



BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JEFERSON BORGES DE ALMEIDA

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA APLICAÇÃO DE  
ISOLAMENTO TÉRMICO EM TANQUE DE ARMAZENANDO DE ESTIRENO.**

PORTO ALEGRE

NOVEMBRO

2022

JEFERSON BORGES DE ALMEIDA

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA APLICAÇÃO DE  
ISOLAMENTO TÉRMICO EM TANQUE DE ARMAZENANDO DE ESTIRENO**

Projeto final de curso em engenharia apresentado ao Centro Universitário Ritter dos Reis, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dra. Nathalia K. Haro

PORTO ALEGRE

NOVEMBRO

2022

JEFERSON BORGES DE ALMEIDA

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA APLICAÇÃO DE  
ISOLAMENTO TÉRMICO EM TANQUE DE ARMAZENANDO DE ESTIRENO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário Ritter dos Reis.

Porto Alegre, 14 de dezembro de 2022.

---

Prof. Dra. Nathalia K. Haro  
Centro Universitário Ritter dos Reis

---

Prof. Éverton Hansen  
Centro Universitário Ritter dos Reis

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a minha esposa e minha filha, que sempre me apoiaram em todas as etapas, sem elas nada disso seria possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a minha esposa Aline, minha fortaleza, por muitas vezes ter de se multiplicar para manter o lar, dedicando carinho e afeto a nossa filha Bella Valentina. Tenho a certeza de que sem o seu apoio não teria conquistado esta graduação.

A minha filha Bella Valentina, que muitas vezes demandou de meus cuidados e mesmo sendo uma criança entendeu e respeitou minhas necessidades, sei que ficará como legado para você, com dedicação e persistência poderá alcançar aos seus objetivos.

Aos meus pais por todo o amor e apoio, pelos valiosos ensinamentos, incentivos e apoio incondicional.

Ao Sr. Amilton Turchet pela oportunidade do primeiro emprego, e pelas primeiras diretrizes na minha carreira profissional.

O meu grande mentor Sr. André Eich, Engenheiro Mecânico, um excelente profissional, sempre me incentivando, ensinando, me auxiliando nas minhas escolhas profissionais, uma grande colega.

A minha orientadora, Professora Dra. Nathalia K. Haro, pela clareza e objetividade na apresentação dos conteúdos, esclarecimentos de dúvidas do presente trabalho assim como nas aulas ao decorrer do curso.

Aos colegas da Uniritter por ter compartilhado conhecimento e solidariedade em diversos momentos desta jornada.

E por fim, mas não menos importante, agradeço aos meus colegas de trabalho pelo companheirismo e contribuição para minha evolução.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo de viabilidade técnica e econômica para instalação de isolamento térmico em um tanque de armazenamento de estireno, com capacidade de armazenamento de 10.800 m<sup>3</sup>. Para isso a energia perdida para atmosfera foi quantificada através de mecanismos de transferência de calor, condução, convecção e radiação. Já a viabilidade econômica foi analisada através da ferramenta payback, espera-se que se obtenha o retorno do investimento em até 5 anos para se tornar atrativo o projeto. Os resultados do estudo demonstram que o período de retorno do investimento é de 2 anos e 3 meses, período esse inferior ao período estipulado pela empresa. Com esta condição atendida a análise demonstrou que há viabilidade econômica para investimento, a instalação do isolante térmico reduz a taxa de troca de calor em 85%. Por fim, o propósito do trabalho foi atendido plenamente, com a redução da troca de calor ao instalar o isolamento térmico, consequentemente reduz o consumo de energia elétrica, diminuindo os custos de produção além de contribuir para redução do efeito estufa.

.

Palavras-chave: viabilidade técnica econômica; isolamento térmico; transferência de calor.

## **ABSTRACT**

The objective of this work was to perform a technical and economic feasibility study for the installation of thermal insulation in a styrene storage tank, with a storage capacity of 10,800 m<sup>3</sup>. For this, the energy lost to the atmosphere was quantified through heat transfer mechanisms, conduction, convection and radiation. The economic viability was analyzed through the payback tool, and it is expected that a return on investment will be obtained in up to 5 years in order to make the project attractive. The results of the study show that the payback period is 2 years and 3 months, which is less than the period stipulated by the company. With this condition met, the analysis showed that there is economic viability for the investment, the installation of the thermal insulator reduces the heat exchange rate by 85%. Finally, the purpose of the work was fully met, with the reduction of heat exchange by installing thermal insulation, consequently reduces electricity consumption, reducing production costs and contributing to reducing the greenhouse effect.

Translated with [www.DeepL.com/Translator](http://www.DeepL.com/Translator) (free version)

Keywords: technical economic feasibility; thermal insulation; heat transfer.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gradiente de calor.....	16
Figura 2: Modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.....	19
Figura 3: Sentido de fluxo condutividade térmica.....	18
Figura 4: Resfriamento radiante de um sólido aquecido. ....	21
Figura 5: Tanque e acessórios - Terminologia .....	24
Figura 6: Estrutura do estireno. ....	27
Figura 7: Dados dimensionais do teto – Vista superior e vista de corte.....	30
Figura 8: Identificação de componentes do constato. ....	31
Figura 9: Temperatura média no local de instalação do equipamento .....	33
Figura 10: Associação das resistências sem isolamento térmico.....	33
Figura 11: Associação das resistências com isolamento térmico.....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados técnicos de projeto do tanque .....	25
Tabela 2: Tabela de seleção do Isolante.....	26
Tabela 3: Dados característicos dos materiais empregados no estudo. ....	32
Tabela 4: Dados dimensionais dos componentes. ....	38
Tabela 5: Coeficiente de transferência de calor combinado sem isolante térmico....	39
Tabela 6: Levantamento do fluxo de calor do tanque sem isolamento.....	40
Tabela 7: Coeficiente de transferência de calor combinado com isolante térmico....	41
Tabela 8: Levantamento do fluxo de calor do tanque com isolamento.....	42
Tabela 9: Mapa comparativo dos cenários.....	42
Tabela 10: Levantamento de lucro com conservação de energia .....	43
Tabela 11: Levantamento de custos para instalação de isolamento térmico .....	44
Tabela 12: Mapa comparativo de payback.....	42

## LISTA DE SIGLAS

$g$	—	Aceleração da gravidade $\left(\frac{m}{s^2}\right)$
$\beta$	—	Coeficiente volumétrico de expansão térmica $(K^{-1})$
$h$	—	Coeficiente de transferência de calor por convecção $\left(\frac{W}{m^2} \cdot K\right)$
$k$	—	Condutividade térmica do material $(W/m.K)$
$K_f$	—	Condutividade térmica do fluido $\left(\frac{W}{m} \cdot K\right)$
$L_c$	—	Comprimento característico da geometria $(m)$
$q$	—	Taxa de calor $(W)$
$q''$	—	Fluxo de calor $\left(\frac{W}{m^2}\right)$
$v$	—	Velocidade $\left(\frac{m}{s}\right)$
$\alpha$	—	Difusividade térmica $\left(\frac{m^2}{s}\right)$
$\mu$	—	Viscosidade dinâmica, $\left(\frac{Kg}{s} \cdot m\right)$
$\varepsilon$	—	Emissividade da superfície
$N$	—	Viscosidade cinemática $\left(\frac{m^2}{s}\right)$
$\rho$	—	Massa específica $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$
$\sigma$	—	Constante de Stefan-Boltzmann; $\left(5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}\right)$
$A$	—	Área $(m^2)$
$T_s$	—	Temperatura de superfície ( $^{\circ}C$ ou $K$ )
$T_{\infty}$	—	Temperatura do fluido suficientemente longe da superfície ( $^{\circ}C$ ou $K$ )
$Gr$	—	Número de Grashof
$Nu$	—	Número de Nusselt
$Pr$	—	Número de Prandtl
$Ra_L$	—	O número de Rayleigh
$m$	—	O metro é a unidade de medida de comprimento do Sistema Internacional de Unidades
$W$	—	O watt é a unidade de potência do Sistema Internacional de Unidades
$R_T$	—	Resistência total
Eq.	—	Equação
$\Delta T$	—	Diferença de temperatura ( $^{\circ}C$ ou $K$ )

$R_{Total}$  — Resistência total ( $^{\circ}C/W$ )

