



**FACULDADES
DOM BOSCO**

BRUNO DE ALMEIDA FREITAS

Estudo teórico para comparação de eficiência térmica de isoladores de temperatura em um sistema de geração de água quente

Resende - RJ
2022

**ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL DOM BOSCO
FACULDADE DE ENGENHARIA DE RESENDE**

Bruno de Almeida Freitas

Estudo teórico para comparação de eficiência térmica de isoladores de temperatura em um sistema de geração de água quente

Trabalho de Graduação apresentado à Associação Educacional Dom Bosco, Faculdade de Engenharia de Resende, Curso de Engenharia Mecânica, como requisito parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Mecânica

Resende - RJ
2022

Catalogação na fonte
Biblioteca Central da Associação Educacional Dom Bosco – Resende-RJ

F866	<p>Freitas, Bruno de Almeida</p> <p>Estudo teórico para comparação de eficiência térmica de isoladores de temperatura em um sistema de geração de água quente / Bruno de Almeida Freitas - 2022.</p> <p>60f.</p> <p>Orientador: Alexandre Roberto Soares</p> <p>Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à finalização do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Resende da Associação Educacional Dom Bosco.</p> <p>1. Engenharia. 2. Isolamento térmico. 3. Eficiência térmica. 4. Aquecimento de água. 5. Indústria. I. Soares, Alexandre Roberto. II. Faculdade de Engenharia de Resende. III. Associação Educacional Dom Bosco. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 66.045.3(043)</p>
------	---



BRUNO DE ALMEIDA FREITAS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. (a).: Eng° Me. ALEXANDRE ROBERTO SOARES
Orientador

Prof. (a).: Eng° Esp. DIEGO DA SILVA CARVALHO
Membro da Banca

Prof. (a).: Dr. NILSON RODRIGUES DA SILVA
Membro da Banca

Prof.(a).: Eng° Esp. DIOGENES DA SILVA OLIVEIRA
Coorientador

Novembro, 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos familiares por todo tempo dedicado e esforço para me manter no caminho correto durante toda jornada acadêmica. Em especial a Mariana e Diógenes que disponibilizaram seu tempo para me auxiliar em todo o tempo de realização do TCC.

Aos professores que em todos os momentos estiveram dispostos a contribuir com o melhor aprendizado.

Agradeço ao orientador que teve paciência e compreensão em me ajudar na construção do TCC.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo um estudo teórico em um sistema de isolamento térmico para o abastecimento de água quente de uma empresa no sul do estado do Rio de Janeiro. Através dos métodos de volume de controle, métodos matemáticos de iterações em quedas de temperatura, foi possível dimensionar a eficácia do sistema sem isolante térmico e com isolantes de poliuretano, lã de rocha e lã de vidro. A análise nos trouxe resultados expressivos, tais como: A aplicação do sistema de abastecimento sem isolante térmico seria inviável, devido a perda considerável de temperatura durante toda a tubulação. Concluiu-se que o sistema com ambos isolantes térmicos são eficientes, isso ocorre pelas características similares dos isolamentos, fazendo com que todos tenham uma queda de temperatura ser de aproximadamente de 1°C. Porém levando em consideração a relação entre custo x benefício, o isolamento de lã de vidro, apresenta custos melhores que os demais, sendo mais viável para uma instalação atualmente.

PALAVRAS-CHAVE: Isolamento. Temperatura. Abastecimento. Tubulação.

ABSTRACT

The present work has as its objective a theoretical study on a thermal insulation system for the hot water supply of a company in the south of Rio de Janeiro state. Through the control volume methods, mathematical methods of iterations in temperature drops, it was possible to size the effectiveness of the system without thermal insulator and with polyurethane, rock wool and glass wool insulators. The analysis brought us expressive results, such as: The application of the supply system without thermal insulator would be unfeasible, due to the considerable loss of temperature throughout the pipeline. It was concluded that the system with both thermal insulators is efficient, due to the similar characteristics of the insulations, causing all of them to have a temperature drop of approximately 1°C. However, taking into consideration the relationship between cost and benefit, the glass wool insulation presents better costs than the others, being more viable for a current installation.

KEYWORDS: Isolation. Temperature. Supply. Pipe

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Caldeira Tenge	14
Figura 2- Máquinas térmicas	15
Figura 3 – Máquinas térmicas, UFPR	16
Figura 4 - Máquinas térmicas UFPR	16
Figura 5 – Motor de indução	17
Figura 6 - Classificação das bombas	18
Figura 7 – Classificação das Bombas	19
Figura 8 - Termopar.....	21
Figura 9 – Indicar de processo.....	21
Figura 10 - Representação de um sistema de condução térmica	25
Figura 11 - Representação dos níveis de condutividade térmica.....	26
Figura 12- Representação do raio crítico.....	27
Figura 13 – Propriedade dos fluidos.....	32
Figura 14 - Temperatura vs Entalpia	32
Figura 15- Água saturada	34
Figura 16 - Água saturada	34
Figura 17 – Condutividade térmica	36
Figura 18 – Condutividade térmica	36
Figura 19 – Condutividade térmica	36
Figura 20- Temperatura de saída de processo	40
Figura 21 - Chegada água quente	40
Figura 22- Pressão na saída da bomba.....	41
Figura 23 - Espessura do isolante térmico.....	41
Figura 24- Tabela Aço.....	42
Figura 25 – Volume de controle	43
Figura 26 - Temperatura	44
Figura 27- Curva de temperatura.....	45
Figura 28 - Estrutura dos cálculos	46
29 – Poliuretano.....	53
Figura 30 - Lã de Vidro	53
Figura 31 - Lã de Rocha	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Queda de temperatura.....	51
Tabela 2 - Queda térmica por isolante.....	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Decaimento de Temperatura – Sem Isolante	47
Gráfico 2 – Decaimento de Temperatura - Poliuretano.....	48
Gráfico 3 – Decaimento de Temperatura – Lã de Vidro	49
Gráfico 4 – Decaimento de Temperatura – Lã de Rocha	50
Gráfico 5- Queda de Temperatura	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1.	Contextualização do tema e do problema	12
1.2.	Objetivos	12
1.2.1.	Objetivo geral	12
1.2.2.	Objetivos específicos	12
1.3.	Estrutura do trabalho	13
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1.	Revolução industrial	13
2.2.	Máquinas térmicas	13
2.2.1.	Central de utilidades	14
2.2.2.	Caldeiras	14
2.3.	Equipamentos industriais	17
2.3.1.	Motores de indução	17
2.3.2.	Bombas Centrífugas	17
2.4.	Normas de segurança	19
2.5.	Instrumentação	20
2.5.1.	Termopares	20
2.5.2.	Indicadores de processo	21
2.6.	Temperatura ambiente	22
2.7.	Sistemas termodinâmicos (equações diversas)	22
2.7.1.	Condutividade térmica	22
2.7.2.	Transferência de calor	22
2.7.3.	Condução	23
2.7.4.	Convecção térmica	23
2.7.5.	Radiação	24
2.7.6.	Condutividade térmica	25
2.7.7.	Determinação da condutividade térmica	26
2.7.7.1.	Conceito do raio crítico	27
2.7.8.	Sistemas radiais	27
2.7.9.	Coeficientes	28
2.7.9.1.	Número de Reynolds	28
2.7.9.2.	Número de Nusselt	29
2.7.9.3.	Equação de Darcy-Weisbach (Fator de Atrito)	30
2.7.9.4.	Número de Prandtl	30

2.7.9.5.	Numero de Rayleigh.....	30
2.8.	Ferramenta para cálculos termodinâmicos.....	31
2.9.	Características dos tubos e fluidos.....	33
2.9.1.	Tubulações	33
2.9.1.1.	Tubulações de aço carbono	33
2.9.1.2.	Características do aço.....	33
2.9.2.	Propriedades da água saturada	34
3.	ISOLANTES TÉRMICOS.....	35
3.1.	Materiais de natureza mineral.....	35
3.2.	Materiais de natureza sintética.....	35
3.3.	Materiais de origem vegetal e animal.....	35
3.4.	Tabela de condutividade térmica.....	36
4.	METODOLOGIA.....	37
5.	ESTUDO DE CASO.....	39
5.1.	Medições.....	39
5.2.	Cálculo de decaimento de temperatura sem isolante térmico.....	42
5.2.1.	Memorial de cálculo.....	45
5.2.2.	Decaimento de temperatura sem isolante térmico.....	47
5.2.3.	Decaimento de temperatura com isolantes térmicos	48
5.2.3.1.	Isolante 1: Poliuretano.....	48
5.2.3.2.	Isolante 2: Lã de Vidro.....	49
5.2.3.3.	Isolante 3: Lã de rocha	50
5.3.	Resultados e discussões.....	50
6.	CONCLUSÃO.....	55
7.	INDICAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E DO PROBLEMA

A perda de calor é um fenômeno ocorrido devido a perda de parte de um calor presente em determinado ambiente, corpo ou meio. Essa perda de calor é muito perceptível em estações do ano onde a temperatura é mais baixa. Convém mencionar, ainda, que esta perda de calor ocorre porque, fisicamente, há uma necessidade de os dois meios equilibrarem as suas temperaturas. Logo, o ambiente que apresenta maior quantidade de calor, passa, espontaneamente, parte dessa energia para outro meio, a fim de igualar as temperaturas. (ENERGY, 2022)

O presente estudo trata-se de perdas de calor em fluido aquecido transportado por tubulações. Para que haja diminuição da troca térmica entre o fluido e o meio ambiente, é necessário dimensionar todo o sistema e, através dos resultados, procurar melhores meios para diminuir a queda de temperatura do fluido durante toda a tubulação.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Apresentar um método de cálculos para comparações de isoladores térmicos em um sistema de geração de água quente industrial. Deste modo, comparar o isolante térmico atual com os demais oferecidos no mercado, apresentando qual isolante possui o melhor custo benefício para o sistema.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral apresentado, o projeto reúne os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o processo;
- Avaliar isolantes térmicos;
- Analisar a viabilidade e implementação técnica;
- Avaliar custos financeiros.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O atual estudo foi estruturado através de seções divididas em: Introdução, Fundamentação Teórica, Metodologia, Estudo de Caso, Resultados e Discussões e Conclusão. A parte introdutória foi relatado os problemas de pesquisa e os objetivos proposto, estruturação do trabalho, a referência teórica nos apresenta os conceitos e definição do trabalho, em sequência tem-se a metodologia de pesquisa, quarta seção apresenta-se o estudo de caso, penúltimo encontra-se os resultados obtidos através das análises e pôr fim a conclusão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Revolução industrial

A revolução industrial foi um marco muito importante na ascensão da indústria, promovendo grandes mudanças na economia mundial e também no estilo de vida de toda a humanidade.

No século 18, a invenção contínua deu origem a um método de produção em fábricas. Uma série de melhorias no processo de fabricação contribuiu para o limiar da revolução Industrial. Essa revolução mudou as capacidades de fabricação da Reino-Unida. Em geral, foi além do surgimento de novas máquinas e fábricas, um aumento da produtividade e dos níveis de renda. De fato, foi uma revolução que transformou a Inglaterra e o continente europeu de uma forma nunca antes vista, com profundos consequências para as relações sociais. Existem muitos fatores que afetam esse processo. incluindo o crescimento populacional e a migração da população das áreas rurais para as urbanas. Isso levou a um aumento dramático na força de trabalho existente e à exploração da burguesia emergente. Além disso, as inovações tecnológicas introduzidas pela revolução levaram à industrialização global. (MARX; ENGELS, 1998; HOBBSAWM, 2010).

2.2 Máquinas térmicas

Equipamentos industriais são ferramentas essenciais para a indústria. São utilizados na indústria em geral, para montar, receber ou movimentar produtos. São formados por componentes mecânicos, eletrônicos, computadorizados ou uma combinação de todos.

Os dispositivos industriais, tem as suas funções próprias e diferentes aplicações, tendo

como objetivo, todos foram criados para melhorar a qualidade dos produtos, padronizar e agilizar todo o processo de produção e aumentando o índice de segurança, nos dias atuais, os trabalhos pesados e repetitivos são realizados por esses equipamentos mecânicos. (KATALEC, 2021)

2.2.1 Central de utilidades

A central de utilidades é um local onde se armazena equipamentos de abastecimento de recursos energéticos para a produção, tais como, ar comprimido, eletricidade, água industrial, água gelada e, no caso do presente estudo, o fornecimento de água aquecida para a produção. O abastecimento é formado por seguintes equipamentos, caldeiras e bombas.

2.2.2 Caldeiras

As caldeiras são responsáveis por aquecer o fluido a temperatura desejada para o processo produtivo, utilizada como fonte combustível o gás natural. Elas operam com sensores que em, em tempo real, a temperatura que enviam o valor lido para o controlador da caldeira. Desta forma, a temperatura definida para a água é sempre mantida através de um controle eletrônico. Na Figura 1 pode ser visto exemplos de caldeiras.

Figura 1- Caldeira Tenge



Fonte: Autor (2022)

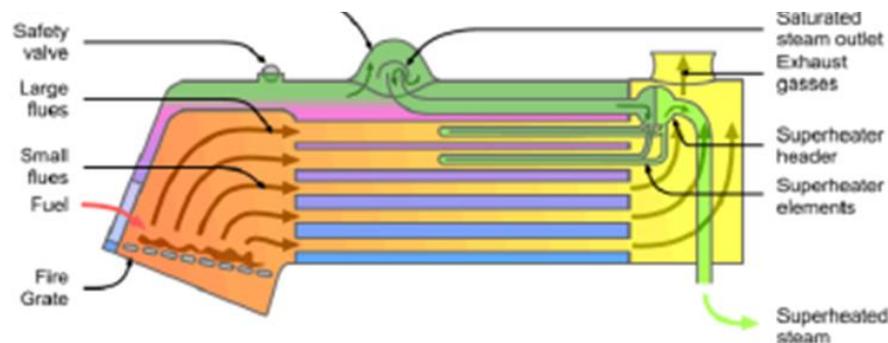
Os Geradores de Vapor (GV 's) podem ser avaliados como trocadores de temperatura complexos que fazem vapor d'água sob pressões acima da atmosférica a partir da energia de um combustível e de um componente oxidante (Atmosfera). Este dispositivo é comumente referido como uma caldeira. (ANDRADE, 2011).

O vapor é caracterizado pela água no estado gasoso, pode-se chegar a este período quando a temperatura da água é superior a 100°C, antes disso tem-se apenas água aquecida e funcionam

em 3 tipos, baixa pressão, onde o valor atribuído é de até 10kgf / cm², média pressão onde o valor é de 11 a 40kgf / cm² e alta pressão onde o trabalho é superior a 40kgf / cm². As caldeiras possuem algumas fontes de calor, como, combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, elétricos. Se pode encontrar 3 tipos de caldeiras na indústria, são as flamotubulares, aquatubulares e mistas. A localização dos dutos dentro da caldeira pode ser vertical, horizontal e inclinada.

