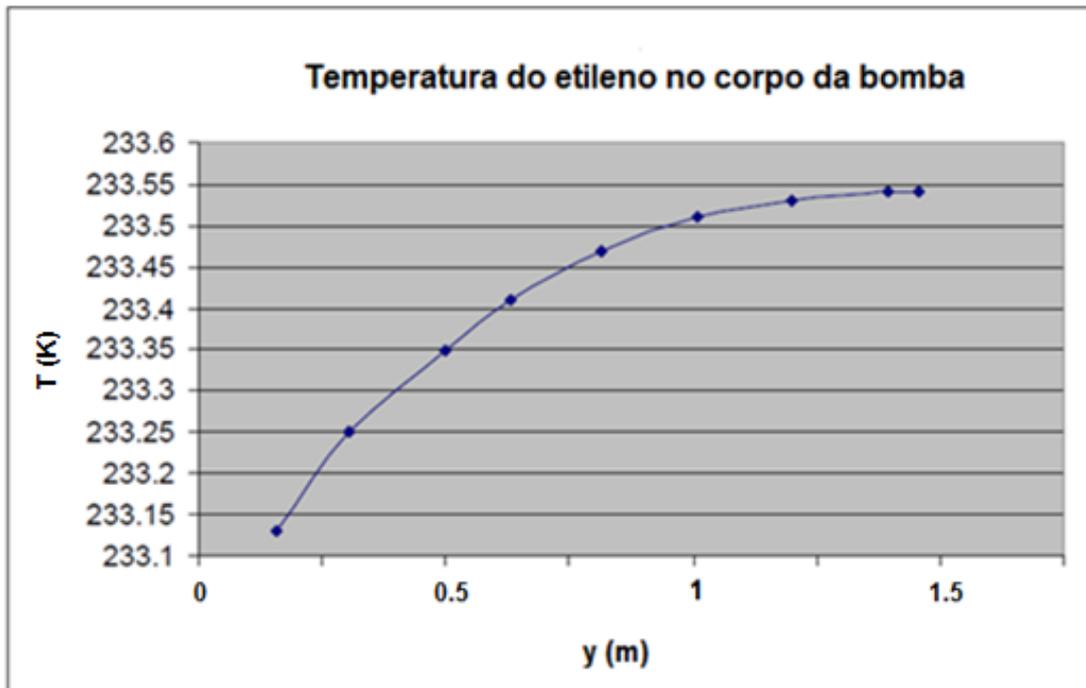


Figura 6.33: Gráfico de mapeamento da temperatura do fluido no interior da bomba. Região de Sucção.

Como principais resultados, obtém-se:

- A temperatura do etileno cresce em torno de 0.35K na sucção. Logo na entrada do fluido na bomba (primeiro *bowl*).

Isto provavelmente ocorre devido a transferência de calor maior na parede exterior do corpo de sucção por causa do aquecimento do etileno em razão de condições de seu armazenamento. Uma elevação de temperatura das condições ambientais do poço ou tanque pode ocasionar tal aquecimento do fluido.

- A diferença de temperaturas *inlet* para *outlet* é de 11K.

As bombas verticais de múltiplos estágios, em geral, funcionam como se fossem várias bombas trabalhando em sequência. Portanto, há um aumento da altura manométrica atingida pela bomba, o que ocasiona, por sua vez, o aumento de energia devido à passagem pelos estágios. Esta variação da energia transferida pode ser responsável por um aumento do gradiente de temperatura.

c. Entre os *bowls*, há regiões em que o etileno atinge temperaturas maiores que 234 K.

Esta observação é importante para notificar que há aumentos do gradiente de temperatura na região da passagem de um rotor para o outro. Isto provavelmente ocorre devido à variação de energia e pressão entre os estágios.

d. O fluido se choca nas paredes com seções menores com maior velocidade.

Este fato relaciona-se com a pressão do fluido em determinados pontos que o faz choca-se nas paredes da coluna com intensidade. Isto pode ocasionar problemas de desgastes do material destas regiões com o tempo.

e. Como é esperada, a velocidade também aumenta na seção de menor área no meio do *bowl*, imediatamente antes de ser succionadas pelo rotor do próximo estágio.

Isto ocorre devido a diferença de pressão entre os estágios. Esta diferença de pressão é pretendida nos projetos de bombas para que haja o aumento da altura manométrica atingida pelo fluido.

Capítulo 7

Conclusões e trabalhos futuros

7.1 Conclusões

Devido às análises expostas no presente estudo é possível identificar que realmente ocorre o aquecimento significativo do fluido no interior do corpo da bomba e alta velocidade do fluido conforme sua passagem entre os estágios. A diferença de temperaturas entre a sucção e o último estágio para o recalque é de 11K. O aquecimento na zona de sucção (4 primeiros *bowls*) é em torno de 0.53 K e, entre os *bowls*, há regiões em que o etileno atinge temperaturas maiores que 234 K. Também foi possível monitorar a velocidade do fluido no interior do corpo da bomba que chega a máxima de 9,16 m/s, uma velocidade muito alta provocada pela vazão de 80 m³/h.