$\ln$  — Logaritmo natural

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA .....	13
1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA .....	14
1.3 OBJETIVOS .....	14
<b>1.3.1 Objetivo Geral</b> .....	14
<b>1.3.2 Objetivos Específicos</b> .....	15
1.4 JUSTIFICATIVA .....	15
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>15</b>
2.1 CALOR .....	16
2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	16
<b>2.2.1 Condução</b> .....	17
<b>2.2.2 Convecção</b> .....	18
<b>2.2.3 Radiação</b> .....	20
<b>2.2.4 Mecanismos combinados de transferência de calor</b> .....	21
<b>2.2.5 Conceito de resistência térmica</b> .....	21
2.3 TANQUE .....	23
2.4 ISOLAMENTO TÉRMICO .....	25
2.5 ESTIRENO .....	27
2.6 PERÍODO DE PAYBACK .....	27
<b>3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>29</b>
3.1 DADOS DIMENSIONAIS DOS COMPONENTES DO EQUIPAMENTO .....	29
3.2 OBTENÇÃO DE DADOS DE ENTRADA PARA IDENTIFICAÇÃO DE FLUXO DE CALOR .....	31
3.3 DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE CALOR .....	33
3.4 LEVANTAMENTO DE CUSTOS. ....	36
3.5 AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA. ....	36
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>38</b>
4.1 TRANFERÊNCIA DE CALOR .....	38
4.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECÔNOMICA .....	43
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A performance de uma empresa está associada a um sistema de gestão, como por exemplo a ISO 9001:2015. Esse sistema tem como objetivo a padronização de seus processos com a intenção de melhorar seu desempenho global e conseqüentemente aumentar a lucratividade, para iniciativas de desenvolvimento sustentável.

Tendo em vista diretrizes estabelecidas por estas certificações, o processo como um todo é reavaliado constantemente para buscar oportunidades de melhoria. Neste estudo foi avaliado o impacto na redução do consumo de energia ao instalar isolante térmico para conservação de energia em um tanque.

Segundo a notícia fornecida pelo portal Agência Nacional de Notícias da Indústria, publicado em setembro de 2021, a energia é um dos maiores custos de produção. E ela é responsável pela produção de trabalho, logo, qualquer trabalho realizado por máquinas ou equipamentos está consumindo energia sendo ela mecânica (movimento), térmica, elétrica (potencial elétrico), química (reações químicas) ou nuclear (desintegração do núcleo).

Neste estudo foi dado ênfase na energia térmica(calor), precisamente na conservação de energia. Para isso foi utilizado os princípios da termodinâmica, e os mecanismos de transferência de calor, identificando e quantificando a energia transferida de um sistema para o outro através da diferença de temperatura.

Com a perda de energia e os materiais quantificados foi realizada uma análise de viabilidade econômica através da ferramenta financeira payback identificando o período de recuperação do investimento conforme proposto por Gitman (1997).

### 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Com a globalização não há fronteiras para comercialização de produtos e serviços, aumentando a competitividade, requerendo uma avaliação contínua de seus métodos e processos para o aumento da produção e diminuição seus custos produtivos, cumprindo diretrizes de programas internacionais de sustentabilidade tanto para quem produz ou consome. Por essa razão o estudo em questão elegeu um tanque, com um sistema agregado de refrigeração para manter a temperatura a 7°C. Este tanque é movido a energia elétrica e está instalado em uma região que tem a

temperatura média externa de 19,9°C. Por essa condição climática e pelo fato desse equipamento não possuir isolamento térmico, há uma perda constante de calor para atmosfera, gerando um alto consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, onerando o custo produtivo.

Como muitas vezes o custo produtivo não permite que o produto seja competitivo economicamente, pode se atribuir valores sociais a ele que venham a ser um diferencial na hora da comercialização, como a sustentabilidade (uma das maiores preocupações mundiais na atualidade). Como na concepção original do projeto o equipamento não tinha esta preocupação, o estudo irá reavaliar as condições de projeto do equipamento. Por outro lado, muitas vezes o investimento para este tipo de sistema pode ser alto, e para reduzir ao máximo os custos de investimento, o projeto deverá utilizar dados característicos da região em que o equipamento opera como os valores de implementação e condições de operação.

Desta forma, a questão de pesquisa proposta por este trabalho é:

É viável economicamente a instalação de um isolamento térmico em um tanque de armazenamento de estireno?

## 1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O estudo centralizará a análise nos fenômenos de transferência de calor presentes no costado e teto do tanque devido o equipamento já estar em operação. O isolante térmico selecionado foi o poliuretano expandido indicado na norma técnica da Petrobras N-894(2012) como o melhor custo-benefício para condições de trabalho semelhantes ao do estudo. Esta norma é uma referência no tema abordado. Para aceitação do investimento se determinou como payback de 5 anos, uma vez que é um tempo praticado pela companhia proprietária do equipamento.

## 1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral e específicos serão apresentados a seguir.

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste Trabalho compreende em analisar a viabilidade econômica para instalação de isolante térmico para conservação de energia térmica em um

tanque de armazenamento de Estireno que tem um sistema de refrigeração associado. A metodologia de cálculo está fundamentada em normas técnicas vigentes e bibliografia de referências do tema abordado.

Reduzir o custo operacional aumentando a lucratividade, através de instalação de isolante térmico para conservação de energia, reduzindo assim o consumo de energia elétrica.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos constituem-se:

- Quantificar a perda de energia nas condições atuais do equipamento.
- Quantificar a economia de energia ao instalar o isolante térmico.
- Apresentar os custos de implementação.
- Identificar o payback para possibilitar a análise de viabilidade econômica.

## **1.4 JUSTIFICATIVA**

Nos tempos atuais a sustentabilidade é um dos maiores desafios de qualquer tipo de indústria ou setor econômico em qualquer parte do mundo. Os padrões atuais de consumo e de produção de energia, não são sustentáveis. Recentemente, o secretário geral da ONU (GUTERRES, 2022), avaliou os resultados de um relatório publicado pela Organização Meteorológica Mundial e indicou que o empenho deve ser sete vezes maior para alcançar as metas do Acordo de Paris. O Acordo de Paris é um compromisso mundial sobre as alterações climáticas e estabelece metas para a redução da emissão de gases do efeito estufa.

Logo, este estudo se justifica ao avaliar a possibilidade de redução do consumo de energia elétrica ao conservar energia térmica no tanque de armazenamento diminuindo o tempo de operação do sistema de refrigeração, conseqüentemente atenuando a emissão de gases contribuintes para o efeito estufa.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

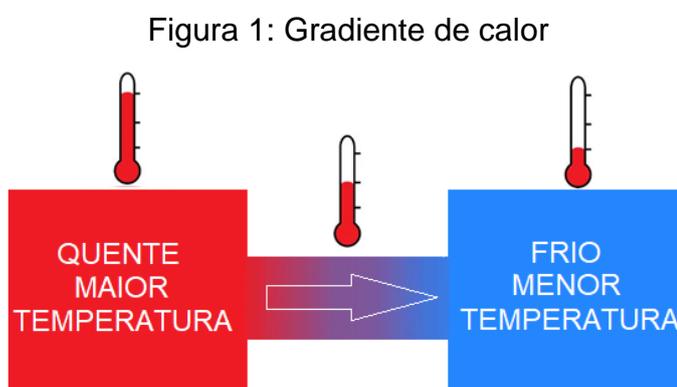
Neste capítulo são apresentados fundamentos teóricos para auxiliar no entendimento e desenvolvimento do trabalho.

## 2.1 CALOR

Segundo Çengel e Ghajar (2012) o calor é definido como a forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro em consequência da diferença de temperatura entre eles.

O calor sempre fluíra do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura.

Sempre que houver uma diferença de temperatura, ou seja, uma força motriz em um meio (ou em diferentes meios) ocorrerá o transporte de energia na forma de calor, como pode ser visto na Figura 01.



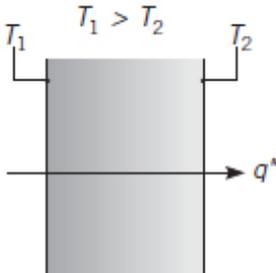
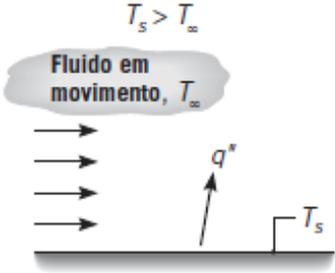
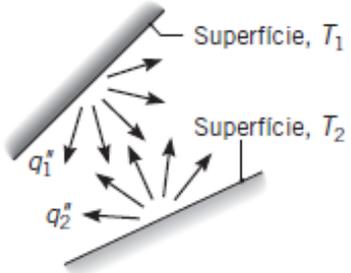
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

## 2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Transferência de calor pode ser definida como a transmissão de energia térmica de uma região para outra, existindo gradiente de temperatura entre elas. Considerando que existem diferenças nas temperaturas de tudo sobre o universo, o fenômeno de fluxo de calor é tão universal quanto aqueles associados às atrações gravitacionais. Entretanto, ao contrário da gravidade, o fluxo de calor é governado não por uma relação única, mas por uma combinação de várias leis independentes da física (PRINCÍPIOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR, 2015).