Relacionado as caldeiras flamotubulares os gases quentes que os gases circulam no interior da caldeira enquanto o fluido passa em volta da tubulação aquecida, ela é caracterizada por não produzir uma quantidade muito grande de vapor, porém de fácil montagem e geralmente utilizada em baixas pressões, conforme apresentado na Figura 2. (ANDRADE, 2011)

Figura 2- Máquinas térmicas



Fonte: Andrade (2011)

As caldeiras Aquatubulares são caracterizadas pelo fato de que a água circula entre os dutos e os gases de exaustão aquecidos fora dos dutos. Este tipo de autoclave é muito utilizado em usinas termelétricas devido à sua alta capacidade de vapor. Faixa de temperatura até 450°C e alta pressão.

Uma das características que possui é que é fácil de limpar quando se trata de manutenção, mas apresenta algumas desvantagens como o alto custo em relação aos tubos de fumaça, o tipo de construção intrincada e o tratamento da água que circulará no seu interior deve-se ter muito cuidado.

A circulação da água na caldeira ocorre devido à diferença de densidade, que é causado pelo aquecimento da água e evaporação que é o fluxo natural. A má circulação pode causar superaquecimento localizado, resultando em ruptura do tubo. Algumas caldeiras de circulação positiva podem ter bombas externas para forçar a circulação de água ou vapor dependendo da vazão necessária, ou seja, demanda de vapor, independentemente da circulação natural, ou seja, diferença de densidade. Como apresentado na Figura 3 (ANDRADE, 2011).

2.3 Equipamentos industriais

2.3.1 Motores de indução

Um motor assíncrono trifásico consiste em doze componentes conforme pode ser visto na Figura 5.

Dentre eles, os três principais são:

1 - Carcaça: A estrutura de sustentação do motor geralmente feita de alumínio ou ferro fundido, embora outros materiais também sejam encontrados nesta aplicação.

2 - Estator: Na maioria dos motores elétricos, o estator é feito de aço magnético de alta permeabilidade para maximizar as forças magnéticas associadas à interação eletromecânica. É um dos principais componentes do motor elétrico e é responsável pela geração do campo magnético rotativo.

3 - Rotor: Existem dois tipos principais de rotores em um motor de indução. A bobina ou bobina é projetada para se parecer com um estator. Ele é nutrido através de um anel deslizante montado em um eixo. Outro tipo de rotor para motores de indução é a gaiola de esquilo, assim chamada pela existência no interior de barras longitudinais e paralelas curto-circuitadas por dois anéis condutores nas extremidades. (CRUZ; BERWANGER, 2015)

Figura 5 – Motor de indução



Fonte: (Cruz; Berwanger, 2015)

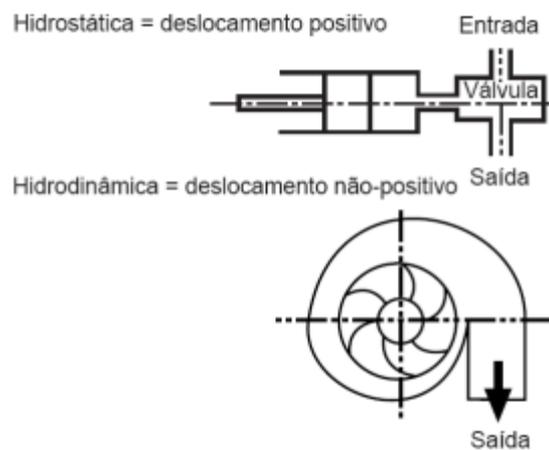
2.3.2 Bombas centrífugas

Uma bomba é um gerador. que se destina a mover líquidos na corrente. Porque é um gerador que transmuda o trabalho mecânico recebido do trabalho em energia. que é transferido para o líquido na forma de pressão e energia cinética. Alguns autores as chamam de máquinas-

ferramentas hidráulicas porque realizam certas tarefas úteis substituindo fluidos. O funcionamento principal das bombas se trata da conversão de energia mecânica em hidráulica, após a ação mecânica é criado parcialmente um vácuo em sua entrada, fazendo com que a pressão da atmosfera empurre o fluido até o local destinado. (BRASIL, 2010)

Pode-se também classificar as bombas em dois tipos de grupos, de deslocamento hidrodinâmico e hidrostático, como representado na Figura 6:

Figura 6 - Classificação das bombas



Fonte: Alex Brasil (2010)

Pode-se descrever as bombas como fluxo pulsante (positivas) e fluxo contínuo não positivas). Sobre as bombas hidrostáticas se proveem uma certa quantidade de líquido a cada rotação ou ciclo. A movimentação do líquido ocorre diretamente pela ação do motor da bomba. Isso permite que o fluido se move como esta hélice (pistão, engrenagem, came, hélice). Isso é chamado de volumétrico porque o fluido então ocupa e libera espaços de um volume conhecido dentro da bomba, e o movimento geral desse fluido é na mesma direção das forças trazidas para ele, por isso é chamado de deslocamento positivo. As bombas de deslocamento são divididas em pistão ou alternativas (pistão, diafragma, diafragma) e rotativas (engrenagem, came, impulsor, parafuso, fuso, parafuso, extrusão de tubo). (BRASIL, 2010)

Já se tratando das bombas hidrodinâmicas ou turbobombas, se pode descrevê-la como bombas de deslocamento, onde o intuito principal é transferir fluidos tendo como resistência somente a criada pelo peso do fluido e também pelo atrito. Representado na Figura 7 (BRASIL, 2010).

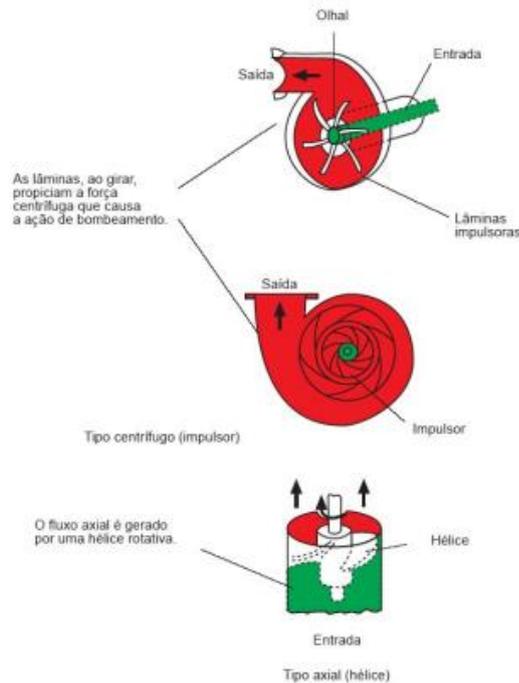


Figura 7 – Classificação das Bombas
Fonte: Brasil (2010)

Nas turbobombas, o movimento do fluido ocorre como resultado da ação de forças desenvolvidas em massas iguais como resultado da rotação dos eixos sobre os quais os discos (rotores, hélices) são aparelhados com impulsores (hélices, hélices) em tandem, que recebem fluido através deles, centralizam e são expulsos pela periferia pela ação da força centrífuga. Daí o nome mais familiar (bomba centrífuga). Essas bombas raramente são colocadas em sistemas hidráulicos porque sua potência de deslocamento de fluido diminui quando a resistência aumenta e também porque sua porta de saída pode ficar completamente bloqueada em operação completa da bomba. (BRASIL, 2010)

2.4 Normas de segurança

2.4.1 Norma Regulamentadora 13

A NR (Norma Regulamentadora) proporciona aos seus colaboradores um ambiente de trabalho saudável e seguro. Isso porque o negócio estabelece procedimentos padronizados para a segurança e bem-estar de seus colaboradores de acordo com as regras para evitar acidentes com colaboradores.

O Empregador tem a necessidade de cuidar da saúde e segurança de todos os funcionários enquanto trabalham, sempre respeitando as normas de segurança.

Em uma indústria, para a realização de atividade com pressões é necessário com que o colaborador receba treinamentos de NR13 onde diz que “NR estabelece requisitos mínimos para gestão da integridade estrutural de caldeiras a vapor, vasos de pressão, suas tubulações de interligação e tanques metálicos de armazenamento nos aspectos relacionados à instalação, inspeção, operação e manutenção, visando à segurança e à saúde dos trabalhadores.” (GUIA TRABALHISTA, 2018)

2.4.2 Norma ASTM A 106

A norma ASTM A 106 é o padrão para dutos de aço carbono sem costura para serviço de alta temperatura. Essa norma é responsável por permitir a segurança dos funcionários quando necessário trabalhos com tubulações com fluidos de altas pressões, este tipo de duto é amplamente utilizado em refinarias, linhas de vapor, coletores de caldeiras operando em alta pressão e alta temperatura. É extremamente importante antes de operar ou implementar sistemas de tubulações de altas temperaturas o conhecimento dessa norma, evitando possíveis acidentes futuros. (OLIVEIRA, 2022)

2.5 Instrumentação

São ferramentas essenciais para a aplicação em registros, ajustes durante o processo e controle de produção, tem como objetivo melhorar o desempenho dos processos. São ferramentas utilizadas de forma direta ou não para medir e controlar dados de processo. (ALTUS, 2021)

Equipamentos de medição são fundamentais para que o processo flua sem alterações críticas e facilmente seja controlado através dos dados obtidos pelos instrumentos de medição.

2.5.1 Termopares

Os termopares são sensores de temperatura formados por dois fios metálicos de materiais diferentes unidos nas extremidades. Quando esta conexão é exposta a diferentes temperaturas, a força eletromotriz (f.e.m.) é gerada essa força eletromotriz. É uma função da diferença de temperatura entre as junções dos termopares, bem como o material a partir do qual eles são montados. Um dos pontos de conexão está em contato com a temperatura que se deseja mensurar. Esta é uma junta de calibre ou junta quente. A outra é interrompida por um contador e é chamada de junção de referência ou junção fria. Este circuito clássico de metrologia de

temperatura de termopar é mostrado na Figura 8. (NOVUS, 2022)

Figura 8 - Termopar



Fonte: Alex Brasil (2010)

2.5.2 Indicadores de processo

O indicador de temperatura é caracterizado como um dispositivo eletrônico capaz de interpretar os sinais elétrico de termopares, termo resistências e converter em unidade de temperatura.

Fabricado com contato elétrico simples ou duplo, o termômetro para transformador elétrico indica a temperatura da reação a gás do nitrogênio, usado também para indicar a temperatura do enrolamento dos transformadores elétricos. Sua aplicação é feita em transformadores elétricos, com a vantagem de apresentar alta performance e durabilidade, e pode apresentar escalas de 0 a 100°C, como apresentado na Figura 9. (WILLTEC,2022)

Figura 9 – Indicar de processo



Fonte: Willtec (2022)

2.6 Temperatura ambiente

A temperatura anual é estabelecida devido a inclinação da terra, o movimento de translação da terra em torno do sol leva 1 ano para ser concluído, esse movimento tem como reação as estações do ano. (FIOCRUZ, 2022)

Durante todo o ano, a temperatura na região do projeto varia entre 14°C a 32°C, dificilmente a temperatura chega a ser menor de 10°C ou superior a 36°C. Durante o mês mais frio do ano, a temperatura máxima atingida está na escala de 26°C e a mínima atingida é de 14°C, dessa forma, tem-se que a temperatura média da região é 20°C (WEATHER SPARK, 2022).

2.7 Sistemas termodinâmicos (equações diversas)

2.7.1 Condutividade térmica

Para a iniciação dos métodos de cálculo e aplicação do estudo, é necessário entender que a condutividade térmica é o termo principal para obter os resultados.

A condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico, conhecidas como propriedades térmicas, são as três propriedades físicas mais importantes de um material do ponto de vista de cálculos térmicos. Essas propriedades são observadas quando o calor é adicionado ou removido do material, e tornam-se importantes em qualquer projeto que precise funcionar em um ambiente térmico. (JÚNIOR, *et al.*, 2016)

2.7.2 Transferência de calor

A ciência da termodinâmica lida com a quantidade de calor transferida por um sistema que passa de um processo de equilíbrio para outro, independentemente da informação de tempo em que a transferência ocorre. A transferência de calor é um ramo da engenharia térmica que analisa a taxa de transferência de calor e distribuição de temperatura em um sistema, bem como a natureza da transferência (KAPUNO; RATHORE, 2011).

2.7.3 Condução

A condução de calor pode ser descrita como a transferência de energia de partículas com energia mais alta para partículas com energia mais baixa.

Em líquidos e gases, a condução é a colisão ou difusão das moléculas durante seu movimento aleatório. Nos sólidos é a combinação das vibrações das moléculas no arranjo periódico da substância e no transporte de energia pelos elétrons livres. (ÇENGEL, 2012).

Caracteriza-se o cálculo de condução através da Equação 1:

$$q = k * A * \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Onde os valores de:

q = Taxa de transferência de calor [W]

A = Área de transferência do calor [m^2] - normal à direção do fluxo de calor

ΔT = Diferença de temperatura [K]

k = Condutividade térmica do material [$W/m \cdot K$].

2.7.4 Convecção térmica

A convecção pode ser tratada como o movimento de massa passante de um espaço a outro. Pode ser caracterizada como forçada, quando os fluidos são forçados a fluir nas superfícies externas devido a um ventilador, uma bomba ou o vento. Definida, também, como convecção natural quando o movimento do fluido é causado pela densidade e pela variação de temperatura do fluido (ÇENGEL, 2012).

A fórmula que representa a transferência por convecção é representada pela Equação 2:

$$q = h * A * \Delta T \quad (2)$$

Onde:

q = Taxa de transferência de calor [W]

A = Área de transferência do calor [m^2] - normal à direção do fluxo de calor

ΔT = Diferença de temperatura [K]

h = Coeficiente convectivo [$W/m^2 \cdot K$]

2.7.5 Radiação

Quando se trata de radiação térmica, nada mais é do que a transferência de calor por radiação eletromagnética, como a luz do sol, sem a necessidade de que a matéria esteja presente no espaço entre os corpos. (ÇENGEL, 2012).

Além da térmica, a radiação pode se apresentar de diversas formas, como: eletromagnética, raio X, raios gama, micro-ondas, ondas de rádio e ondas de televisão, que não estão relacionadas com a temperatura (ÇENGEL, 2012).