Em razão das condições de operação da bomba, armazenamento no poço, condições ambientais e de propriedades do fluido, a temperatura no interior do corpo da máquina de fluxo pode aumentar intensamente em um caso de fluido com temperaturas mais elevadas de armazenamento. Desta forma é possível admitir até que se inicie vaporizações do fluido no interior da bomba e/ou até mesmo alterações de propriedades de materiais estruturais do corpo devido a possíveis transformações de fases.

Aumentos de temperatura provocada por irregularidades de armazenamento, condições ambientais ou problemas operacionais no transporte de fluidos por bombas centrífugas pode gerar desequilíbrios hidráulicos no interior da bomba. Uma vez que a bomba em questão neste trabalho e as máquinas na maioria dos casos reais devem estar operando com preenchimento total de sua capacidade. Problemas deste tipo causam sérios danos rotodinâmicos, como por exemplo, possível alteração na estrutura do corpo, provocando mal funcionamento de eixos e rotores devido ao desequilíbrio de forças internas e a geração de alterações no trabalho do motor.

A análise presente neste trabalho pode ser usada para mapear condições de temperatura e velocidade durante a passagem do fluido, advertindo para problemas operacionais e de armazenamento da máquina de fluxo bem como do fluido no tanque.

7.2 Trabalhos Futuros

Como abertura para trabalhos futuros, é recomendado o interesse por novas análises de temperatura e velocidade da passagem do fluido no corpo de diferentes tipos de máquinas de fluxo. Existem uma gama de tipos de bombas, verticais, horizontais, alternativas, múltiplos estágios, etc. Quando se fala em máquinas de fluxo também incluem-se as análises em turbinas de variados tipos também. A análise por elementos finitos é ideal, pois é possível modelar diferentes geometrias com propósitos variados.

Outra sugestão de grande importância é a avaliação experimental destas simulações. Ou seja, a análise real de uma bomba centrífuga vertical em trabalho no campo ou em laboratório de testes para qualificações, com a preparação de uma bomba com o uso de termopares e softwares de monitoramento gráfico das condições de temperatura e velocidades do fluido. Atualmente, este tipo de análise é muito usada em válvulas, contudo, em bombas, por serem superdimensionadas e possuírem projetos padronizados, não há extrema preocupação com este tipo de análise por parte da maioria das fabricantes. Os testes hidráulicos e operacionais se tornaram mais importantes. Contudo, neste trabalho foi possível demonstrar a importância de análises de transferência de calor no interior das bombas.

Mapeamentos de temperatura podem ajudar na identificação de problemas operacionais nos diversos tipos de processos em que haja a necessidade de atenções com aquecimentos ou resfriamentos.

Capítulo 8

8 Referências Bibliográficas

[1] FOX, Robert W, & MCDONALD, Alan T. & PRITCHARD, Philip J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 5ª ed., LTC Editora.

[2] R. Aris, **Vectors, Tensors and the Basic Equations of Fluid Mechanics**, Dover, Mineola, NY, 1989.

[3] R. B. Bird, W. E. Stewart, & E. N. Lightfoot, **Transport Phenomena**, John Wiley and Sons, New York, NY, 2nd edition, 2002.

[4] MATTOS, Edson de, & FALCO, Reinaldo de, **Bombas industriais**, Rio de Janeiro, RJ, Interciência, 2º edição, 1998.

[5] MACINTYRE, Archibald Joseph. **Bombas e Instalações de Bombeamento**, Guanabara Dois, 1982.

[6] LOESER, Sérgio. **Metodologia de projeto estrutural de bombas de bombas centrífugas verticais de poço úmido**. São Paulo, 2011.

Referências na Internet:

[7] GASES. Gama Gases. SP. São Paulo, 2010. Disponível em: <http://www.gamases.com.br/etileno>