De acordo com incropera(2019) existem três mecanismos básicos de transferência de calor, condução, convecção e radiação (Figura 2).

Figura 2: Modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

Condução ao longo de um sólido ou de um fluido estacionário	Convecção de uma superfície para um fluido em movimento	Troca líquida de calor por radiação entre duas superfícies
		

Fonte: (INCROPERA, 2019)

A quantidade de calor transferido durante determinado processo é representada por  $q$ . A quantidade de calor transferido por unidade de tempo é denominada taxa de transferência de calor. A taxa de transferência de calor tem como unidade J/s, que é equivalente a W (ÇENGEL E GHAJAR, 2012).

### 2.2.1 Condução

A condução, representa a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas menos energéticas de uma substância devido à interação entre essas partículas (INCROPERA, 2019).

A condução pode ocorrer em sólidos, e fluídos estagnados. Esse o fenômeno acontece devido às colisões e difusões das moléculas em seus movimentos aleatórios. Nos sólidos, ela acontece por causa da combinação das vibrações das moléculas em rede, e a energia é transportada por elétrons livres (ÇENGEL E GHAJAR, 2012). A capacidade de sólidos de conduzir calor varia diretamente com a concentração de elétrons livres. A taxa de condução de calor por um meio é depende da geometria, da espessura e do tipo de material.

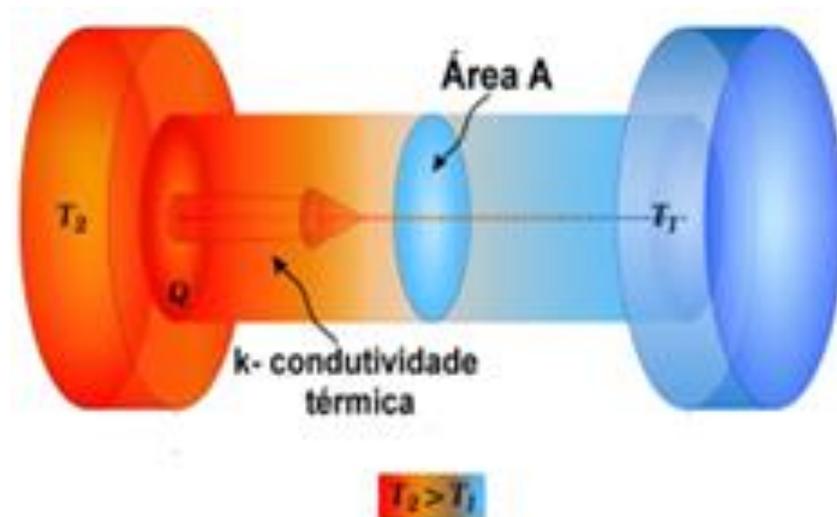
Para quantificar os processos de transferência de calor podem se utilizar equações de taxa apropriadas. Essas equações podem ser usadas para calcular a quantidade de energia transferida por unidade de tempo. Para a condução térmica, a equação da taxa é conhecida como lei de Fourier, a equação (Equação 2.1).

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} (W) \quad \text{Eq. 2-1}$$

Onde  $k(\frac{W}{m.K})$  é a condutividade térmica do material,  $A(m^2)$  é área e  $\frac{dT(s)}{dx(m)}$  é o gradiente de temperatura. A condutividade térmica do material em geral varia com a temperatura. Entretanto, resultados suficientemente precisos podem ser obtidos usando um valor constante para condutividade térmica e uma temperatura média.

O calor é conduzido no sentido (Figura 3) da diminuição da temperatura, portanto o gradiente de temperatura é negativo quando o calor é conduzido na direção positiva do eixo x. O sinal negativo na Eq. 2-1 assegura que a transferência de calor na direção positiva de x seja um valor positivo. A equação Eq. 2-1 é a forma vetorial da equação de Fourier (WELTY, RORRER, FOSTER, 2017).

Figura 3: Sentido de fluxo condutividade térmica



Fonte: Brasilescola (2022)

### 2.2.2 Convecção

A transferência de calor por convecção envolve a troca de energia proporcionada pela diferença de temperatura entre fluidos. Há dois tipos de convecção, forçada, em que um fluido escoia por uma superfície sólida impulsionado por um agente externo, tais como um ventilador ou uma bomba, e convecção livre ou

natural, em que um fluido mais quente (ou mais frio) próximo a um contorno sólido provoca circulação por causa da diferença de densidade resultante da variação de temperatura em toda a região do fluido (WELTY, RORRER, FOSTER, 2017).

O movimento do fluido ocorre devido às forças de empuxo no seu interior. O empuxo, por sua vez, é devido à presença combinada de um gradiente de massa específica no fluido e de uma força de corpo proporcional à massa específica. Na prática, a força de corpo é geralmente gravitacional, embora ela possa ser uma força centrífuga em equipamentos em que há rotação de fluidos (INCROPERA, 2019).

A equação 2-2 representa a taxa de transferência convectiva de calor.

$$q_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (W) \quad \text{Eq. 2-2}$$

onde  $q(W)$  é o fluxo de calor convectivo,  $A(m)$  é a área da superfície por meio da qual a transferência de calor por convecção ocorre,  $T_s(^{\circ}C)$  é a temperatura da superfície, e  $T_\infty(^{\circ}C)$  é a temperatura do fluido suficientemente longe da superfície.

Para calcular o fluxo de calor por convecção de natural deve-se utilizar alguns números adimensionais como:

o número de Grashof ( $Gr$ ) (Eq. 2-3), é um número adimensional que representa a razão entre a força de empuxo e a força viscosa que atua no fluido (INCROPERA, 2019).

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \quad \text{Eq. 2-3}$$

Outro número adimensional importante é o número de Prandtl ( $Pr$ ), (Eq. 2-4). Ele é definido como a razão entre a viscosidade cinemática, também chamada de difusividade de momento,  $\nu$ , e a difusividade térmica  $\alpha$ . Ele é, conseqüentemente, uma propriedade do fluido. O número de Prandtl fornece uma medida da efetividade relativa dos transportes, por difusão, de momento e de energia no interior das camadas-limite de velocidade e térmica, respectivamente (INCROPERA, 2019).

$$Pr = \frac{\text{difusidade molecular de quantidade de movimento}}{\text{difusidade molecular térmica}} = \frac{\nu}{\infty} = \frac{\mu c_p}{k} \quad \text{Eq. 2-4}$$

A complexidade do movimento do fluido na convecção natural torna muito difícil a obtenção de relações analíticas simples para a transferência de calor por meio da resolução das equações que regem o movimento e a energia. Sendo assim, se torna necessário a utilização de correlações empíricas para a determinação do coeficiente convectivo. Essas correlações são representadas pelo número de Nusselt ( $Nu$ ), através da Eq. 2-5.

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = C(Gr_L Pr)^n = C Ra_L^n \quad \text{Eq. 2-5}$$

onde  $Ra_L$  é o número de Rayleigh (Eq. 2-6), que é o produto do número de Grashof, que descreve a relação entre a velocidade e a viscosidade dentro do fluido.

$$Ra_L = Gr Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu\alpha} \quad \text{Eq. 2-6}$$

### 2.2.3 Radiação

O processo de transferência de calor por radiação ocorre através da troca de energia por ondas eletromagnéticas entre corpos que apresentem gradiente de temperatura e não necessita de um meio físico para se propagar. Sendo assim a transferência de calor por radiação térmica não exige a presença de um meio material para ocorrer e é a única forma de transferência de calor que pode ocorrer no vácuo, o mecanismo pode ser visto na Figura 4 (INCROPERA, 2019).