Calcula-se a radiação para corpos reais através da Equação 3:

$$q = \varepsilon * \sigma * A * (T_s^4 - T_{sup}^4) \quad (3)$$

Sendo:

q = Taxa de transferência de calor [W]

ε = Emissividade

σ = Constante de Stefan-Boltzmann [$5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$]

A = Área de transferência do calor [m^2]

T_s = Temperatura do corpo [K]

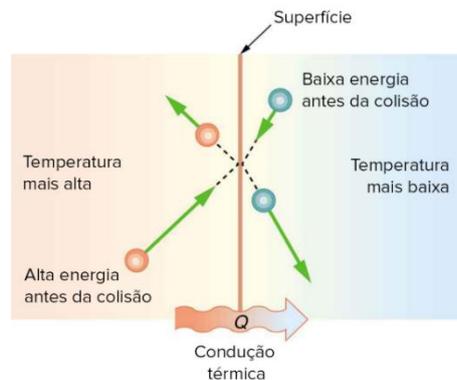
T_{sup} = Temperatura da superfície [K]

2.7.6 Condutividade térmica

Pode-se dizer que um alto valor para a condutividade térmica indica que o material é um bom condutor de calor, enquanto um baixo valor mostra que o material é um mau condutor ou um isolante (ÇENGEL, 2012).

Materiais sólidos possuem uma maior condutividade térmica se forem comparados a líquidos, esse fator ocorre devido a diferença existente em moléculas no seu estado físico, sendo alta comparado um sólido com um gás, conforme pode ser visto na Figura 10.

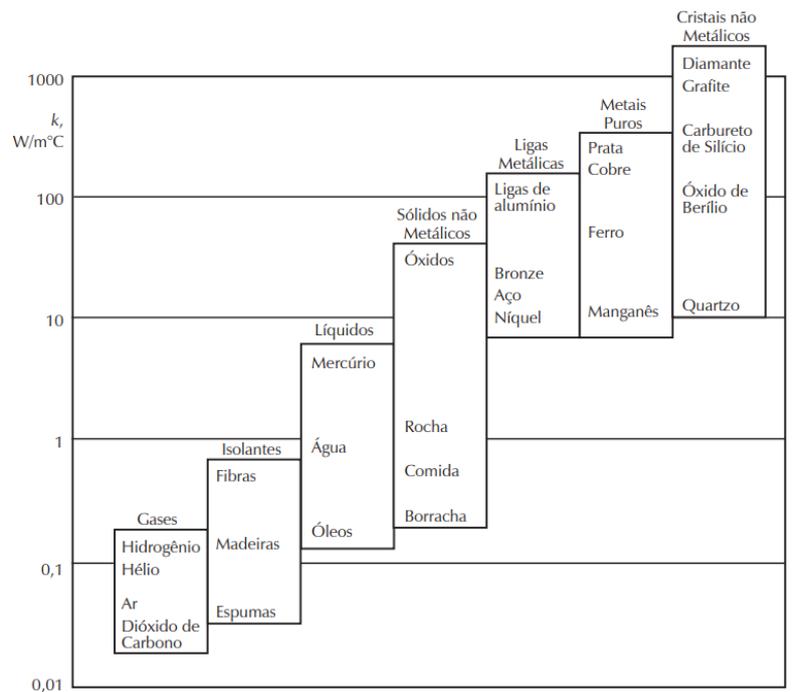
Figura 10 - Representação de um sistema de condução térmica
Fonte: Khan Academy (2022)



Pode-se dizer que um alto valor para a condutividade térmica indica que o material é um bom condutor de calor, enquanto um baixo valor mostra que o material é um mau condutor ou um isolante (ÇENGEL, 2012).

Materiais sólidos possuem uma maior condutividade térmica se for comparado a líquidos, esse fator ocorre devido a diferença existente em moléculas no seu estado físico, sendo alta comparado um sólido com um gás. Conforme mostrado na Figura 11 a seguir.

Figura 11 - Representação dos níveis de condutividade térmica



Fonte: Çengel, (2012)

Para os líquidos e os gases, o distanciamento entre as moléculas é superior, e o deslocamento delas é mais incerto para esses estados em relação ao estado sólido, conseqüentemente, o transporte de energia térmica é pouco eficaz. Com isso, a condutividade é também inferior (INCROPERA, 2008).

2.7.7 Determinação da condutividade térmica

Para determinar a condutividade térmica é necessário aplicar os conhecimentos sobre a lei de Fourier, pois sempre que existir uma diferença de temperatura entre um corpo do material, existirá uma transferência de calor da parte mais aquecida até o local mais frio. Sua representação matemática está representada abaixo na Equação 4:

$$k = - \frac{q}{A \cdot \Delta T} \quad (4)$$

Sendo:

q = taxa de transferência de calor [W]

A = área de transferência do calor [m²] - normal à direção do fluxo de calor

ΔT = diferença de temperatura [K]

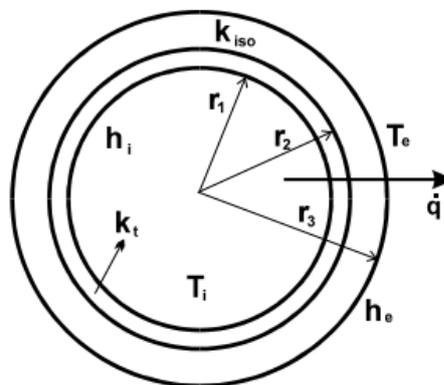
k = condutividade térmica do material [W/m · K]

O sinal negativo é utilizado para que o fluxo de calor natural seja positivo. De acordo com a segunda lei da termodinâmica, o calor sempre tem o fluxo na direção da menor temperatura, por isso a diferença de temperatura é negativa (KAPUNO; RATHORE, 2011).

2.7.7.1 Conceito do raio crítico

O aumento da espessura do isolamento de paredes cilíndricas de pequeno diâmetro nem sempre leva a uma diminuição da transferência de calor, podendo até aumentá-la. Entende-se a equação para o fluxo de calor através de uma parede cilíndrica de comprimento L, consistindo de uma parede de duto de metal e uma camada isolante, representado na Figura 12.

Figura 12- Representação do raio crítico



Fonte: Neto (2009)

Através do conceito de raio crítico é possível obter a Equação 5 representada abaixo que melhor representa o dimensionamento de um sistema com isolamento térmico. (NETO, C.)

$$q = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i * (2 * \pi * r_1 * L)} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{k_1 * 2 * \pi * L} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_2})}{k_{iso} * 2 * \pi * L} + \frac{1}{h_e * (2 * \pi * r_3 * L)}} \quad (5)$$

2.7.8 Sistemas radiais

Para sistemas onde compõe cilindros e esferas, a diferença de temperatura só existe na direção radial, avaliando dessa maneira como sistemas unidimensionais. Se é utilizado como base principal a lei de Fourier, representado na Equação 6. (INCROPERA,2008)

(6)

$$q_r = \frac{T_i - T_e}{R_{total}}$$

Onde:

q_r = Fluxo de calor radial [W]

T = Temperatura [K]

R_{total} = Somatório das resistências térmicas [K/W]

Transformando as fórmulas de convecção e condução para cálculos de circuitos em série de resistência térmica temos a Equação 7 para convecção e a Equação 8 para condução.

$$R_{tconv} = \frac{1}{(2 * \pi * r^2 * L) * h} \quad (7)$$

$$R_{tcond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * L * K} \quad (8)$$

Sendo:

$R_{T,COND}$ = Resistência térmica condução [K/W]

$R_{T,CONV}$ = Resistência térmica convecção [K/W]

L = Comprimento do tubo [m]

r = Raio do cilindro [m]

k = Condutividade térmica do material

[W/m · K] h = Coeficiente convectivo [W/m² · K]

2.7.9 Coeficientes

2.7.9.1 Número de Reynolds

Para determinar o fluxo de um fluido passante por sistema, algumas variáveis devem ser consideradas, tais como a rugosidade da superfície, geometria, velocidade do fluxo, temperatura da superfície e principalmente o tipo do fluido.

Dessa maneira, no ano de 1880, Osborn Reynolds foi responsável por descobrir que o sistema de fluxo, tem razão direta entre as forças de inercia e a viscosidade no fluido, essa razão

ficou conhecida então como número de Reynolds, apresentada pela Equação 9. (ÇENGEL, 2012)

$$\text{Re} = \text{Forças de} \frac{\text{inércia}}{\text{Forças viscosas}} = \frac{VLc}{\nu} = \frac{\rho VLc}{\mu} \quad (9)$$

Alguns escoamentos são lisos e ordenados, enquanto outros são bastante caóticos. O movimento de fluido altamente ordenado, caracterizado por camadas lisas de fluido, é chamado laminar. A palavra laminar vem do movimento de partículas de fluido adjacentes juntas em camadas “laminadas”. O escoamento de fluidos de alta viscosidade, como óleos em baixas velocidades, geralmente é laminar. O movimento altamente desordenado de fluidos, que normalmente ocorre em velocidades elevadas, caracterizado por flutuações de velocidade, é chamado turbulento. O escoamento de fluidos de baixa viscosidade, como o ar em velocidades elevadas, é tipicamente turbulento. O regime do escoamento influencia enormemente a potência necessária para o bombeamento. Um escoamento que alterna entre laminar e turbulento é chamado escoamento de transição. (ÇENGEL, 2012)

2.7.9.2 Número de Nusselt

É comum em estudos sobre convecção combinar variáveis e adicionar dimensão em equações, que para reduzir o número total de variáveis, elas são agrupadas por números adimensionais. Também é comum não usar o coeficiente de transferência de calor h usando o número de Nusselt, que é definido pela Equação 10. (ÇENGEL, 2012)

$$\text{Nu} = \frac{hLc}{k} \quad (10)$$

A variável k é a condutividade térmica do fluido e Lc é o comprimento característico. O número de Nusselt é assim chamado em homenagem a Wilhelm Nusselt (Equação 9), que trouxe contribuições importantes para a transferência de calor por convecção na primeira metade do século XX, e é visto como coeficiente adimensional de transferência de calor por convecção. (ÇENGEL, 2012)

2.7.9.3 Equação de darcy-weisbach (fator de atrito)

A equação de Darcy-Weisbach relaciona perda de carga ou pressão devido ao atrito do líquido em um sistema de tubulação em determinada velocidade média. Através da Equação 11 pode-se retirar se o sistema apresenta um regime turbulento ou laminar.

$$\frac{\Delta h}{L} = fD * \frac{1}{2g} * \frac{V^2}{D} \quad (11)$$

A avaliação da equação de Darcy-Weisbach fornece informações sobre os fatores que afetam a perda de carga em um oleoduto.

Considere que o comprimento do tubo ou canal é dobrado, a perda de carga de atrito resultante dobrará.

Em vazão constante e comprimento do tubo, a perda de carga é inversamente proporcional à quarta potência de diâmetro (para fluxo laminar) e, assim, reduzir o diâmetro do tubo pela metade aumenta a perda de carga em um fator de 16. Isso é um aumento muito significativo na perda de carga e mostra por que tubos de diâmetro maior levam a requisitos de energia de bombeamento muito menores.

Como a perda de carga é aproximadamente proporcional ao quadrado da vazão, então se a vazão for duplicada, a perda de carga aumentará em um fator de quatro.

A perda de carga é reduzida pela metade (para fluxo laminar) quando a viscosidade do fluido é reduzida pela metade. (Thermal Engineering,2022)

2.7.9.4 Número de Prandtl

O número de Prandtl é representado pela Equação 12, descrevendo os parâmetros adimensionais, pela espessura relativa das camadas térmicas e hidrodinâmicas.

$$Pr = \frac{\text{Difusividade molecular de quantidade de movimento}}{\text{difusividade molecular térmica}} = \frac{v}{\alpha} = \mu * \frac{cp}{k} \quad (12)$$

Ele é uma homenagem a Ludwig Prandtl, que introduziu o conceito da camada limite em 1904 e fez importantes contribuições para essa teoria. O número de Prandtl dos fluidos varia de menos de 0,01 para os metais líquidos até mais de 100.000 para óleos pesados. Note que o número de Prandtl é da ordem de 10 para a água.

O número de Prandtl para gases é cerca de 1, o que indica que tanto a quantidade de movimento quanto o calor dissipam-se através do fluido mais ou menos na mesma taxa. O calor se difunde muito rapidamente em metais líquidos ($Pr < 1$) e muito lentamente em óleos ($Pr > 1$) em relação à quantidade de movimento. Portanto, a camada limite térmica é muito mais espessa para metais líquidos e muito mais fina para óleos em relação à camada limite hidrodinâmica. (ÇENGEL, 2012)

2.7.9.5 Numero de Rayleigh

Não é possível dimensionar o número de Rayleigh, seu valor corresponde com a relação

entre o número de Grashof, utilizadas na descrição da transferência de calor por convecção natural (Ra) e convecção forçada (Gr), representada pela Equação 13.

O número de Rayleigh é simplesmente definido como o produto do número de Grashof, que descreve a relação entre fluidez e viscosidade dentro de um fluido, e o número de Prandtl, que descreve a relação entre difusividade de momento e difusividade térmica. O número de Grashof é definido como a razão entre a força flutuante e a viscosa que atua sobre um fluido na camada limite de velocidade. Seu papel na convecção natural é o mesmo que o número de Reynolds na convecção forçada. A convecção natural ocorre se esse movimento e mistura são causados por variações de densidade resultantes de diferenças de temperatura no fluido. Normalmente, a densidade diminui devido a um aumento de temperatura e faz com que o fluido suba. Este movimento é causado pela força flutuante. A força principal que resiste ao movimento é a força viscosa. O número de Grashof é uma maneira de quantificar as forças opostas. (Thermal Engineering,2022)

$$Ra = Gr * Pr = \left(\frac{g * \beta * (t_p - t_\infty) * D^3}{\nu^2} + Pr \right) \quad (13)$$

2.8 Ferramenta para cálculos termodinâmicos

Em se tratar de mecânica dos fluidos, transferências de calor e massa, é muito importante ter o conhecimento das propriedades dos fluidos, pois através dessas determinações é possível obter fluxos de calor, entre outros resultados.

Existem vários programas disponíveis para determinação das propriedades dos fluidos.

O Refprop é baseado em modelos precisos de líquidos puros e misturas atualmente disponíveis. Três modelos das propriedades termodinâmicas de líquidos puros foram usados: a equação de estado de energia clara de Helmholtz. Equação de Estado Benedict-Webb-Rubin revisada e o modelo de estado estendido correspondente (ECS).

Nos cálculos de mistura, é utilizado um modelo que aplica a regra de mistura às energias de Helmholtz dos componentes da mistura. A viscosidade e a condutividade térmica são modeladas por correlações específicas de fluido, por métodos ECS ou possivelmente por métodos de conjectura de atrito.

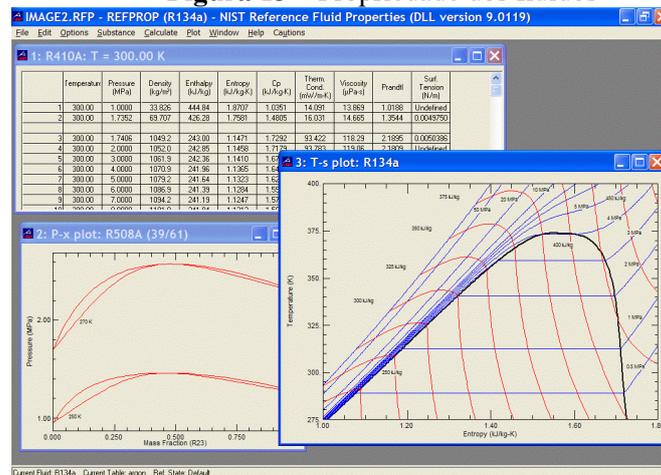
Os modelos de propriedade também podem ser acessados por outros aplicativos (por exemplo, planilhas) usando uma biblioteca de links dinâmicos (DLL).