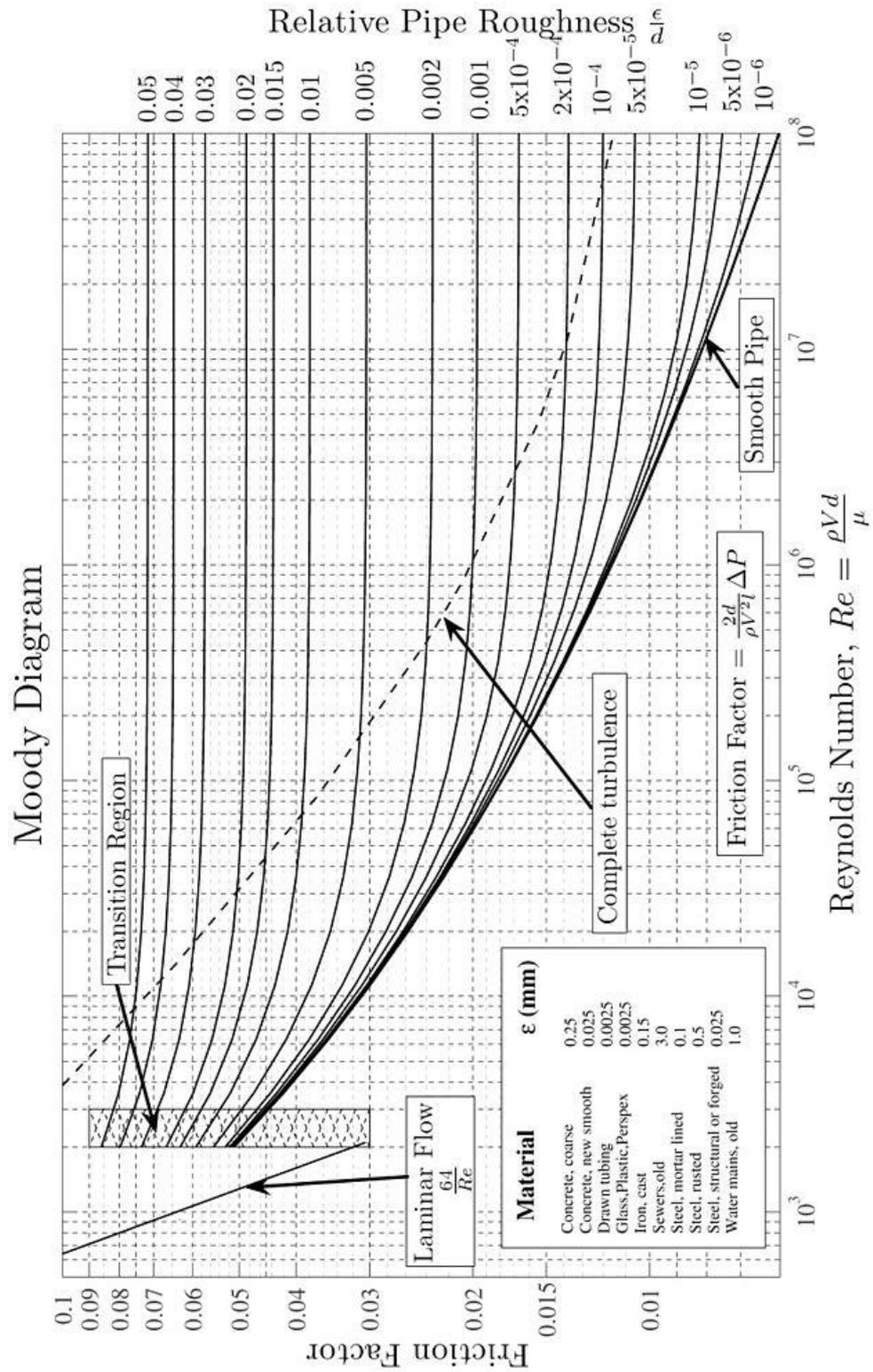
[8] FLOWSERVE PUMPS BRASIL. Bombas VS1 – modelos e propriedades. 2015. Disponível em: www.flowserve.com.br/vs1

[9] NEPTUNO PUMPS. Montagem de peças de bombas centrífugas verticais tipo VS1. 2015. Disponível em: www.youtube.com.br/neptunopumps/vs1