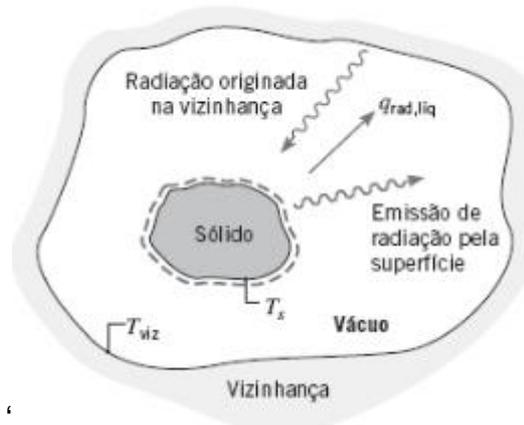
O fluxo térmico emitido por uma superfície real é menor do que aquele emitido por um corpo negro à mesma temperatura e é dado por uma propriedade radiante da superfície conhecida por emissividade. Com valores na faixa de zero a um ( $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ), essa propriedade fornece uma medida da eficiência na qual uma superfície emite energia em relação ao corpo negro (INCROPERA, 2019).

A taxa de transferência de calor por radiação é expressa pela lei de Stefan-Boltzmann (Eq. 2-7).

$$q_{\text{radiação}} = \varepsilon A \sigma (T_{\text{Superfície}}^4 - T_{\text{Vizinhança}}^4) \quad \text{Eq. 2-7}$$

A taxa de fluxo de calor  $q$  estará em watts se a área  $A$  estiver em metros quadrados e as temperaturas em kelvin;  $\sigma$  é uma constante dimensional com um valor de  $5,67 \times 10^{-8} (\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$  (PRINCÍPIOS DE TRANFERÊNCIA DE CALOR, 2015).

Figura 4: Resfriamento radiante de um sólido aquecido.



Fonte: (INCROPERA, 2019)

## 2.2.4 Mecanismos combinados de transferência de calor

Para situações em que a transferência de calor ocorre por convecção e por radiação na superfície externa de parede e teto, chamados condutâncias de superfície, pode-se utilizar um coeficiente convectivo combinado apresentado por Çengel e Ghajar (2012).

Como o lado externo do equipamento estudado no presente trabalho atende esta condição, foi utilizado os valores propostos por Çengel e Ghajar (2012).

## 2.2.5 Conceito de resistência térmica

Em sistemas de transferência de calor sem geração interna de energia térmica, com propriedades constantes, condução unidimensional e com geometrias comuns (plana, cilíndrica e esférica). Pode-se adotar o conceito de resistência térmica para determinar a taxa de transferência de calor.

Em particular, existe uma analogia entre as difusões de calor e de carga elétrica. Da mesma forma que uma resistência elétrica está associada à condução de eletricidade, uma resistência térmica pode ser associada à condução de calor. Definindo resistência como a razão entre um potencial motriz e a correspondente taxa de transferência (INCROPERA, 2019).

Segundo o incropera(2019), pode-se utilizar em parede plana a equação 2-8 para Condução, a equação 2-9 para convecção.

$$R_{T,condução} = \frac{L}{K.A} \quad \text{Eq. 2-8}$$

$$R_{T,convecção} = \frac{L}{h.A} \quad \text{Eq. 2-9}$$

Já para resistências cilíndricas, a equação 2-10 para condução a equação 2-11 para convecção.

$$R_{T,condução} = \frac{\ln\left(\frac{r_{maior}}{r_{menor}}\right)}{2\pi Lk} \quad \text{Eq. 2-10}$$

$$R_{T,convecção} = \frac{1}{h(2\pi rL)} \quad \text{Eq. 2-11}$$

onde  $R_T \left(\frac{^{\circ}C}{W}\right)$  é a resistência térmica total, expressa pela equação 2-12.

$$R_T = R_{T,convecção} + R_{T,condução} \quad \text{Eq. 2-12}$$

Logo, a razão  $\frac{\Delta T}{R_{Total}} = q$ , desta forma o fluxo de calor pode ser determinado através da equação 2-13

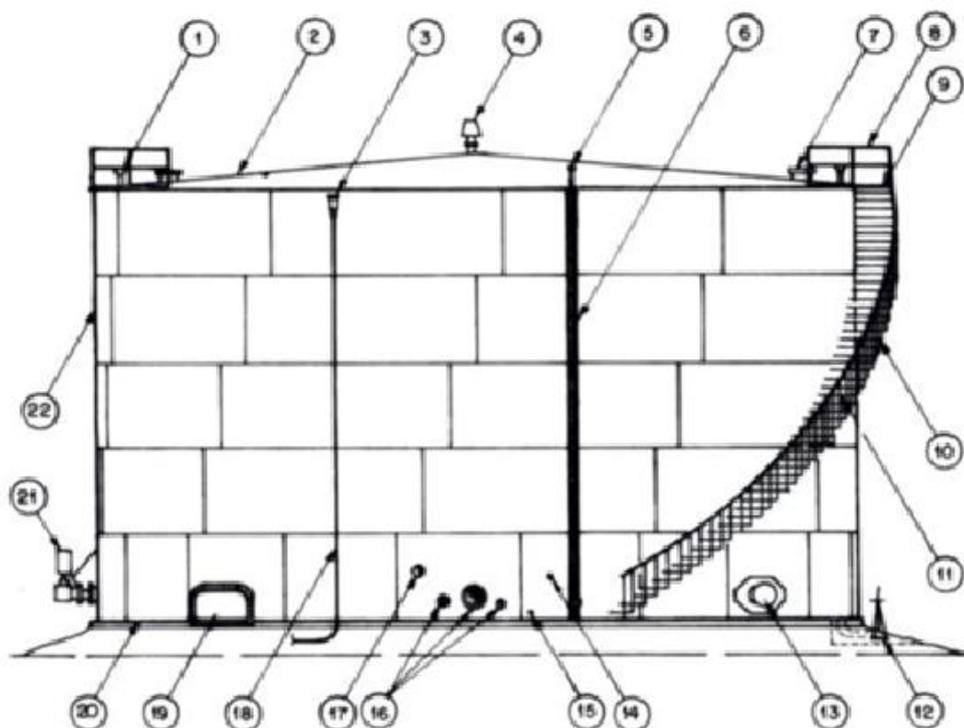
$$q = \frac{\Delta T}{R_{Total}} = \frac{\Delta T}{\sum R_{Condução} + \sum R_{Convecção} + \sum R_{Radiação}} \text{ Eq. 2-13}$$

### 2.3 TANQUE

Segundo a norma Petrobras N-270(2020), um tanque pode ser projetado para armazenamento de petróleo e seus derivados.

Os componentes do tanque podem ser identificados através da Figura 5.

Figura 5: Tanque e acessórios – Terminologia



- |                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| 1 - Escotilhas de medição            | 12 - Dreno de fundo                       |
| 2 - Chapa do teto                    | 13 - Boca de visita no costado            |
| 3 - Câmara de espuma                 | 14 - Termômetro                           |
| 4 - Respiro                          | 15 - Saída de condensado                  |
| 5 - Caixas de selagem de gases       | 16 - Bocais de entrada e saída de produto |
| 6 - Régua externa do medidor de bóia | 17 - Entrada de vapor de aquecimento      |
| 7 - Bocas de visita no teto          | 18 - Tubulação de espuma                  |
| 8 - Corrimão do teto                 | 19 - Porta de limpeza                     |
| 9 - Plataforma da escada             | 20 - Chapa do fundo                       |
| 10 - Escada helicoidal de costado    | 21 - Misturador                           |
| 11 - Corrimão                        | 22 - Costado                              |

Fonte: NBR – 7821

A Tabela 1 apresenta dados de operação e código de projeto para o tanque analisado no estudo.