REFPROP consiste em uma interface gráfica de usuário (GUI) e rotinas Fortran que realizam várias simulações das propriedades do fluido. A interface provê uma maneira

conveniente de calcular e exibir propriedades termodinâmicas e de transporte de líquidos puros e misturas. Os modelos de propriedade são escritos em Fortran e podem ser acessados a partir da GUI por meio de uma biblioteca de liame dinâmico (DLL). (REFPROP, 2013).

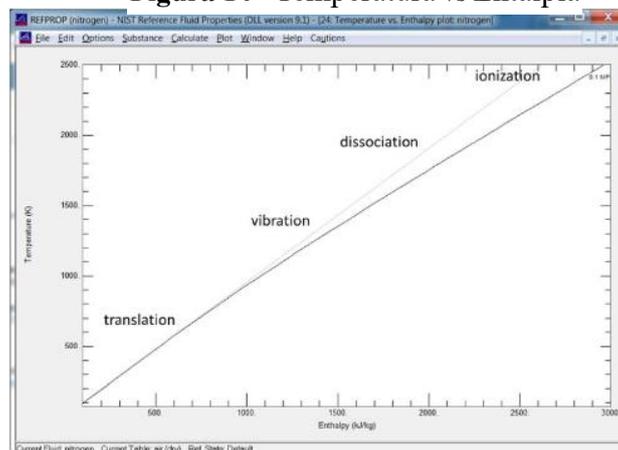
O sistema de funcionamento do Reprop, permite a emissão de uma variedade de tipos de gráficos referente a fluidos, como por exemplo sobre as propriedades dos fluidos e gráficos de entalpia e entropia representados nas Figuras 13 e Figura 14.

Figura 13 – Propriedade dos fluidos



Fonte: Refprop, 2013

Figura 14 - Temperatura vs Entalpia



Fonte: Refprop, 2013

2.9 Características dos tubos e fluidos

2.9.1 Tubulações

A tubulação industrial é um conjunto de tubos, válvula e conexões destinadas ao processo industrial, em especial à distribuição de gases, óleos, vapores, lubrificantes e líquidos industriais em geral. Os tubos e conexões industriais mais utilizados são constituídos de materiais ferrosos, como o tubo de aço carbono.

Os dutos industriais são amplamente usados no processo, indústrias químicas, petroquímicas, refinarias de petróleo, indústrias alimentícias e para transportar fluidos da bomba para o reservatório.

2.9.1.1 Tubulações de aço carbono

Tubulações de aço carbono são caracterizadas por possuírem muitas resistências mecânicas, fazendo com que seus sistemas aguentem bem mais pesos que os demais tipos de materiais, elas estão presentes em praticamente todo território, principalmente em projetos industriais. Mesmo com várias propriedades mecânicas presentes, os tubos de aço carbono possuem com forte características o seu peso, consideravelmente leve.

É possível encontrar hoje no mercado atual, vários tipos de tubulações de aço, tais como, tubos com e sem costura, quadrados, galvanizados, redondos, etc. (TUBOSABC, 2021)

2.9.1.2 Características do aço

Ao se tratar de aços, os mais comuns de serem utilizados são aços 1020 e 1045. O aço 1020 tem grandes vantagens relacionado a custos e também possui excelente tenacidade e soldabilidade. Com dureza máxima de 260 HB, sua temperabilidade é inferior a outros aços desta categoria. É comumente utilizado em engrenagens, tampas, pinos e eixos em geral.

Muitas vezes erroneamente associado ao aço 1045, suas principais diferenças são sua porcentagem de carbono, O aço 1045 tem uma porcentagem de cerca de 0,45% de carbono, e enquanto o aço 1020, apenas 0,2%. Outra característica que diferencia os aços, é que o aço 1020 não permite processamento e têmpera. (TRIMETAIS,2015)

2.9.2 Propriedades da água saturada

À medida que mais calor é transferido, a temperatura continua subindo até atingir 100 °C. Nesse ponto, a água ainda é um líquido, mas qualquer adição de calor fará com que o líquido se converta em vapor. Um processo de mudança de fase de líquido para vapor está para ocorrer. Um líquido que está pronto para se vaporizar é chamado de líquido saturado. (DÁRIO, 2022)

É possível determinar os valores referente aos fluidos saturados, como o presente trabalho o fluido principal é a água, através da Tabela A-9 de Çengel, representada nas Figura 15 e Figura 16.

Figura 15- Água saturada

TABELA A-9													
Propriedades da água saturada													
Temp. T, °C	Pressão de saturação P _{sat} , kPa	Densidade de ρ, kg/m ³		Entalpia de vaporização h _{fg} , kJ/kg	Calor específico c _p , J/kg · K		Condutividade térmica k, W/m · k		Viscosidade dinâmica μ, kg/m · s		Número de Prandtl Pr		Coeficiente de expansão volumétrica β, 1/K líquido
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0,01	0,6113	999,8	0,0048	2.501	4.217	1.854	0,561	0,0171	1,792 × 10 ⁻³	0,922 × 10 ⁻⁵	13,5	1,00	-0,068 × 10 ⁻³
5 0,	8721	999,9	0,0068	2.490	4.205	1.857	0,571	0,0173	1,519 × 10 ⁻³	0,934 × 10 ⁻⁵	11,2	1,00	0,015 × 10 ⁻³
10	1,2276	999,7	0,0094	2.478	4.194	1.862	0,580	0,0176	1,307 × 10 ⁻³	0,946 × 10 ⁻⁵	9,45	1,00	0,733 × 10 ⁻³
15	1,7051	999,1	0,0128	2.466	4.185	1.863	0,589	0,0179	1,138 × 10 ⁻³	0,959 × 10 ⁻⁵	8,09	1,00	0,138 × 10 ⁻³
20	2,339	998,0	0,0173	2.454	4.182	1.867	0,598	0,0182	1,002 × 10 ⁻³	0,973 × 10 ⁻⁵	7,01	1,00	0,195 × 10 ⁻³
25	3,169	997,0	0,0231	2.442	4.180	1.870	0,607	0,0186	0,891 × 10 ⁻³	0,987 × 10 ⁻⁵	6,14	1,00	0,247 × 10 ⁻³
30	4,246	996,0	0,0304	2.431	4.178	1.875	0,615	0,0189	0,798 × 10 ⁻³	1,001 × 10 ⁻⁵	5,42	1,00	0,294 × 10 ⁻³
35	5,628	994,0	0,0397	2.419	4.178	1.880	0,623	0,0192	0,720 × 10 ⁻³	1,016 × 10 ⁻⁵	4,83	1,00	0,337 × 10 ⁻³
40	7,384	992,1	0,0512	2.407	4.179	1.885	0,631	0,0196	0,653 × 10 ⁻³	1,031 × 10 ⁻⁵	4,32	1,00	0,377 × 10 ⁻³
45	9,593	990,1	0,0655	2.395	4.180	1.892	0,637	0,0200	0,596 × 10 ⁻³	1,046 × 10 ⁻⁵	3,91	1,00	0,415 × 10 ⁻³
50	12,35	988,1	0,0831	2.383	4.181	1.900	0,644	0,0204	0,547 × 10 ⁻³	1,062 × 10 ⁻⁵	3,55	1,00	0,451 × 10 ⁻³
55	15,76	985,2	0,1045	2.371	4.183	1.908	0,649	0,0208	0,504 × 10 ⁻³	1,077 × 10 ⁻⁵	3,25	1,00	0,484 × 10 ⁻³
60	19,94	983,3	0,1304	2.359	4.185	1.916	0,654	0,0212	0,467 × 10 ⁻³	1,093 × 10 ⁻⁵	2,99	1,00	0,517 × 10 ⁻³
65	25,03	980,4	0,1614	2.346	4.187	1.926	0,659	0,0216	0,433 × 10 ⁻³	1,110 × 10 ⁻⁵	2,75	1,00	0,548 × 10 ⁻³
70	31,19	977,5	0,1983	2.334	4.190	1.936	0,663	0,0221	0,404 × 10 ⁻³	1,126 × 10 ⁻⁵	2,55	1,00	0,578 × 10 ⁻³
75	38,58	974,7	0,2421	2.321	4.193	1.948	0,667	0,0225	0,378 × 10 ⁻³	1,142 × 10 ⁻⁵	2,38	1,00	0,607 × 10 ⁻³

Fonte: Çengel ,2012

Figura 16 - Água saturada

80	47,39	971,8	0,2935	2.309	4.197	1.962	0,670	0,0230	0,355 × 10 ⁻³	1,159 × 10 ⁻⁵	2,22	1,00	0,653 × 10 ⁻³
85	57,83	968,1	0,3536	2.296	4.201	1.977	0,673	0,0235	0,333 × 10 ⁻³	1,176 × 10 ⁻⁵	2,08	1,00	0,670 × 10 ⁻³
90	70,14	965,3	0,4235	2.283	4.206	1.993	0,675	0,0240	0,315 × 10 ⁻³	1,193 × 10 ⁻⁵	1,96	1,00	0,702 × 10 ⁻³
95	84,55	961,5	0,5045	2.270	4.212	2.010	0,677	0,0246	0,297 × 10 ⁻³	1,210 × 10 ⁻⁵	1,85	1,00	0,716 × 10 ⁻³
100	101,33	957,9	0,5978	2.257	4.217	2.029	0,679	0,0251	0,282 × 10 ⁻³	1,227 × 10 ⁻⁵	1,75	1,00	0,750 × 10 ⁻³
110	143,27	950,6	0,8263	2.230	4.229	2.071	0,682	0,0262	0,255 × 10 ⁻³	1,261 × 10 ⁻⁵	1,58	1,00	0,798 × 10 ⁻³
120	198,53	943,4	1,121	2.203	4.244	2.120	0,683	0,0275	0,232 × 10 ⁻³	1,296 × 10 ⁻⁵	1,44	1,00	0,858 × 10 ⁻³
130	270,1	934,6	1,496	2.174	4.263	2.177	0,684	0,0288	0,213 × 10 ⁻³	1,330 × 10 ⁻⁵	1,33	1,01	0,913 × 10 ⁻³
140	361,3	921,7	1,965	2.145	4.286	2.244	0,683	0,0301	0,197 × 10 ⁻³	1,365 × 10 ⁻⁵	1,24	1,02	0,970 × 10 ⁻³
150	475,8	916,6	2,546	2.114	4.311	2.314	0,682	0,0316	0,183 × 10 ⁻³	1,399 × 10 ⁻⁵	1,16	1,02	1,025 × 10 ⁻³
160	617,8	907,4	3,256	2.083	4.340	2.420	0,680	0,0331	0,170 × 10 ⁻³	1,434 × 10 ⁻⁵	1,09	1,05	1,145 × 10 ⁻³
170	791,7	897,7	4,119	2.050	4.370	2.490	0,677	0,0347	0,160 × 10 ⁻³	1,468 × 10 ⁻⁵	1,03	1,05	1,178 × 10 ⁻³
180	1.002,1	887,3	5,153	2.015	4.410	2.590	0,673	0,0364	0,150 × 10 ⁻³	1,502 × 10 ⁻⁵	0,983	1,07	1,210 × 10 ⁻³
190	1.254,4	876,4	6,388	1.979	4.460	2.710	0,669	0,0382	0,142 × 10 ⁻³	1,537 × 10 ⁻⁵	0,947	1,09	1,280 × 10 ⁻³
200	1.553,8	864,3	7,852	1.941	4.500	2.840	0,663	0,0401	0,134 × 10 ⁻³	1,571 × 10 ⁻⁵	0,910	1,11	1,350 × 10 ⁻³
220	2.318	840,3	11,60	1.859	4.610	3.110	0,650	0,0442	0,122 × 10 ⁻³	1,641 × 10 ⁻⁵	0,865	1,15	1,520 × 10 ⁻³
240	3.344	813,7	16,73	1.767	4.760	3.520	0,632	0,0487	0,111 × 10 ⁻³	1,712 × 10 ⁻⁵	0,836	1,24	1,720 × 10 ⁻³
260	4.688	783,7	23,69	1.663	4.970	4.070	0,609	0,0540	0,102 × 10 ⁻³	1,788 × 10 ⁻⁵	0,832	1,35	2,000 × 10 ⁻³
280	6.412	750,8	33,15	1.544	5.280	4.835	0,581	0,0605	0,094 × 10 ⁻³	1,870 × 10 ⁻⁵	0,854	1,49	2,380 × 10 ⁻³
300	8.581	713,8	46,15	1.405	5.750	5.980	0,548	0,0695	0,086 × 10 ⁻³	1,965 × 10 ⁻⁵	0,902	1,69	2,950 × 10 ⁻³
320	11.274	667,1	64,57	1.239	6.540	7.900	0,509	0,0836	0,078 × 10 ⁻³	2,084 × 10 ⁻⁵	1,00	1,97	
340	14.586	610,5	92,62	1.028	8.240	11.870	0,469	0,110	0,070 × 10 ⁻³	2,255 × 10 ⁻⁵	1,23	2,43	
360	18.651	528,3	144,0	720	14.690	25.800	0,427	0,178	0,060 × 10 ⁻³	2,571 × 10 ⁻⁵	2,06	3,73	

Fonte: Çengel ,2012

3.0 ISOLANTES TÉRMICOS

Um material isolante é utilizado para gerar resistências térmicas, com objetivo de reduzir a troca térmica entre temperaturas

Estes materiais são chamados de isolantes térmicos. Esta barreira criada para interromper a passagem de calor entre dois meios é capaz de manter uma temperatura média em determinado ambiente. O isolamento térmico é muito empregado no meio industrial e nas edificações, como residências e comércios. (Gold Energy,2022)

3.1 Materiais de natureza mineral

Materiais de natureza mineral são isolantes que possuem como base principal os materiais com natureza mineral, tais como areia, vidro, rocha vulcânica. São materiais compostos por lã de rocha, vidro celular, vermiculite, perlite, argila expandida. (SILVA, 2013)

3.2 Materiais de natureza sintética

Isolante sintéticos são materiais produzidos a partir de hidrocarbonetos, são materiais não recicláveis e renováveis, porém são extremamente eficientes quanto a impermeabilidade ao vapor, são isolamentos formados por poliestireno expandindo, poliestireno extrudido e poliuretano. (SILVA, 2013)

3.3 Materiais de origem vegetal e animal

Isolantes que compõem materiais de origem vegetal tem como principais características de fibras vegetais, enquanto os materiais que tem como base a origem animal, caracterizam por serem feitos através da penugem de animais. Esse processo de fabricação desses isolamentos térmicos, tem impactos ambientais muito menores do que os outros tipos de isolantes. (Silva,2013)

3.4 Tabela de condutividade térmica

Para realizar o proposto projeto, é necessário ter conhecimento de algumas variáveis e condução térmica dos tipos de aço e isolantes térmicos, apresentados respectivamente nas Figura 17, Figura 18 e 19.