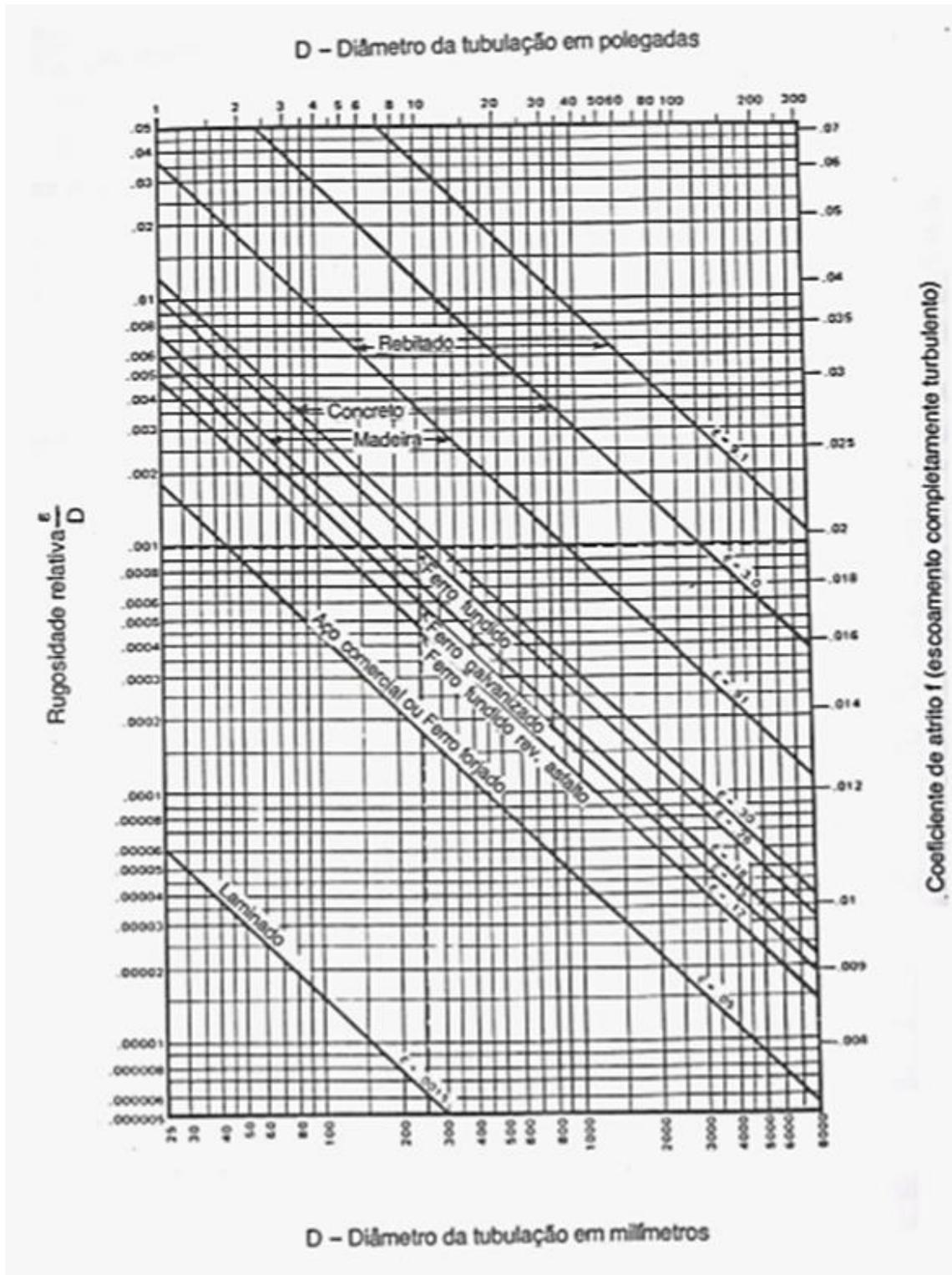
[10] COMSOL. Heat Transfer Module. Comsol version 5.1. 2015. www.comsol.com.br/comsol5.1/heattransfermodule

ANEXOS

ANEXO 1: Ábaco de *Moody* [1] – Versão original em Inglês



ANEXO 2: Rugosidade relativa e coeficiente de atrito para escoamento completamente turbulento [1].



ANEXO 3: Tabela simplificada de acidentes.

Comprimentos equivalentes a perdas localizadas. (Expressos em metros de canalização retilínea)*

DIÂMETRO D	Comprimentos equivalentes a perdas localizadas. (Expressos em metros de canalização retilínea)*																		
	COTOVELO 90° RAIO LONGO	COTOVELO 90° RAIO MÍDIO	COTOVELO 90° RAIO CURTO	COTOVELO 45°	CURVA 90° R/D - 1/2	CURVA 90° R/D - 1	CURVA 45°	ENTRADA NORMAL	ENTRADA DE BORDA	REGISTRO DE GAVETA ABERTO	REGISTRO DE GLOBO ABERTO	REGISTRO DE ÂNGULO ABERTO	TÉ PASSAGEM DIRETA	TÉ SAÍDA DE LADO	TÉ SAÍDA BILATERAL	VÁLVULA DE PE E CRIVO	SAÍDA DA CANALIZAÇÃO	VÁLVULA DE RETEÇÃO TIPO LEVE	VÁLVULA DE RETEÇÃO TIPO PESADO
mm	pol.																		
13	½	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6
19	¾	0,4	0,6	0,7	0,3	0,4	0,4	0,2	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
32	1¼	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0
38	1½	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4
63	2½	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7
100	4	2,1	2,8	3,4	1,3	1,3	1,6	0,7	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	6,4	12,9
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	5,0	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	6,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	7,5	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	7,5	20,0	32,0
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0

* Os valores indicados para registros de globo, aplicam-se também às torneiras, válvulas para chuveiros e válvulas de descarga.