Tabela 1: Dados técnicos de projeto do tanque

AREA:		SEÇÃO:	
SERVIÇO: <b>ARMAZENAMENTO DE ESTIRENO</b>		ITEM Nº	
FABRICANTE:	MODELO:	QUANTIDADE: <b>1</b>	
<b>1</b>	<b>DADOS DE PROJETO</b>	<b>MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO</b>	
2	Código: <b>API Std. 650, 13ª Edição (2020)</b>	Costado:	<b>ASTM A36</b>
3	Tipo: <b>FUNDO PLANO E DOMO AUTOPORTANTE (NOTA 6)</b>	Teto:	<b>ASTM A36</b>
4	Capacidade: Total: <b>10800</b> m <sup>3</sup>	Fundo:	<b>ASTM A36</b>
5	Útil: <b>10300</b>	Flanges (Bocais):	<b>ASTM A105</b>
6	Fluido: <b>ETILBENZENO / ESTIRENO</b>	Pesoço dos Bocais:	<b>ASTM A106-Gr.B</b>
7	Densidade: <b>859 (EB) / 916 (SM)</b> kg/m <sup>3</sup>	Luvas:	<b>ASTM A105</b>
8	Viscosidade: <b>0,53 (EB) / 0,93 (SM)</b> cP	Tubos Internos:	<b>ASTM A106-Gr.B</b>
9	Calor Específico Médio: <b>0,39 (EB) / 0,38 (SM)</b> kcal/kg.°C	Perfis Estruturais:	<b>ASTM A36</b>
10	Pressão de Vapor Temp. Máx.: <b>0,04 (EB) / 0,01 (SM)</b> kgf/cm <sup>2</sup> abs.	Parafusos / Porcas:	<b>ASTM A193 - Gr. B7 / A194- Gr 2H</b>
11	Pressão de Vapor Temp. Mín.: <b>0,019 (EB) / 0,003 (SM)</b> kgf/cm <sup>2</sup> abs.	Juntas:	<b>GRAFLEX OU SIMILAR</b>
12	Pressão: Projeto: <b>0,03</b> kgf/cm <sup>2</sup> man.	Recalque Total:	<b>N-270, ITEM 5.2 (PETROBRAS)</b>
13	Operação: <b>0,0075</b> kgf/cm <sup>2</sup> man.	Recalque Diferencial:	<b>N-270, ITEM 5.2 (PETROBRAS)</b>
14	Vácuo (man.): <b>-25,4</b> mm H2O	Placa de Identificação:	<b>Aço Inox 304</b>
15	Temperatura: Projeto: <b>65</b> °C	Prev. Proteção Catódica:	Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
16	Operação: <b>4 @ 15</b> °C	Pintura	
17	Vazão Produto:	<i>Externa:</i>	Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
18	Entrada: <b>470,0</b> m <sup>3</sup> /h	<i>Interna:</i>	Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
19	Saída: <b>400,0</b> m <sup>3</sup> /h	<i>Estrutura Metálica:</i>	Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
20	Calibração Válvula de Respiro:	Peso:	
21	Pressão (man.): <b>200</b> mm H2O	<i>Vazio:</i>	kg
22	Vácuo (man.): <b>-22</b> mm H2O	<i>Cheio d'água:</i>	kg
23	Sobrecarga Teto: <b>100</b> kgf/m <sup>2</sup>	Teste:	
24	Declividade Fundo: <b>0,125</b>	<i>Na Fábrica</i>	Sim <input type="checkbox"/> Não <input checked="" type="checkbox"/>
25	Precip. Pluviométrica Máx.: <b>83</b> mm /dia	<i>No Campo</i>	Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
26	Velocidade do Vento: <b>NBR-6123</b>	<i>Na Usina</i>	Sim <input type="checkbox"/> Não <input checked="" type="checkbox"/>
27	Isolamento Térmico: Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>	Transporte:	
28	Revestimento Interno: Sim <input type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>	<i>Inteiro:</i>	Sim <input type="checkbox"/> Não <input checked="" type="checkbox"/>
29	Sobrespessura de Corrosão:	<i>Desmontado:</i>	Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não <input type="checkbox"/>
30	Interna no Costado: <b>3</b> mm	<b>CAMISA / SERPENTINA</b>	
31	Posição (Vertical/Horizontal): <b>Vertical</b>	Tipo:	<b>NÃO SE APLICA</b>

Fonte: Documentação técnica do equipamento de posse do proprietário (2022).

## 2.4 ISOLAMENTO TÉRMICO

Os isolamentos térmicos têm por finalidade em geral reduzir as trocas de calor da para o meio ambiente, ou vice-versa. Distinguem-se em dois grupos, a frio e a quente, o marco da divisão é a temperatura média do ambiente no local de aplicação (SIVAL TELLES, 2001),

De acordo com a norma Petrobras N-894(2012), os materiais mais utilizados como isolantes térmicos a frio são o poliuretano expandido (pré-moldado, projetado ou injetado) e o poliisocianurato (pré-moldado). Esta norma já apresenta dados para uma seleção prévia do material isolante, estes dados são baseados numa análise técnica e econômica e estão apresentados na Tabela 2. O material selecionado foi o poliuretano injetado com espessura de 100mm.

Tabela 2: Tabela de seleção do Isolante

Material/ método de aplicação	Tubulações e acessórios		Tanques			Torres (Nota 4)		Trocadores e vasos (Notas 2 e 4)		Equipamentos rotativos	Esferas
	Aérea	Enterrada	Teto	Costado	Fundo	Pequeno	Médio e grande	Pequeno e médio	Grande		
Poliuretano injetado	X	X	X (Nota 1)	X (Nota 1)		X	X	X	X	X	X (Nota 1)
Poliuretano pulverizado (Nota 5)			X	X			X		X		X
Poliuretano pré- moldado	X	X	X	X	X (Nota 3)	X	X	X	X	X	X
Poliisocianurato pré-moldado	X	X	X	X	X (Nota 3)	X	X	X	X	X	X
Perlita expandida granular				X		X	X	X	X		
Vidro celular	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Espuma elastomérica	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
Aerogel	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X

NOTA 1 É permitida a injeção de poliuretano em teto e costado de tanques, e esferas desde que aplicado com formas removíveis para possibilitar a execução de barreira de vapor.

NOTA 2 Para “Cold Box”, só deve ser usado perlita expandida granular.

NOTA 3 Admitido somente para os blocos de sustentação da chapa anular do fundo do tanque.

NOTA 4 Para fins de definição de equipamentos de grande, médio e pequeno porte deve ser considerada a Tabela 3.

NOTA 5 O projeto e a garantia de desempenho são responsabilidade do aplicador, que deve informar os valores de projeto (espessura, tipo e propriedades físicas) que são verificados na aceitação do procedimento de aplicação, conforme PETROBRAS N-896.

Fonte: PETROBRAS N-894, (2012)

Segundo o fabricante ISAR, publicado em seu catálogo virtual em 2022, o poliuretano é uma espuma rígida predominantemente utilizado na técnica da isolamento térmica, resultado da reação química de um poli-isocianato que juntamente com o gás expensor são responsáveis pelo alto fator de isolamento térmico.

O poliuretano é diretamente injetado por maquinário apropriado em cavidades previamente preparadas. Ao reagirem os componentes o material expande enchendo totalmente a cavidade e aderindo firmemente as paredes da mesma. Usa-se uma camisa de chapa metálica (alumínio, aço inox, aço galvanizado) para formar a face externa da cavidade onde o material é injetado.

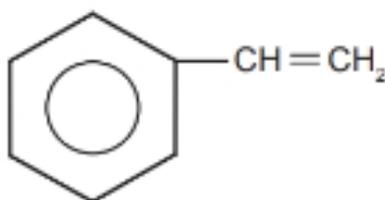
## 2.5 ESTIRENO

O estireno (Figura 6) é um hidrocarboneto com ponto de ebulição de 145 °C e ponto de solidificação de -30,6 °C. Quando puro, é incolor e apresenta odor agradável e adocicado, mas quando está contaminado com aldeídos (formados quando o estireno fica exposto ao ar livre) fica com odor marcante, (EDILENE, LEANDRO, 2015).

O estireno pode ser obtido a partir de vários métodos, tais como desidratação de álcoois, pirólise do acetileno, pirólise de hidrocarbonetos, entre outros. Entretanto, o método mais empregado consiste na desidrogenação do Etilbenzeno, método produtivo utilizado na empresa do presente estudo.

A desidrogenação do etilbenzeno ocorre pela ação do calor e na presença de óxidos metálicos, tais como óxido de zinco, cálcio, magnésio, ferro ou cobre. A temperatura do sistema deve ser da ordem de 600 a 800 °C e a pressão reduzida, pois a reação é exotérmica, com o aumento de volume reagido.

Figura 6: Estrutura do estireno.



Fonte: Termoplásticos - Estruturas, Propriedades e Aplicações (2015)

## 2.6 PERÍODO DE PAYBACK

Segundo Gitman (2010), o período de payback é prazo exigido para que uma empresa recupere o investimento inicial em um projeto. É calculado com base em suas entradas de caixa e são normalmente usados para avaliar propostas de investimento de capital.

O período de payback pode ser encontrado dividindo-se o somatório do investimento inicial com o custo de manutenção durante a vida útil prevista pelo lucro previsto em um determinado período. Simplificando, é o tempo necessário para que os lucros obtidos com um projeto igualem ou superem seu investimento inicial.