Figura 17 – Condutividade térmica

Tabela de condutividade térmica de materiais de construção				
Grupo	Material	Massa específica (kg/m ³)	Condutividade térmica	
			Seco	Molhado
Metal	Alumínio	2.800	204	204
	Cobre	9.000	372	372
	Ligas	12.250	35	35
	Aço, ferro	7.800	52	52
	Zinco	7.200	110	110

Fonte: Botelho (2015)

Figura 18 – Condutividade térmica

Inorgânico	Cimento de asbesto	1.600 - 1.900	0,35 - 0,70	0,90 - 1,20
	Placa gipsita	800 - 1.400	0,23 - 0,45	
	Cartão gipsita	900	0,20	
	Vidro	2.500	0,80	0,80
	Lã de vidro	150	0,04	
	Lã de rocha	35 - 200	0,04	
	Telhas	2.000	1,20	1,20

Fonte: Botelho (2015)

Figura 19 – Condutividade térmica

Sintéticos	Poliéster	1.200	0,17	
	Polietileno, Polipropileno	930	0,17	
	Cloreto de polivinil	1.400	0,17	
Espuma sintética	Espuma de poliestireno, expandida (picossegundo)	10-40	0,035	
	Ditto, expulso	30-40	0,03	
	Espuma de poliuretano (PUR)	30 - 150	0,025 - 0,035	
	Espuma dura ácida do fenol	25 - 200	0,035	
	PVC - espuma	20 - 50	0,035	

Fonte: Botelho (2015)

4 METODOLOGIA

O objetivo deste presente estudo é utilizar a referência descritiva, que é uma pesquisa baseada em assuntos teóricos, ou seja, é aquela que se utiliza livros, artigos e trabalhos acadêmicos que já abordam o assunto decorrido.

A abordagem utilizada é a que tem como base a pesquisa quantitativa que é baseada em dados que procuram encontrar uma verdade exata, como por exemplo os valores de condução térmica dos tipos de isolantes citados no trabalho, tais valores nos dão números exatos. A abordagem quantitativa é baseada em métodos matemáticos ou estatísticos, obtendo resultados exatos. A pesquisa eleitoral, como segundo exemplo, é um tipo de pesquisa quantitativa.

Após toda a explicação do conceito de metodologia, objetivo e da abordagem utilizada, chega-se ao método utilizado pelo autor, o método Indutivo, o qual consiste na observação e análise de algum caso específico, que no caso é a eficácia dos tipos de isolamentos térmicos que será calculado com base em informações existentes e, logo após, seguirei com as conclusões em relação ao tema.

Na realização de atividades que demandam organização e disciplina na realização, a formulação dos problemas é tratada com muita importância para realizar as equações propostas. Foi necessário utilizar o método de análise por volume de controle, onde o método apresenta 6 passos para a realização de problemas relacionados à volume de controle, essas etapas fundamentais foram retirados do livro fundamentos da termodinâmica, escrito por Claus Borgnakke e Sonntag.

O primeiro passo é necessário esquematizar um modelo físico para a realização da etapa. “Indique todos os fluxos de massa, as transferências de calor e os trabalhos pertinentes ao processo. Indique também as forças externas que atuam sobre o sistema, tais como pressões e a gravidade”. (BORGANAKKE; SONNTAG,2013)

O segundo passo consiste em selecionar o sistema ou volume de controle do estudo especificando a superfície de controle apropriada contendo as substâncias que se deseja analisar.

Essa etapa é muito importante pois a formulação do problema depende da escolha particular feita. Certifique-se de que apenas os fluxos de massa de calor e os trabalhos que cruzam a fronteira foram considerados, eliminando termos que são internos ao volume de controle. (BORGANAKKE; SONNTAG,2013)

Passo três é necessário apresentar todas as leis que serão utilizadas no volume de controle desejado.

Para volumes de controle adjacentes, certifique-se de que os fluxos (massa, calor e trabalho) que cruzam a fronteira (ou superfície de controle) de um deles, cruzam também a fronteira do volume adjacente, mas com sinal trocado. As equações devem ser, em princípio, escritas em sua forma mais geral, e depois devem ser simplificadas pela exclusão dos termos inexistentes. (BORGANAKKE; SONNTAG,2013)

No passo quatro será escrito informando a necessidade de anotar todas as equações que auxiliam na resolução e as leis que especificam o volume de controle.

Para as propriedades das substâncias devem ser escritas equações constitutivas, ou referenciadas a tabelas que permitam seu cálculo. Para definir o processo que se desenvolve, normalmente são necessárias equações bem simples, as quais refletem uma aproximação da realidade. Ou seja, constrói-se um modelo matemático que é a descrição simplificada do comportamento do mundo real. (BORGANAKKE; SONNTAG,2013)

Penúltimo passo nos apresenta que se deve concluir a formulação com combinação dentre as equações, sem imputar valores em suas variáveis de conhecimento.

Distinga as variáveis conhecidas (variáveis independentes) das desconhecidas (ou seja, aquelas que se quer calcular, normalmente designadas como variáveis dependentes). Aqui é importante determinar todos os estados das substâncias e determinar par de propriedades que define um estado. Isso é facilitado pela representação gráfica do processo nos diagramas P-0, T-0, T-s, ou diagramas similares. Tais diagramas ajudam a identificar quais tabelas devem ser usadas e quais propriedades devem ser procuradas. (BORGANAKKE; SONNTAG,2013)

Por último, mas não menos importante no sexto passo já se pode realizar as equações com as variáveis conhecidas.

Nem sempre é possível isolar cada uma das variáveis, pode acontecer de que duas ou mais variáveis de uma equação sejam desconhecidas. Nesse caso, deve-se resolver um sistema de duas ou mais equações. Encontrados os valores numéricos, verifique se fazem sentido e se encontram dentro de uma faixa razoável de valores. (BORGANAKKE; SONNTAG,2013)

5 ESTUDO DE CASO

Foi realizada uma análise da temperatura ao longo de uma tubulação de água quente com uma particularidade: foi construída uma solução prática levando em conta a variação das propriedades termo físicas na solução do problema diferente da técnica tradicional em que são consideradas propriedades termo físicas médias.

Para o desenvolvimento do memorial de cálculo, tornou-se indispensável o levantamento de alguns dados técnicos e valores retirados do sistema para serem avaliados. Informações como: comprimento da tubulação do sistema, diâmetros internos e externos, temperaturas iniciais e finais, pressão, vazão do sistema, características do material, entre outros. Para o presente estudo, foram tomadas algumas premissas iniciais, tais como:

- Comprimento máximo do sistema: 400 m;
- Ausência de curvas no decorrer da tubulação;
- Temperatura média anual: 20°C
- Tubulação completamente preenchida pelo fluido;
- Uniformidade da espessura do isolamento ao longo do sistema;
- Número de Reynolds único para todo o comprimento da tubulação;
- Perda de carga desprezível para o sistema avaliado;
- Sistema isolante perfeito, sem partes expostas.

5.1 Medições

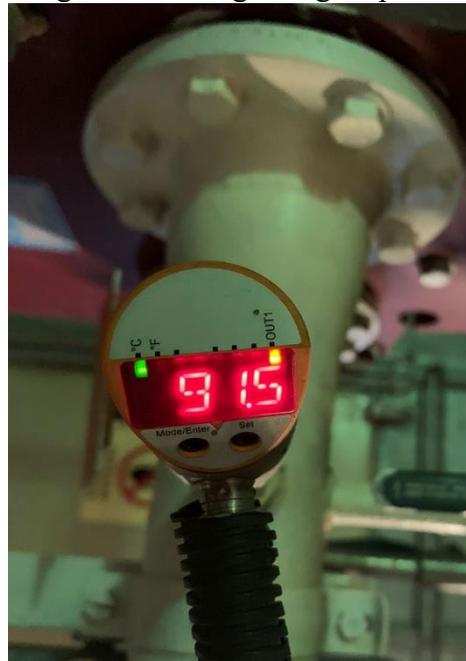
Seguindo para as medições em campo, a caldeira de água quente do estudo em questão, possui, imediatamente após a saída do reservatório, um termopar com indicação local através de um display de 8 segmentos, como demonstrado na Figura 20. A leitura média, ao longo do ano, está compreendida entre o intervalo de 94°C à 96 °C. Para o estudo proposto, foi considerada uma temperatura média anual de 95°C. Em relação a chegada do fluido quente ao local destinado, a temperatura varia entre 91°C e 93°C, como apresentado por um PT100 com leitor digital na Figura 21 para a análise, foi considerada a temperatura média anual no valor de 92°C.

Figura 20- Temperatura de saída de processo



Fonte: Autor

Figura 21 - Chegada água quente



Fonte: Autor

Quando em operação, a tubulação de água quente da caldeira apresenta pressão de trabalho em aproximadamente $3,5\text{Kg/cm}^2$, como representado na Figura 22, a pressão apresentada é de importante controle.

Figura 22- Pressão na saída da bomba



Fonte: Autor

O isolante térmico levantado em questão, o material é formado por uma espuma de poliuretano, com 10 cm de espessura cobrindo toda área de tubulação demonstrado na Figura 23.

Figura 23 - Espessura do isolante térmico



Fonte: Autor

A tubulação de abastecimento de água quente é formada por um tubo de 8", com características de aço carbono 1020, schedule 40 sem costura. A informativa sobre esses dados é fundamental, pois através deles, é possível obter dados de raios e espessuras da tubulação, que se encontram tabelados, como representado na Figura 24.

Figura 24- Tabela Aço

Nominal Pipe Size In. (mm)	Pipe O.D. In. (mm)	Wall Thickness In. (mm)	Weight of Pipe Lbs./Ft. (kg/m)	Weight of Pipe Filled With Water Lbs./Ft. (kg/m)	Maximum Span* Ft. (Meter)	Recommended Hanger Rod Sizes
3/8" (10)	.675 (17.1)	.091 (2.3)	.6 (0.9)	.7 (1.0)	7 (2.13)	3/8"-16
1/2" (15)	.840 (21.3)	.109 (2.7)	.8 (1.2)	.9 (1.2)	7 (2.13)	3/8"-16
3/4" (20)	1.050 (26.7)	.113 (2.9)	1.1 (1.7)	1.3 (2.0)	7 (2.13)	3/8"-16
1" (25)	1.315 (33.4)	.133 (3.4)	1.7 (2.5)	2.1 (3.0)	7 (2.13)	3/8"-16
1 1/4" (32)	1.660 (42.1)	.140 (3.5)	2.3 (3.4)	2.9 (4.3)	7 (2.13)	3/8"-16
1 1/2" (40)	1.900 (48.2)	.145 (3.7)	2.7 (4.0)	3.6 (5.3)	9 (2.74)	3/8"-16
2" (50)	2.375 (60.3)	.154 (3.9)	3.6 (5.4)	5.0 (7.5)	10 (3.05)	3/8"-16
2 1/2" (65)	2.875 (73.0)	.203 (5.1)	5.8 (8.6)	7.9 (11.7)	11 (3.35)	1/2"-13
3" (80)	3.500 (88.9)	.216 (5.5)	7.6 (11.2)	10.8 (15.9)	12 (3.66)	1/2"-13
3 1/2" (90)	4.000 (101.6)	.226 (5.7)	9.1 (13.5)	13.4 (19.8)	13 (3.96)	1/2"-13
4" (100)	4.500 (114.3)	.237 (6.0)	10.8 (16.0)	16.3 (24.2)	14 (4.27)	5/8"-11
5" (125)	5.563 (141.3)	.258 (6.5)	14.6 (21.7)	23.2 (34.6)	16 (4.87)	5/8"-11
6" (150)	6.625 (168.3)	.280 (7.1)	19.0 (28.2)	31.5 (46.8)	17 (5.18)	3/4"-10
8" (200)	8.625 (219.1)	.322 (8.2)	28.5 (42.5)	50.1 (74.6)	19 (5.79)	3/4"-10
10" (250)	10.750 (273.0)	.365 (9.3)	40.5 (60.2)	74.6 (110.9)	22 (6.69)	7/8"-9
12" (300)	12.750 (323.8)	.406 (10.3)	51.1 (75.9)	102.1 (151.9)	23 (7.01)	7/8"-9
14" (350)	14.000 (355.6)	.437 (11.1)	63.0 (93.7)	121.5 (180.7)	25 (7.62)	1"-8
16" (400)	16.000 (406.4)	.500 (12.7)	83.0 (123.5)	159.5 (237.3)	27 (8.23)	1"-8
18" (450)	18.000 (457.2)	.563 (14.3)	105.0 (156.2)	202.2 (300.8)	28 (8.53)	1"-8
20" (500)	20.000 (508.0)	.593 (15.1)	123.0 (183.0)	243.4 (361.8)	30 (9.14)	1 1/4"-7
24" (600)	24.000 (609.6)	.687 (17.4)	171.0 (254.5)	345.2 (513.7)	32 (9.75)	1 1/4"-7

Fonte:Iron&Steel (2017)

5.2 Cálculo de decaimento de temperatura sem isolante térmico

Iniciou-se os cálculos de decaimento de temperatura escrevendo uma equação para balanço de energia para um volume de controle, tem-se que na Equação 14:

$$m * C_p * T_f = dQ + m * C_p * (T_f + dT_f) \quad (14)$$

Pode-se obter a equação modelo de Newton para convecção, representada pela Equação 15.

$$Dq = h * \pi * dx * (T_f - T_{pi}) \quad (15)$$

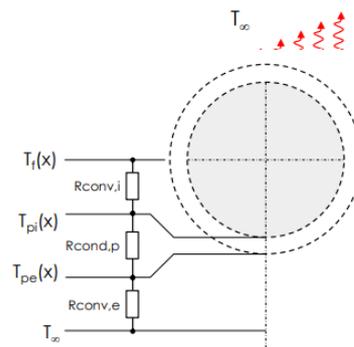
Realizando a substituição dos termos e reordenando os semelhantes, se tem a equação apresentada abaixo que apresenta a equação diferencial em função de t_f porem com aparecimento da t_{pi} .

Essa equação pode ser utilizada para apresentar diferentes caminhos de resoluções. de maneira mais comum e simplificada, é apresentado nas literaturas técnicas um método de resolução comum que leva em consideração que as propriedades termo físicas são constantes.

Para o estudo em questão, será apresentado um outro método com cálculos de iteração contínua para que se tenha uma maior precisão por meio das propriedades termo físicas variáveis em função de variáveis conhecidas (pressão, vazão, temperatura etc...)

Desta forma, será utilizado um método de solução numérica com iterações finitas para determinar a temperatura final da tubulação em função de diversas variáveis iteradas a partir de equações de estado. Ao se separar uma fração dx da tubulação para realizar a análise, tem-se a seguinte condição mostrada na Figura 25.

Figura 25 – Volume de controle



Fonte: Selegim (2018)

De $t_f(x)$ até $t_{pi}(x)$ têm-se convecção, de $t_{pi}(x)$ até $t_{pe}(x)$ têm-se condução com a parede do tubo, de $t_{pe}(x)$ até t_∞ têm-se convecção natural. pode-se escrever conforme a Equação 16, Equação 17 e Equação 18.

$$dQ = \frac{T_f - T_\infty}{R_{conv,i} + R_{cond,p} + R_{conv,e}} \quad (16)$$

$$dQ = \frac{T_f - T_\infty}{\frac{1}{h_i * \pi * D_i * dx} + \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 * k * \pi * dx} + \frac{1}{h_e * \pi * D_e * dx}} \quad (17)$$

$$dQ = \dot{m} * C_p * \frac{dT_f}{dx} + \frac{1}{h_i * D_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2k} + \frac{1}{h_e * D_e} + (T_f - T_\infty) \quad (18)$$

Substituído a Equação 18 na Equação 15, têm-se a seguinte equação diferencial análoga a Equação 18, é possível então, obter a Equação 19:

$$m * C_p * \left(\frac{dT_f}{dx} \right) + \left(\frac{1}{\frac{1}{h_i * D_i} + \frac{\ln \left(\frac{D_e}{D_i} \right)}{2 * K} + \frac{1}{h_e * D_e}} \right) * (T_f - T_\infty) = 0 \quad (19)$$

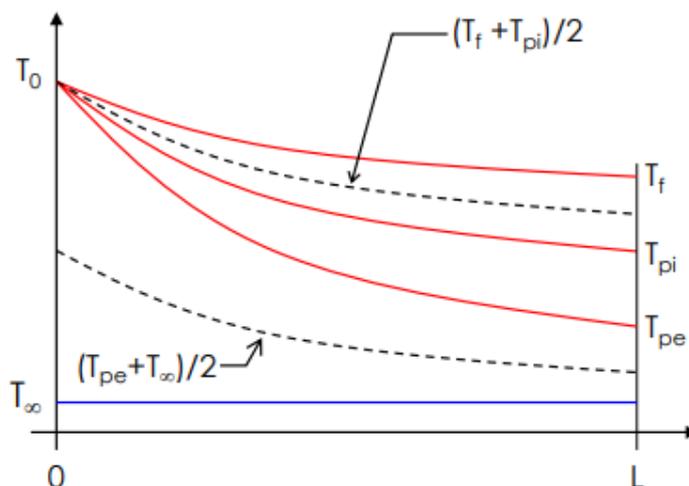
Na Equação 19, pôde-se perceber que não mais necessidade de relacionar as perdas de calor com a parede da tubulação e, apenas, considerando que a temperatura infinita será a temperatura ambiente.

Para seguir com o cálculo de determinação do decaimento de temperatura, basta que sejam determinados os coeficientes de convecção que demandam o cálculo das propriedades termo físicas.

tornou-se necessário encontrar parâmetros adimensionais para a execução do cálculo, por exemplo: número de Reynolds (re), número de Rayleigh (ra), Prandtl (pr) e Nusselt (nu), Através das equações 9, 10 e 11 apresentadas anteriormente.

Porém, para a determinação dos valores dos parâmetros, seja utilizada a temperatura média entre a temperatura do fluido e a temperatura da parede interna do tubo. esta temperatura, obviamente, varia ao longo da tubulação, uma vez que o método proposto neste estudo, apresenta propriedades termo físicas variáveis, como apresentado na Figura 26.

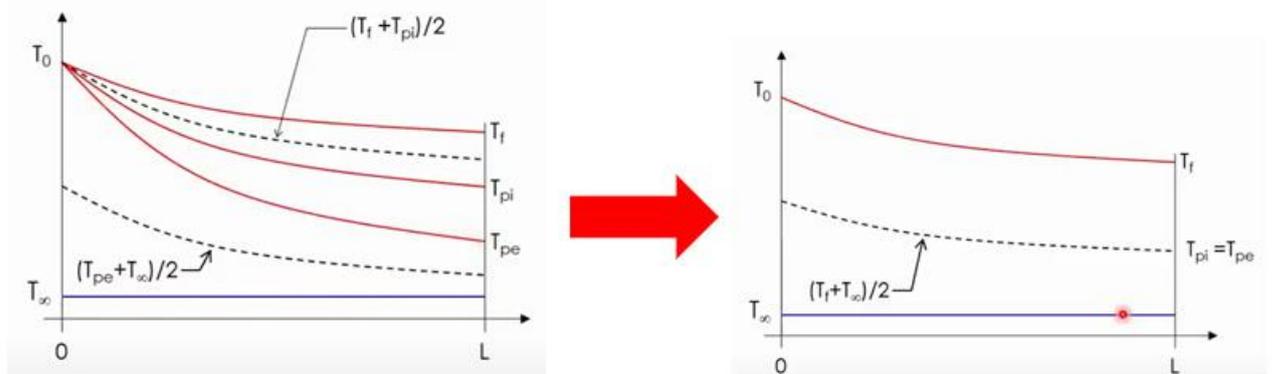
Figura 26 - Temperatura



Fonte: Selegim (2018)

Para o cálculo do número de Nusselt ao longo da tubulação e Rayleigh ao longo da tubulação, utiliza-se a temperatura média entre a temperatura da parede externa no tubo e a temperatura ambiente. Como a espessura da parede do tubo é pequena, foi considerado que não houvesse mudanças significativas de temperatura quando se é comparada a curva de decaimento da curva 1 para a curva 2, ou seja, a $t_{pi} = t_{pe}$. Apresentado na Figura 27.

Figura 27- Curva de temperatura



Fonte: Selegim (2018)

5.2.1 Memorial de cálculo

O desenvolvimento do memorial segue a estratégia de isolar termos para facilitar o cálculo. inicialmente será substituída parte da Equação 19, gerando minha Equação 20.

$$UA(T) = \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{h_i * D_i} \right) + \left(\frac{\ln \left(\frac{D_e}{D_i} \right)}{2 * K} \right) + \frac{1}{h_e * D_e}} \right) \quad (20)$$

A Equação $UA(T)$ pode ser chamada como coeficiente global de transferência de calor que funciona como uma condutância térmica recíproco da resistência térmica. essa equação pode ser reescrita de forma mais simplificada destacando a dependência da temperatura no coeficiente global de calor, por que o h_i e h_e dependendo do calor, portanto, reescrevendo a equação acima, têm-se a Equação 21:

$$m * C_p * \left(\frac{dT_f}{dx} \right) + UA(T) * (T_f - T_\infty) = 0 \quad (21)$$

Para resolver a equação diferencial, que se trata de uma equação diferencial ordinária, com coeficiente variáveis (não sendo possível resolver de forma analítica), tornou-se necessário resolver através de diferenças finitas. portanto, a derivada presente na Equação 21 deverá ser substituída por um Δx numa partição este Δx se refere a um domínio, que no caso do estudo proposto, é o comprimento de 0 à L (400 m). sendo assim, a derivada foi substituída por equivalente de diferenças finitas e tudo que não possui derivada foi calculado em posições “k”. Obtendo a Equação 22:

$$\dot{m} * C_p * \frac{T_{f,k+1} - T_{f,k}}{\Delta x} + UA(T_{f,k}) * (T_{f,k} - T_{\infty}) = 0 \quad (22)$$

Ao se isolar o termo $T_{f,k+1}$, tem-se uma equação de recorrência que será utilizada para fazer as iterações numéricas, como apresentado na Equação 23:

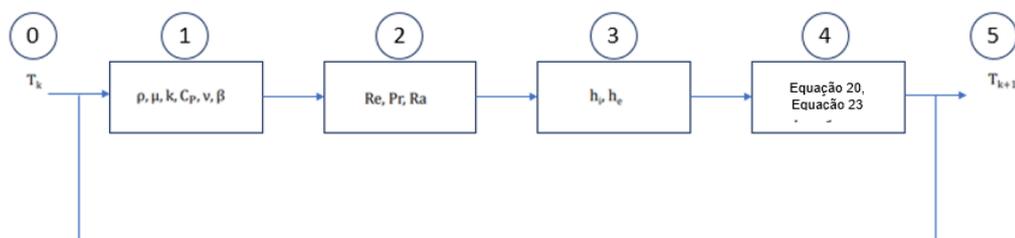
$$T_{f,k+1} = T_{f,k} - \frac{\Delta x UA(T_{f,k})}{\dot{m} C_p} * (T_{f,k} - T_{\infty}) \quad (23)$$

\uparrow
 k=0
 condição
 de contorno

Desta forma, para calcular a temperatura com $k=0$, basta substituir na equação, de forma análoga $k=1$ e assim sucessivamente de forma recursiva realizar iterações com os resultados, como apresentado da Equação 23.

Em resumo, os cálculos obedecem a seguinte estrutura da Figura 28.

Figura 28 - Estrutura dos cálculos



Fonte: Selegim (2018)

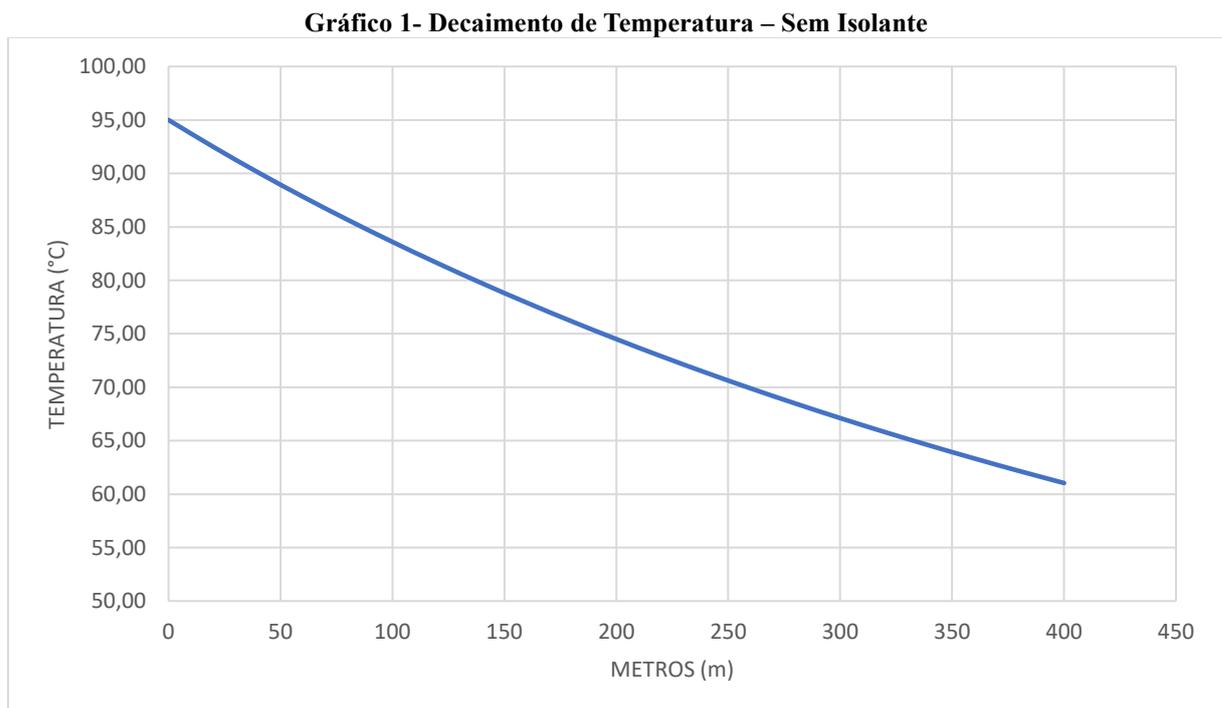
0) temperatura de entrada por exemplo $k=0$, $k=1$, $k=2$, etc...

- 1) cálculo de todas as propriedades termo físicas do fluido dentro do tubo e do fluido fora do tubo, variando, programaticamente até o valor desejado para verificar a influência;
- 2) cálculo dos números adimensionais dos dois fluidos (interno e externo)
- 3) cálculo dos coeficientes de convecção;
- 4) substituição dos valores das equações 20 e 239;
- 5) apresentação do resultado em função

As equações serão realizadas através do excel, utilizando as ferramentas do Refprop, especializadas em cálculos termodinâmicos.

5.2.2 Decaimento de temperatura sem isolante térmico

Realizando os cálculos de iterações com o auxílio da Equação 23, pode-se observar o decaimento da temperatura de entrada em relação a de saída, apresentado no Gráfico 1.



Fonte: Autor

Observa-se que a temperatura decai 33,96°C para as condições estabelecidas no item 4 deste estudo.

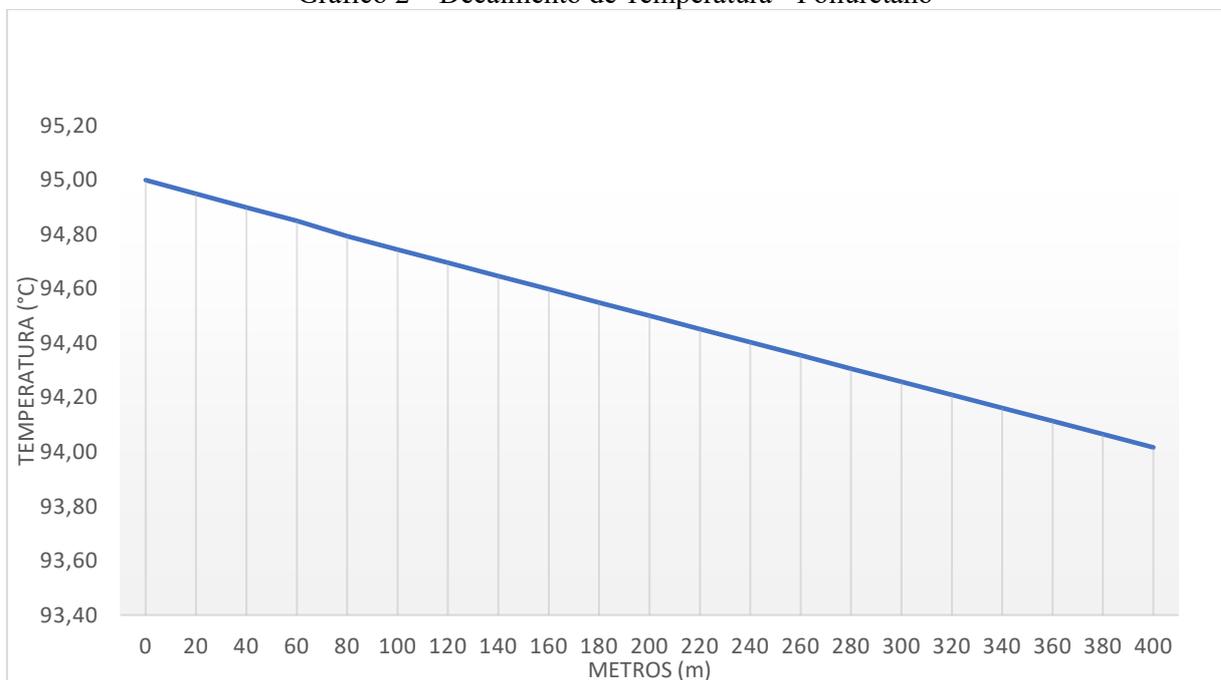
5.2.3 Decaimento de temperatura com isolantes térmicos

5.2.3.1 Isolante 1: Poliuretano

Realizando os cálculos de iterações com o auxílio da Equação 23, pode-se observar o decaimento da temperatura de entrada em relação a de saída e pode-se obter o Gráfico 2.