No presente trabalho a duração do período máximo aceitável de payback foi de 5 anos. Este prazo foi determinado pelo proprietário do equipamento e corresponde a um quarto da vida útil do isolamento térmico que foi estudado.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

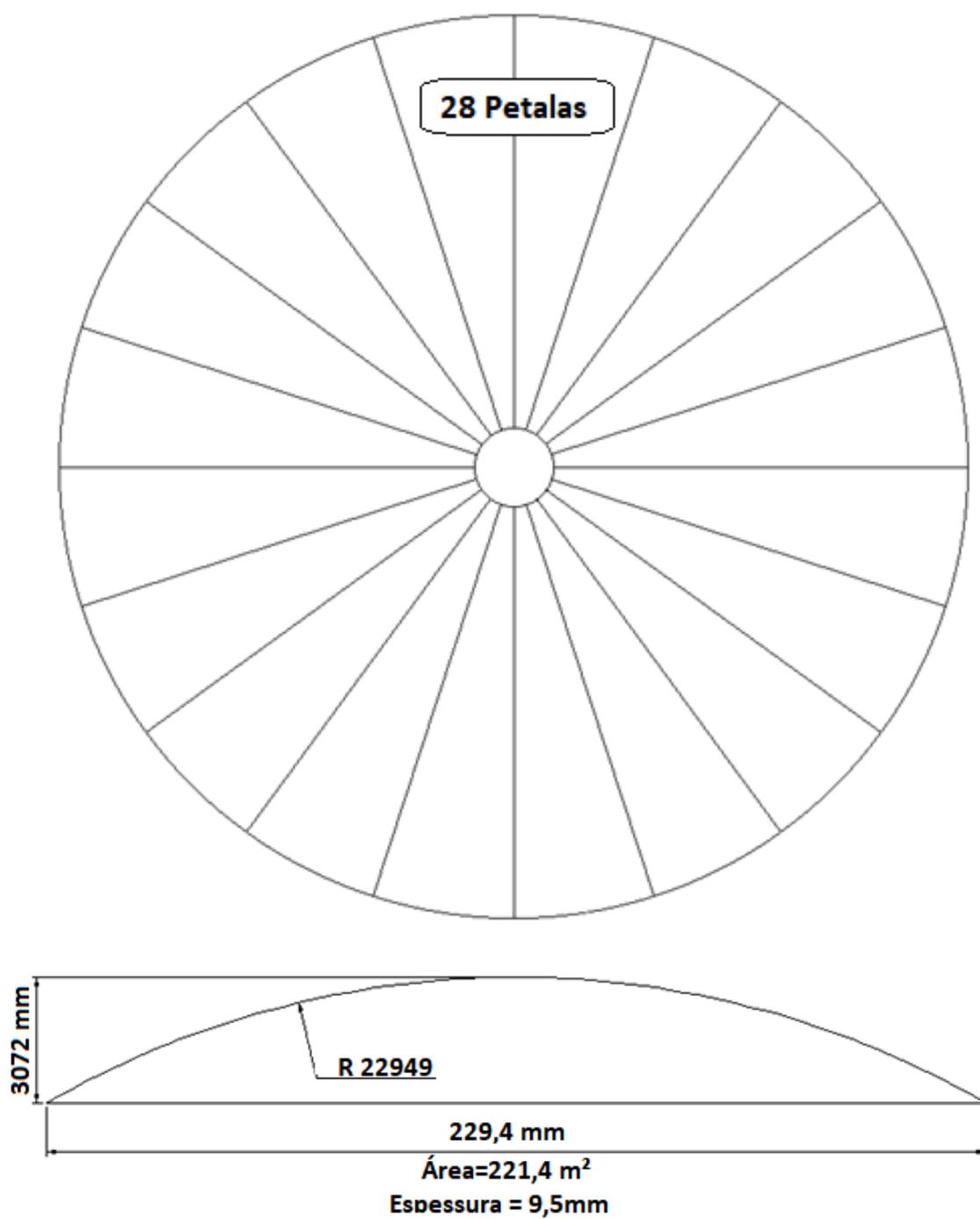
Neste capítulo são descritas as metodologias utilizadas para a coleta de dados e obtenção de resultados deste trabalho de conclusão de curso. Compreendem em pesquisa de normas correlacionadas ao tema abordado, dados tabulados e metodologia de cálculos referenciadas em bibliografias de referência.

Primeiramente foi identificado a perda de energia por fluxo de calor, na sequência foi identificado os custos associados ao isolamento concluído a análise de viabilidade econômica.

#### 3.1 DADOS DIMENSIONAIS DOS COMPONENTES DO EQUIPAMENTO.

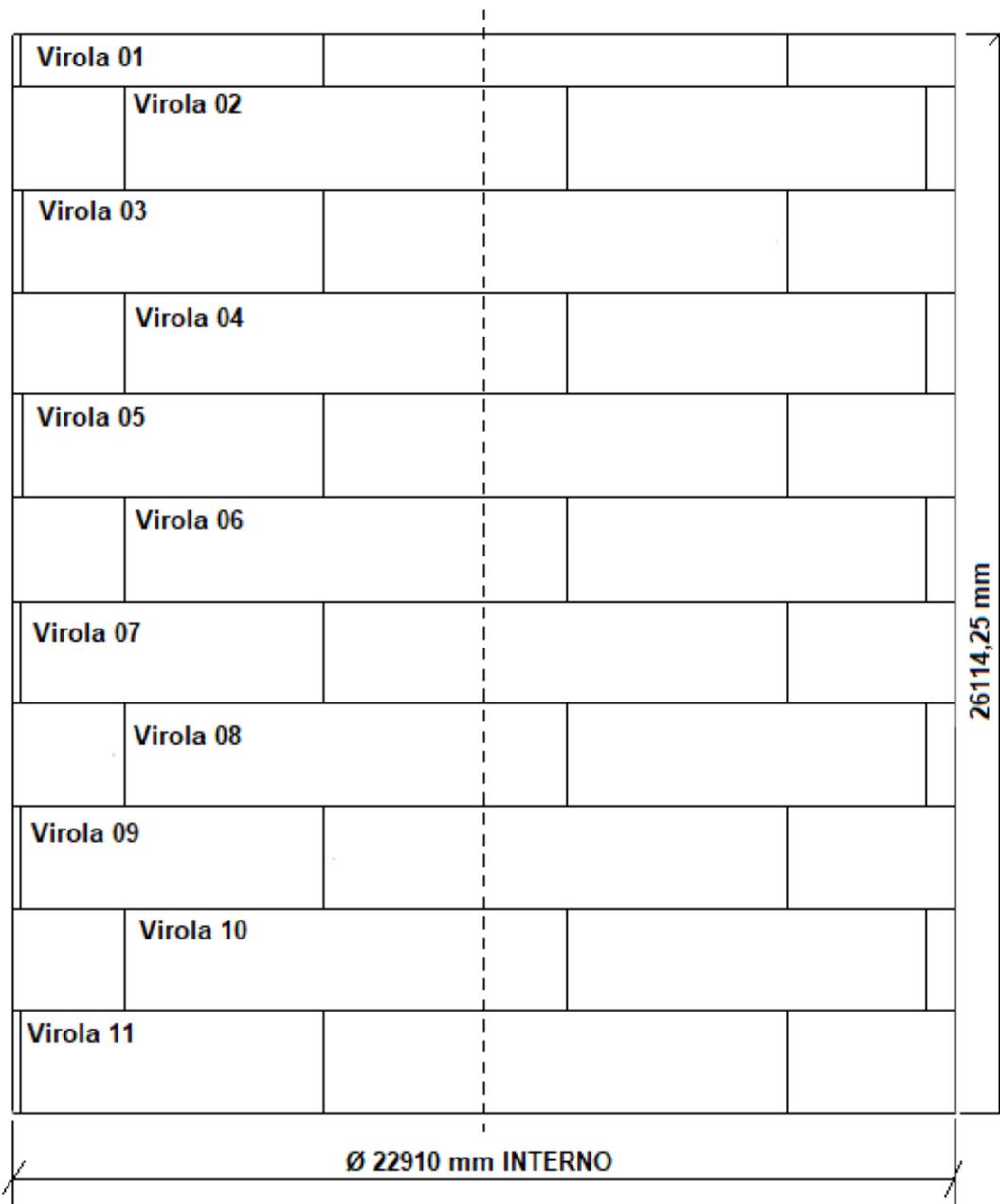
O tanque de armazenamento estudado no presente trabalho encontra-se em operação em uma indústria petroquímica localizada no sul do país. A Figura 7 e a Figura 8 apresentam as dimensões necessárias para possibilitar a identificação das áreas dos componentes do teto e costado. Logo os dados aqui apresentados estão em conformidade com desenhos mecânicos dos equipamentos em operação.

Figura 7: Dados dimensionais do teto – Vista superior e vista de corte.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 8: Identificação de componentes do constato.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

### 3.2 OBTENÇÃO DE DADOS DE ENTRADA PARA IDENTIFICAÇÃO DE FLUXO DE CALOR.

Os dados das condições climáticas do local em que o equipamento se encontra instalado (Figura 9) foram obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os valores foram uma média entre os anos de 1991-2020. O INMET é Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. É um órgão público administrado pelo governo, tem como atribuição o monitoramento e divulgação dos resultados de previsão do tempo,

previsão do clima e armazenamento dos resultados históricos obtidos ao longo dos anos.

Figura 9: Temperatura média no local de instalação do equipamento.

Normal Climatológica do Brasil 1991-2020														
Temperatura Média Compensada Mensal e Anual (°C)														
Nome da Estação	UF	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Média Anual
PORTO ALEGRE	RS	25,0	24,7	23,5	20,7	17,2	14,8	14,1	15,7	17,2	19,7	21,7	24,0	19,9

Fonte: INMET, (2022)

Os dados físico-químicos dos materiais empregados no estudo foram obtidos a partir de tabelas disponíveis na literatura (Çengel e Ghajar, 2012).

A Tabela 3 apresenta os materiais empregados no estudo com seus dados físico-químicos.

Tabela 3: Dados característicos dos materiais empregados no estudo.

Descrição	Condutividade térmica (W/m.K)	Coefficiente convectivo combinado W/m <sup>2</sup> .K	Página	Tabela
Aço	60,5	-	869	A-3
Poliuretano	0,023	-	874	A-6
AR -Teto Sem isolamento	-	6,13	186	3-9
AR -Teto Com isolamento	-	1,25	186	3-9
AR- COSTADO Sem isolamento	-	8,29	186	3-9
AR- COSTADO Com isolamento	-	3,35	186	3-9

Fonte: Çengel e Ghajar, 2012

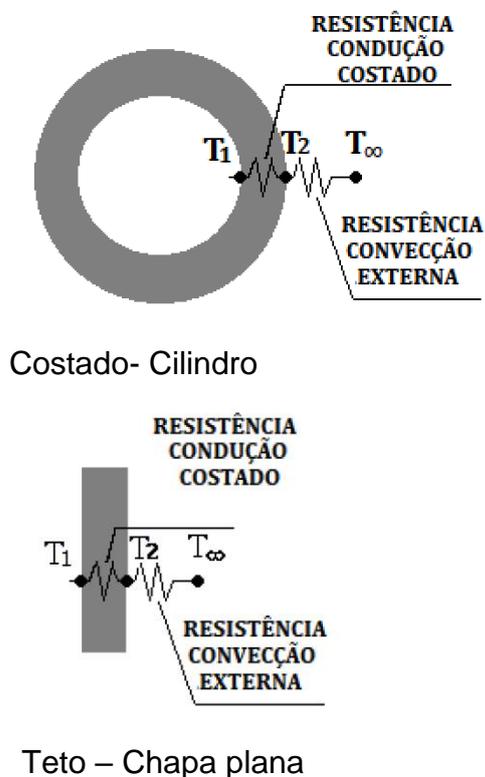
### 3.3 DETERMINAÇÃO DO FUXO DE CALOR

As Figura 7 e Figura 8 apresentaram as dimensões necessárias para possibilitar a identificação das áreas dos componentes do teto e costado. Logo os

dados aqui apresentados estão em conformidade com desenhos mecânicos dos equipamentos

Já a Figura 10 apresenta a identificação dos mecanismos de transferências de calor do equipamento sem isolamento térmico. Foi encontrado o mecanismo de condução chapa metálica do costado e teto e convecção no lado externo. No lado interno não foi considerado convecção, pois o fluido interno está em regime estacionário, portanto a temperatura da parede interna se mantém uniforme.

Figura 10: Associação das resistências sem isolamento térmico



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Com base no mecanismo exposto na figura 10, o fluxo de calor foi obtido através da equação 3-1 para o costado, equação 3-2 para o teto e para a taxa de calor total a equação 3-3.

$$q = \frac{\Delta T}{R_{Total}} = \frac{T_{\infty} - T_1}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L K_1} + \frac{1}{h(2\pi r_1 L)}} \quad \text{Eq. 3-1}$$

$$q = \frac{\Delta T}{R_{Total}} = \frac{T_{\infty} - T_1}{\frac{L}{K_1 \cdot A} + \frac{1}{h \cdot A}} \quad \text{Eq. 3-2}$$

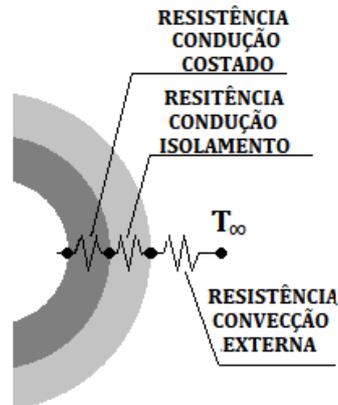
$$q_{total} = \sum q_{componentes} \quad \text{Eq. 3-3}$$

Onde:

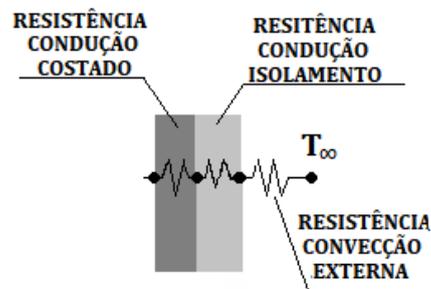
- $T_1$  — Temperatura de superfície ( $^{\circ}C$ )
- $T_{\infty}$  — Temperatura do fluido suficientemente longe da superfície ( $^{\circ}C$ )
- $h$  — Coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ )
- $K_1$  — Condutividade térmica da chapa metálica do costado e teto ( $W/m \cdot K$ )
- $\Delta T$  — Diferença de temperatura ( $^{\circ}C$ )
- $R_{Total}$  — Resistência total ( $^{\circ}C/W$ )
- $A$  — Área ( $m^2$ )
- $ln$  — Logaritmo natural
- $q$  — Taxa de calor ( $W$ )

Já a Figura 11 apresenta a identificação dos mecanismos de transferências de calor do equipamento com isolamento térmico. Foi encontrado o mecanismo de condução chapa metálica do costado e teto, condução no isolante térmico e convecção no lado externo. No lado interno não foi considerado convecção, pois o fluido interno está em regime estacionário, portanto a temperatura da parede interna se mantém uniforme.

Figura 11: Associação das resistências com isolamento térmico



Costado- Cilindro



Teto – Chapa plana

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Com base no mecanismo exposto na Figura 11, o fluxo de calor foi obtido através da equação 3-4 para o costado, equação 3-5 para o teto e para a taxa de calor total a equação 3-3.

$$q = \frac{\Delta T}{R_{Total}} = \frac{T_{\infty} - T_1}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_2} + \frac{1}{h(2\pi r_1 L)}} \quad \text{Eq. 3-4}$$

$$q = \frac{\Delta T}{R_{Total}} = \frac{T_{\infty} - T_1}{\frac{L}{K_1 \cdot A} + \frac{L}{K_2 \cdot A} + \frac{1}{h \cdot A}} \quad \text{Eq. 3-5}$$

Onde:

$T_1$	—	Temperatura de superfície ( $^{\circ}C$ )
$T_{\infty}$	—	Temperatura do fluido suficientemente longe da superfície ( $^{\circ}C$ )
$h$	—	Coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\frac{W}{m^2} \cdot K$ )
$K_1$	—	Condutividade térmica da chapa metálica do costado e teto ( $W/m.K$ )
$K_2$	—	Condutividade térmica do isolante térmico ( $W/m.K$ )
$\Delta T$	—	Diferença de temperatura ( $^{\circ}C$ )
$R_{Total}$	—	Resistência total ( $^{\circ}C/W$ )
$A$	—	Área ( $m^2$ )
$ln$	—	Logaritmo natural
$q$	—	Taxa de calor ( $W$ )

### 3.4 LEVANTAMENTO DE CUSTOS.

Para o levantamento de custos relacionados a instalação do isolamento térmico foram considerados valores do contrato vigente com modalidade de preços unitários que a empresa proprietária do equipamento tem com a construtora para fornecimento de materiais e montagem de isolamento e montagem e locação de andaime tubular. Logo a precisão dos valores é bastante confiável devido ser um contrato com vigência até final de 2024, sendo assim os valores são exequíveis para este tipo de empreendimento.