As propriedades térmicas dos materiais de estudo estão apresentadas nas Tabela 19 e Tabela 20.

Gráfico 2 – Decaimento de Temperatura - Poliuretano



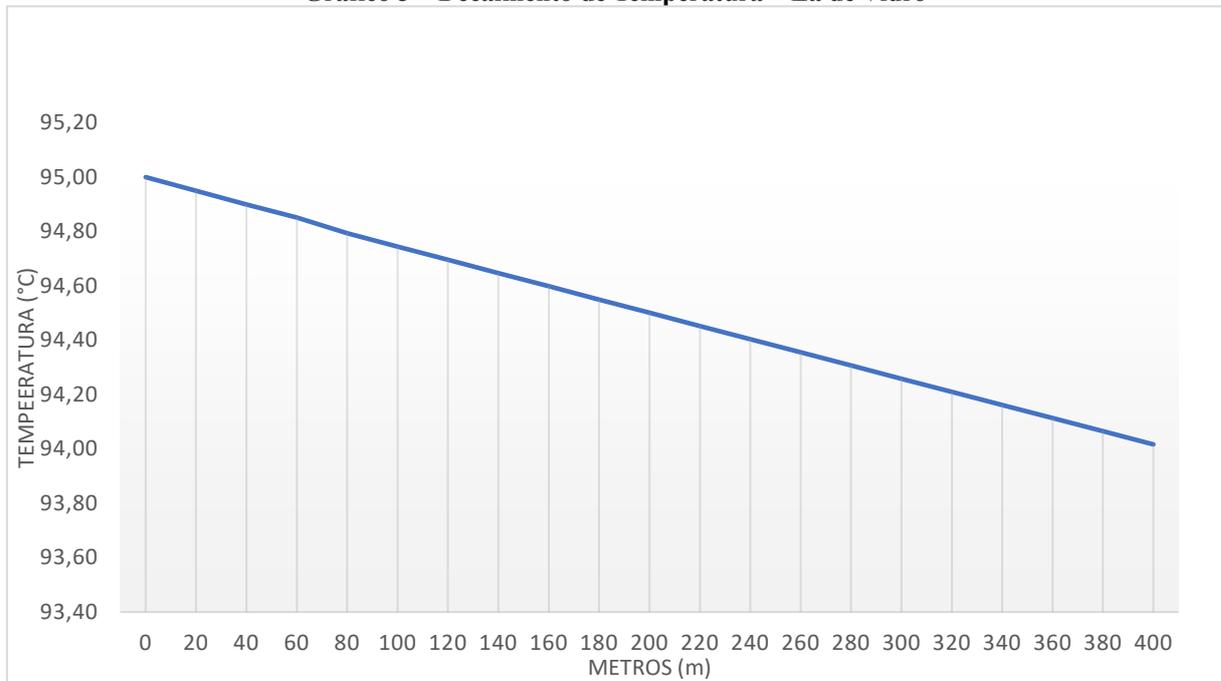
Fonte: Autor

É possível observar que a temperatura com material de poliuretano cai de 95°C para 94,0153°C.

5.2.3.2 Isolante 2: Lã de Vidro

O Segundo isolante proposto, se trata da Lã de Vidro, e através dos cálculos realizados através da Equação 23, obtém-se a curva do Gráfico 3.

Gráfico 3 – Decaimento de Temperatura – Lã de Vidro



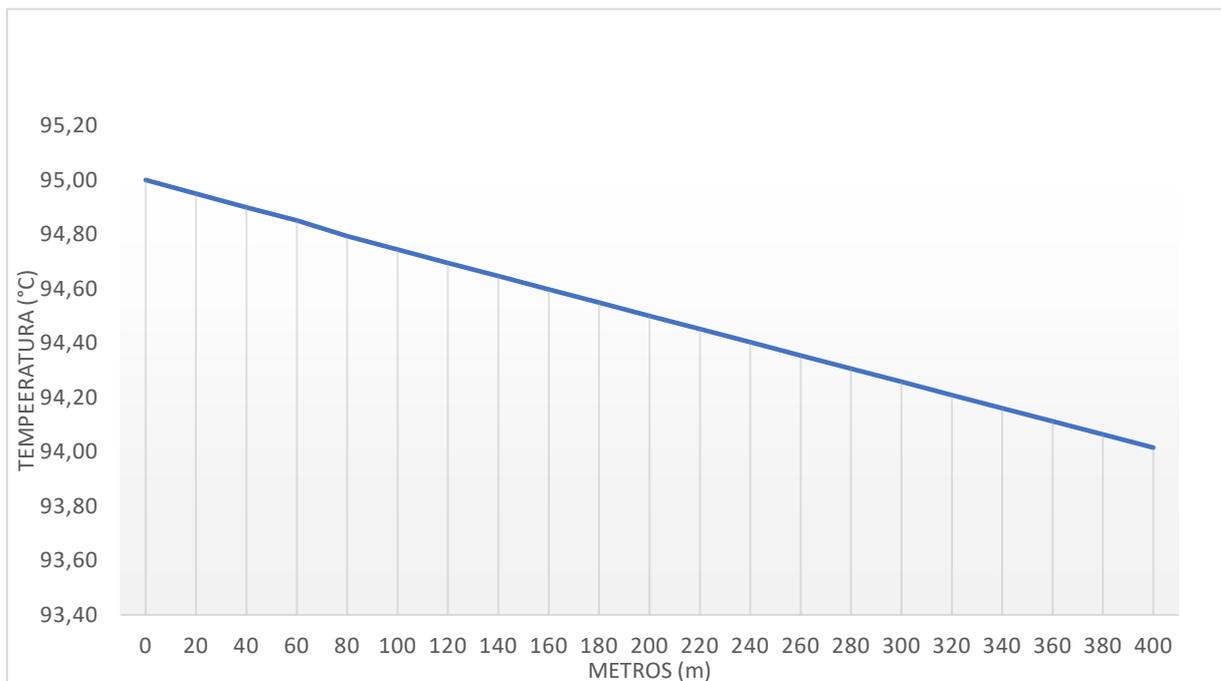
Fonte: Autor

Analisando o Gráfico referente a lã de vidro, é possível perceber que a temperatura diminui $0,9834^{\circ}\text{C}$ em 400 metros de tubulação.

5.2.3.3 Isolante 3: Lã de rocha

Por último, mas não menos importante foi escolhido para testes a espuma de Lã de Rocha, através das mesmas equações, foi possível obter os dados do Gráfico 4.

Gráfico 4 – Decaimento de Temperatura – Lã de Rocha



Fonte: Autor

Após a análise, o comportamento da curva apresenta decrescer de 95°C para 94,0166°C.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o presente estudo foi possível realizar métodos numéricos para análise do decaimento de temperatura para o sistema proposto. Desta forma, foi possível determinar a temperatura final do fluido no sistema utilizando as propriedades termo físicas do fluido e do material da tubulação.

Para uma tubulação sem isolamento térmico, percebeu-se que houve um decaimento de 33,96°C, representando uma perda de 36% de calor como apresentado na Tabela 1. Porém, ao se realizar o modelamento matemático para verificar o comportamento da temperatura em função do isolamento térmico, observou-se que:

Tabela 1 – Queda de temperatura

Decaimento de temperatura	
Metros (m)	°C
0	95
20	92
40	90
60	88
80	86
100	84
120	82
140	80
160	78
180	76
200	75
220	73
240	71
260	70
280	68
300	67
320	66
340	65
360	63
380	62
400	61

Fonte: Autor

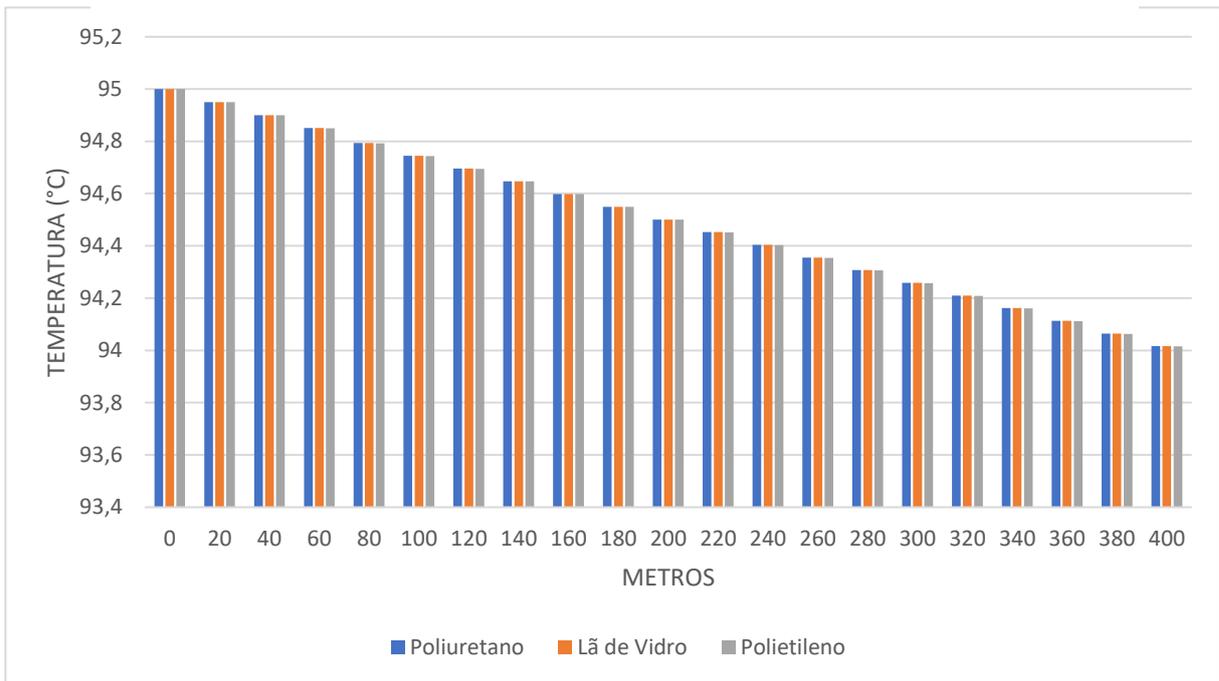
Mesmo com diferentes tipos de materiais isolantes comerciais, não houve mudanças significativas, isto deve-se ao fato de seus coeficientes k serem muito próximos, o que, para os mesmos coeficientes termo físicos ao longo do comprimento do tubo, as variações são pequenas.

Tabela 2 - Queda térmica por isolante

Metros	Poliuretano	Lã de Vidro	Lã de Rocha
	Temperatura		
0	95	95	95
20	94,94999396	94,95001634	94,94992553
40	94,89946894	94,8994913	94,89933216
60	94,85061032	94,85063266	94,85040528
80	94,79316835	94,79319068	94,79289517
100	94,74438281	94,74440512	94,74404156
120	94,69563087	94,69565317	94,69522164
140	94,64691244	94,64693472	94,64643533
160	94,59822703	94,5982493	94,59768211
180	94,54957569	94,54959795	94,54896306
200	94,5009578	94,50098004	94,50027755
220	94,4523734	94,45239563	94,45162561
240	94,4038224	94,40384461	94,40300716
260	94,35530484	94,35532703	94,35442224
280	94,30682063	94,30684281	94,30587076
300	94,25836982	94,25839198	94,25735276
320	94,20995232	94,20997447	94,20886817
340	94,1615681	94,16159023	94,16041694
360	94,11321714	94,11323926	94,11199907
380	94,06489943	94,06492153	94,06361452
400	94,01661493	94,01663702	94,01526328

Fonte: Autor

Gráfico 5- Queda de Temperatura



Fonte: Autor

É válido lembrar que, mesmo com variações não significativas, para um projeto de engenharia industrial, deve-se levar em consideração outros pontos para a implementação de isolamento térmico em tubulações. Destes, a relação custo x benefício deve ser avaliada, já que o valor do projeto é fundamental para o bom andamento financeiro da implementação. Desta forma, a seguir estão apresentados os custos médios envolvidos para a implementação dos três isolamentos térmicos escolhidos para este estudo.

Para a analisar os 3 tipos de isolantes, foi necessário pesquisar os oferecidos em mercado.

Primeiro isolamento encontrado em mercado foi o Poliuretano, como representado na Figura 29 é um isolante que fornece 32kg/m^3 com preço de R\$528,68

29 – Poliuretano



☆☆☆☆☆ (0 avaliações)

Vendido por TERAC FORROS E ISOLAMENTOS e entregue por Extra

Poliuretano Líquido Expandido Térmico c/ 10kgs - Terac

(Cód. Item 1536206290) [Outros produtos Não Informado](#)

R\$ 525,68

ou até 6x de R\$87,61 sem juros [ver parcelamento](#)

Comprar

R\$ 525,68

à vista no Cartão Extra ou 10x de R\$ 52,57 sem juros. [Peça já o seu cartão Extra](#)

Calcule o frete e prazo de entrega

Consultar

Fonte: Extra (2022)

A espuma líquida de poliuretano expandido térmico possui 10kgs e possui uma densidade de 32kg/m³, realizando cálculos de volume, ela atende cerca 0,3125, em 400 metros de tubulação, realizado o cálculo através da Equação 24, obtendo como custo de implementação um valor de R\$64.092,98.

A manutenção e durabilidade do material gira em torno da vida útil mínima de 20 anos, porém a espuma de poliuretano pode apresentar degradação significativa quando aplicada a sistemas que possuem temperatura acima de 70°C, diminuindo seu tempo de vida útil. Sua manutenção é estabelecida nos momentos onde há muitos pontos de degradação, sendo necessário repor partes do sistema isolante. (UERJ, 2010)

$$\text{Custo de implementação} = \text{Área} * \left(\frac{\text{Volume atendido}}{\text{valor da unidade}} \right) \quad (24)$$

Sequencialmente, foi realizado a pesquisa do custo da lã de vidro, obtendo os valores representados na Figura 30.

Figura 30 - Lã de Vidro



Rolo Lã de Vidro WF 4+ Pop 70mmX15m2

ISOVER Seja o primeiro a avaliar este produto

SKU 89152903

Produto em estoque: (27 UN)

Gestão de Estoque

Sujeito a disponibilidade da loja.

VAREJO:

R\$299,90/un
à vista

Consulte tabela varejo preço a prazo

ATACADO*:

R\$278,56/un
à vista

*Válido somente para compras a partir de 5 un
Consulte tabela atacado preço a prazo

QTD:

ADICIONAR AO CARRINHO

ADICIONAR À ORÇAMENTOS

Fonte: Obramax (2021)

O Isolante de Lã de vidro, consiste em um rolo de 70mm x 15m², tendo como custo um valor de R\$299,90, com volume de atendimento em 1,05 m³, utilizando a Equação 24, pode se apresentar que para preencher todo o sistema será necessário gastar R\$10.882,44.

Em relação a vida útil e manutenção do material, a lã de vidro fornece uma previsão de durabilidade de no mínimo 50 anos e sua manutenção deve ser aplicada em momentos onde possui a necessidade de retirar a camada. (SAINT GOBAIN, 2022)

Por fim, o isolante de Lã de Rocha finaliza as pesquisas, através da Figura 31 pode-se retirar os dados técnicos do produto.

Figura 31 - Lã de Rocha

Rolo de Lã de Rocha 4,8m²
1,2x4mx50mm Biolã

★★★★☆ 4.2 (19) Cód. 89514544

Descrição
Os feltros de lã de rocha mineral Biolã são indicados para isolamento térmico ou absorção acústica em residências, indústrias, sistemas de ar condicionado, construção civil. Não causa corrosões, não inflamável, facilidade no manuseio e instalação. Não polui o meio ambiente.

[Ver descrição técnica](#)

R\$ 164,90 / cada
8x s/ juros no cartão Celebre!
Vendido e entregue por Leroy Merlin

Formas de pagamento

Calcule seu frete
CEP Não sei meu CEP
Ex: 00000-000

Estoque na Loja física

Preço válido para o dia 30/10/2022 na região São Paulo e

Fonte: Leroy Merlin (2021)

O Isolamento térmico de Lã de Rocha, consiste em um rolo de 4,8 m², atendendo um volume de 0,24m³, com custo final de R\$164,90, realizando o cálculo de gastos para implementação em 400 m, tem-se que seria necessário gastar R\$26.178,72.

O sistema formado por lã de rocha, por conter características próximas a da lã de vidro, possuem tempos de durabilidade bem parecidos, também se encontra na faixa de no mínimo 50 anos, e a manutenção deve ser realizada em pontos onde contem falhas de isolante. (VA, 2022)

6 CONCLUSÃO

Através do presente trabalho, foi possível obter os objetivos determinados, ao se analisar o Gráfico 1, onde está representado o decaimento queda de temperatura, é possível observar que não há a possibilidade de aplicação do sistema sem isolamento térmico, tendo em vista que houve uma queda de $33,96^{\circ}\text{C}$, fazendo com que o sistema seja ineficiente.

Também se concluiu que os sistemas que compõe o isolamento térmico apresentados no Gráfico 5, por possuírem suas propriedades bem parecidas, o resultado referente a queda de temperatura é muito similar, apresentando uma queda de aproximadamente 1°C . É importante considerar que os dados encontrados, foram realizados considerando um sistema perfeito, sem falhas pontuais de isolamento térmico.

O sistema atual mostra uma eficiência equivalente ao calculado, mas por conter pontos sem isolantes e desgastes, possui uma queda de temperatura um pouco maior. Entretanto, por fornecer o fluido na temperatura ideal para processo, sem uma diferença muito grande de queda, não seria necessário e viável a implementação de um novo sistema de isolamento.

Porém como se trata de um estudo de engenharia, não somente os dados obtidos pelos cálculos de decaimento nos indicam qual seria o ideal para o sistema, é necessário abordar outros pontos relevantes ao estudo, principalmente a relação entre custo x benefício. Sendo assim através das análises é possível informar que os dois isolantes com melhor custo é a lã de vidro que fica em torno de R\$299,90 a unidade e a Lã de Rocha, no valor de R\$164,90, porem, mesmo a lã de vidro tendo um valor unitário maior que a Lã de Rocha, ela possui maior metragem e um custo menor para instalação em todo o sistema.

Ao relacionar a manutenção e vida útil entre os tipos de isolante, foi possível observar que os sistemas de lã de vidro e lã de rocha se tratam de sistemas bem similares, tendo durabilidade mínima de no mínimo 50 anos, e o sistema de reparo sendo considerados iguais.

Portanto o isolante ideal para instalação em um sistema com as características similares ao da empresa citada, seria o de lã de vidro, devido suas características serem eficientes, apresentar um ótimo valor de implementação para a empresa e possuir uma vida útil bem longa e ser de fácil manutenção.

7 INDICAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tomando como base o presente estudo, é possível realizar experimentos e medições com novas fontes combustíveis da caldeira, com o objetivo de analisar o comportamento em relação aos gastos, observar possíveis ganhos financeiros com outros combustíveis.

REFERÊNCIAS

- ALTUS**, 2021. Disponível em: < <https://www.altus.com.br/post/385/entenda-o-que-e-e-para-que-serve-a-instrumentacao-industrial#:~:text=A%20Instru-menta%C3%A7%C3%A3o%20Industrial%20%C3%A9%20a,desempe-ngo%20dos%20mais%20variados%20processos.>>. Acesso em 13/08/2022.
- ANDRADE**, Alan. **Máquinas Térmicas AT-101**. Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2011. Disponível em <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/AT101-Aula03.pdf>>. Acesso em 10/05/2022.
- BORGNAKKE**, C.; **SONNTAG**, R. **Fundamentos da Termodinâmica**. São Paulo: Blucher, 2013.
- BOTELHO**, M. H. C; **BIFANO**, H. M. **Operações de caldeiras** – Gerenciamento, controle e manutenção. 2ª ed. São Paulo: Blucher, 2015.
- BRASIL**, A. **Máquinas Termohidráulicas de Fluxo**. 2010. Disponível em <https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817712/LOQ4015/capitulo3_bombasclassificacaoedescricao.pdf>. Acesso em 10/05/2022.
- CONAUT**, 2021. Disponível em: <<https://www.conaut.com.br/blog/104-os-cinco-principais-tipos-de-medidores-de-vazao>>. Acesso em 13/08/2022.
- CRUZ**, A.; **BERWANGER**, D. **Sistema automatizado para teste em motores elétricos de indução trifásicos de baixa potência**. Curitiba, 2015. Disponível em: < https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9488/2/CT_COMET_2014_2_06.pdf>. Acesso em 05/05/2022.
- ÇENGEL**, Y. A. **Heat and mass transfer: fundamentals & applications**. 5th. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- DÁRIO**, E. R. **Disciplina Termodinâmica**. Instituto Federal Santa Catarina, Campus Joinville, 2017. Disponível em <<http://joinville.ifsc.edu.br/~evandro.dario/Termodin%C3%A2mica/Aulas%20-%20slides/Primeira%20Avalia%C3%A7%C3%A3o/Termodin%C3%A2mica%20-%20Aula%204%20e%205%20-Propriedades%20de%20subst%C3%A2ncias.pdf>>. Acesso em 10/05/2022.
- DITEC DO BRASIL**, 2022. Disponível em: <<https://www.ditecdobrasil.com.br/medidor-de-vazo-eletromagntico-6/prod-5340566/>>. Acesso em 13/08/2022.
- EXTRA**, 2022. Disponível em: <https://www.extra.com.br/poliuretano-liquido-expandido-termico-c-10kgs-terac-1536206290/p/1536206290?utm_medium=cpc&utm_source=google_freelisting&IdSku=1536206290&idLojista=37682&tipoLojista=3P>. Acesso em 02/10/2022.
- REFPROP**, 2013. Disponível em: < <https://www.nist.gov/srd/refprop>>. Acesso em 22/11/2022

FIOCRUZ – Estações do ano, 2022. Disponível em: <<https://www.fiocruz.br/biosseguranca/Bis/infantil/estacoes-ano.htm#:~:text=As%20esta%C3%A7%C3%B5es%20do%20ano%20acontecem,eixo%2C%20n%C3%A3o%20existiriam%20as%20esta%C3%A7%C3%B5es.>>. Acesso em 01/10/2022.

GUIA TRABALHISTA, NR-13 caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento, 2018. Disponível em: <<http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr13.htm>>. Acesso em 01/10/2022.

ENERGY, 2022. Disponível em: <<https://goldenergy.pt/glossario/perda-calor/#:~:text=Tipos%20de%20Perda%20de%20Calor,ocorre%20atrav%C3%A9s%20das%20ondas%20eletromagn%C3%A9ticas>>. Acesso em 05/07/2022.

HOBBSAWM, E. J. A era das revoluções: 1789-1848. São Paulo: Ed. Paz e Terra, 2010.

INCROPERA, F. et al. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

JÚNIOR, C. A. et al. Construção de modelo para avaliação da condutividade térmica em isolantes. Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2016. Disponível em: <<https://cader-nopaic.fae.edu/cadernopaic/article/viewFile/173/133>>. Acesso em 03/05/2022.

KHAN ACADEMY, 2022. Disponível em: <<https://pt.khanacademy.org/science/physics/thermodynamics/specific-heat-and-heat-transfer/a/what-is-thermal-conductivity>>. Acesso em 03/09/2022.

KALATEC AUTOMAÇÃO, 2021. Disponível em: <<https://blog.kalatec.com.br/equipamentos-industriais/>> Acesso em 23/04/2022

KAPUNO, R. R. A.; RATHORE, M. M. Engineering heat transfer. 2nd. ed. Massachusetts: Jones & Bartlett Learning, 2011.

KISOLTEC, 2020. Disponível em: <<https://kisoltec.com.br/produtos/reservatorio-termico>>. Acesso em 10/08/2022.

LEROY MERLIN, 2022. Disponível em: <https://www.leroymerlin.com.br/rolo-de-la-de-rocha-4,8m2-1,2x4mx50mm-biola_89514544?region=grande_sao_paulo&gclid=Cj0KCQjwwfiaBhC7ARIsAGvcPe42-IVubwsfKaiL-MbwQda3DHvNJDZOG2rHHOPJQvfv7lnnCBpGqBV4aAmwqEALw_wcB>. Acesso em 02/10/2022.

MARX, K.; ENGELS, F. Manifesto Comunista. Rio de Janeiro: Ed. Garamond, 1998.

NETO, C. B. Transferência de calor (TCL). Instituto Federal Santa Catarina, 2009. Disponível em: <https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/e/ee/TCL_Vol_II_-_Isolamento_Termico.pdf> Acesso em 01/06/2022.

NOVUS - Catálogo, 2022. Disponível em: <https://cdn.novusautomation.com/downloads/fo-lheto_termopares.pdf> Acesso em: 20/06/2022

OBRAMAX, 2021. Disponível em: <https://www.obramax.com.br/rolo-la-de-vidro-wf-4-pop-70mmx15m2-89152903.html?region_id=138911&gclid=Cj0KCQjwwfiaBhC7ARIsA-GvcPe4gLE-DmZinp5QeWDfCdCduw3F5E8g6tdM5qr-D0z1XPgYu-06KhD-QaApk4EALw_wcB>. Acesso em 02/10/2022.

OLIVEIRA, 2022. Disponível em: <<https://www.tubosoliveira.com.br/norma-astm-a106/#:~:text=ASTM%20A106%20%C3%A9%20uma%20Norma,altas%20temperaturas%2C%20entre%20outras%20aplica%C3%A7%C3%B5es.>>. Acesso em 22/11/2022

SELEGHIM, P. TC8 perda de calor em uma tubulação de água quente (piloto coursera usp). YouTube, 2018. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=-mIAcBJAECA>>. Acesso em 13/09/2022.

SAINT GOBAIN, 2022. Disponível em: <<https://www.isover.com.br/noticias/durabilidade-prova-do-tempo#:~:text=nossa%20mat%C3%A9ria%2Dprima%20oferece%20uma,que%20se%20encontra%20em%20contato.>>. Acesso em: 22/11/2022

SILVA, F. Estudo de Materiais de Isolamento Térmico Inovadores. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em construções civis) – U.PORTO Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.

THERMAL ENGINEERING, 2019. Disponível em:<<https://www.thermal-engineering.org/pt-br/engenharia-termica-2>> Acesso em: 20/06/2022

TRIMETAIS, 2015. Disponível em:<<http://trimetais.com.br/materiais/aco-1020/#:~:text=Comumente%20associado%20erroneamente%20com%20o,a%C3%A7%C3%A3o%20como%20beneficiamento%20e%20t%C3%A9mpera.>> Acesso em: 14/06/2022

TUBOSABC, Suzano SP, 2021. Disponível em:<https://www.tubosabc.com.br/tubos/tubos-de-aco-carbono-tubos-industriais-e-aplicacoes/?doing_wp_cron=1666661275.5297589302062988281250#:~:text=Os%20Tubos%20de%20A%C3%A7%C3%A3o%20Carbono%20possuem%20muita%20resist%C3%Aancia%20mec%C3%A2nica%2C%20por,leves%20e%20f%C3%A1ceis%20de%20transportar> Acesso em: 13/06/2022

UERJ, 2010. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/po/a/VbqnDfhQ3Q9VGLtyGYB-pxhv/?lang=pt&format=pdf#:~:text=A%20varia%C3%A7%C3%A3o%20de%20massa%20tamb%C3%A9m,quando%20submetido%20a%20elevadas%20temperaturas.>>. Acesso em: 22/11/2022

VA, 2022. Disponível em: <<https://www.vaisolamentotermico.com.br/isolamento-la-rocha>>. Acesso em: 22/11/2022

VILLAR, R. Os melhores software para todos os segmentos do mercado. São Paulo: 11ª Ed. 2022.

WEATHER SPARK - Clima e condições meteorológicas médias em Resende no ano todo, 2022. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/y/30466/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Resende-Brasil-durante-o-ano#:~:text=Temperatura%20m%C3%A9dia%20em%20Resende&text=A%20esta%C3%A7%C3%A3o%20fresca%20permanece%20por,26%20%C2%B0C%2C%20em%20m%C3%A9dia>> Acesso em 12/06/2022.

WEG: Catálogo Geral de Motores, 2005.

WILLTEC, 2022. Disponível em: <<https://www.willtec.com.br/indicador-temperatura#:~:text=O%20indicador%20de%20temperatura%20%C3%A9,de%20medi%C3%A7%C3%A3o%20precisa%20da%20temperatura>>. Acesso em 03/09/2022.

WORLD IRON&STEEL, China, 2017. Disponível em: <<http://pt.worldironsteel.com/news/schedule-40-seamless-steel-tubes-for-general-s-6617209.html>>. Acesso em 03/09/2022.