Como a empresa é autoproductora e autossuficiente na geração de energia elétrica os valores utilizados para o estudo foi uma média dos últimos doze meses dos custos de produção,

### 3.5 AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA.

Para a viabilidade econômica foi utilizado a ferramenta financeira payback, o período de recuperação do investimento. Para uma empresa investir em um novo projeto, é necessário investimento financeiro, por esse motivo quanto mais rapidamente se obtiver o retorno do valor investido, mais atraente foi a sua implantação para a organização.

Segundo Gitman (2010), o payback é o tempo necessário para que a empresa recupere o investimento inicial em um projeto, calculando a partir das entradas de

caixa. Esse tempo pode ser maior ou menor e esse fator é levado em consideração na tomada de decisão. De acordo com Weston e Brigham (2000), foi o primeiro método formal usado para avaliação de projetos. Acredita-se que tal técnica seja uma das mais conhecidas e utilizadas pelas organizações porque é de fácil entendimento e não exige a utilização de cálculos complexos.

Para calcular o tempo de retorno (payback) de um investimento, basta somar os lucros durante o período de payback e subtrair o custo inicial de implantação, manutenção e operação do sistema. No estudo em questão espera-se um período de payback menor do que 5 anos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos para o problema proposto pelo trabalho. Inicialmente foi exposto os resultados encontrados para transferência de calor e posteriormente os dados para viabilidade econômica.

### 4.1 TRANFERÊNCIA DE CALOR

Para determinar o fluxo de calor primeiramente foi feito o levantamento dos dados geométricos do equipamento. Os valores dimensionais são apresentados na Tabela 4. Os componentes do tanque considerados para os cálculos foram o costado e o teto.

Tabela 4: Dados dimensionais dos componentes.

Componentes	Espessura (m)	Comprimento (m)	ALTURA (m)	Área total (m <sup>2</sup> )
Teto	0,0095	-	-	221,4
Virola 1	0,00635	71,97	1,23	88,85
Virola 2	0,00635	71,97	2,51	180,65
Virola 3	0,0079	71,97	2,46	177,06
Virola 4	0,0095	71,97	2,46	177,06
Virola 5	0,0127	71,97	2,51	180,65
Virola 6	0,0127	71,97	2,51	180,65
Virola 7	0,0158	71,97	2,46	177,06
Virola 8	0,0158	71,97	2,46	177,06
Virola 9	0,0191	71,97	2,51	180,65
Virola 10	0,0191	71,97	2,46	177,06
Virola 11	0,0222	71,97	2,51	180,65

**Área Total = 2098 m<sup>2</sup>**

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Devido ao tamanho do equipamento a área encontrada foi 2098 m<sup>2</sup>, é uma área expressiva para troca de calor. Se utilizou o valor de 48,9 W/m.K para condutividade térmica da chapa metálica do costado e teto, o material de construção é chapa de aço carbono com A36.

Já para coeficiente convectivo foi obtido através da Tabela 5. Como a superfície externa foi identificado a transferência de calor combinado, convecção e radiação, pode-se adotá-la.

Tabela 5: Coeficiente de transferência de calor combinado sem isolante térmico.

**TABELA 3-9**

Coeficientes de transferência de calor combinado por convecção e radiação em superfícies de janelas, paredes ou tetos. (De ASHRAE. *Handbook of fundamentals*, Cap. 22, Tab. 1.)

Posição	Direção do fluxo de calor	$h, \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^*$		
		0,90	0,20	0,05
<b>Ar parado</b> (ambos interno e externo)				
Horiz.	para cima ↑	9,26	5,17	4,32
Horiz.	para baixo ↓	6,13	2,10	1,25
45°	para inclinação cima ↑	9,09	5,00	4,15
45°	para inclinação baixo ↓	7,50	3,41	2,56
Vertical	horiz. →	8,29	4,20	3,35
<b>Ar em movimento</b> (qualquer posição, qualquer direção)				
Condição de inverno (ventos de 24 km/h)		34,0	—	—
Condição de verão (ventos de 12 km/h)		22,7	—	—

A resistência da superfície pode ser obtida a partir de  $R = 1/h$ .

**TABELA 3-10**

Emissividades  $\epsilon$  das várias superfícies e emissividade efetiva do espaço do ar. (De ASHRAE. *Handbook of Fundamentals*, Cap. 22, Tab. 3.)

Superfície	Emissividade efetiva do espaço do ar		
	$\epsilon_1 = \epsilon$ $\epsilon \epsilon_2 = 0,9$	$\epsilon_1 = \epsilon$ $\epsilon_2 = \epsilon$	$\epsilon_2 = \epsilon$
Folha de alumínio brilhante	0,05*	0,05	0,03
Chapa de alumínio	0,12	0,12	0,06
Papel revestido de alumínio polido	0,20	0,20	0,11
Aço galvanizado brilhante	0,25	0,24	0,15
Alumínio pintado	0,50	0,47	0,35
Materiais de construção: Madeira, papel, alvenaria.			
tintas não metálica	0,90	0,82	0,82
Vidro comum	0,84	0,77	0,72

\* A emissividade da superfície da folha de alumínio aumenta para 0,30 com condensação pouco visível e para 0,70 com condensação claramente visível.

Fonte: Çengel e Ghajar, 2012

Com os dados dimensionais encontrados, foi possível determinar área total do tanque que troca calor com o ambiente. Esses dados também possibilitaram determinar a transferência de calor considerando o equipamento na condição atual de operação (sem isolamento térmico). No primeiro momento foi identificado os

mecanismos de transferências de calor, (condução, convecção e radiação) presentes e, na sequência foram calculadas as resistências térmicas em cada uma das partes consideradas (Tabela 6) utilizando as equações 3-1 e 3-2. Conhecendo as resistências e sabendo que a diferença de temperatura é de 12,9°C, pois o fluido interno é mantido a 7°C o meio externo tem sua temperatura média de 19,9°C, foi possível obter a taxa de calor a partir da equação 3-3. Os resultados dos cálculos estão apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6: Levantamento do fluxo de calor do tanque sem isolamento.

Componente do equipamento	Condução chapa Metálica do teto	Condução chapa Metálica do costado	Convecção natural externa	Resistência total	Fluxo de calor
	$R_{T, cond.}$ (K/W)	$R_{T, cond.}$ (K/W)	$R_{T, Conv}$ (K/W)	$R_{T, total}$ (K/W)	$q$ (W)
Teto	0,0000088	-	0,000737	0,0007456	17301,60
Virola 01	-	0,0000001	9501,35	9501,35	9501,35
Virola 02	-	0,0000001	19317,11	19317,11	19317,11
Virola 03	-	0,0000001	18931,82	18931,82	18931,82
Virola 04	-	0,0000001	18931,27	18931,27	18931,27
Virola 05	-	0,0000002	19314,85	19314,85	19314,85
Virola 06	-	0,0000002	19314,85	19314,85	19314,85
Virola 07	-	0,0000002	18929,11	18929,11	18929,11
Virola 08	-	0,0000002	18929,11	18929,11	18929,11
Virola 09	-	0,0000002	19312,57	19312,57	19312,57
Virola 10	-	0,0000002	18927,99	18927,99	18927,99
Virola 11	-	0,0000003	19311,46	19311,46	19311,46
<b><math>q_{total} = 218,02 \text{ kW}</math></b>					

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 6, foi possível verificar que a taxa total de transferência de calor foi alta, apresentando o valor de 218 kW aproximadamente. O resultado encontrado foi alto, pois o tanque possui grandes dimensões e, conseqüentemente, uma grande área de transferência de calor.

Assim como na condição sem isolamento, se utilizou o valor de 48,9 W/m.K para condutividade térmica da chapa metálica do costado e teto. Para o condutividade

térmica do isolante térmico o valor adotado foi  $0,023 \text{ W/m.K}$  (ÇENGEL E GHAJAR, 2012).

Posteriormente, os cálculos foram realizados para o equipamento considerando agora ele estar o isolamento térmico. O coeficiente convectivo (Tabela 7) foi considerando o mecanismo de troca de calor externo combinado entre convecção e radiação, no entanto com o isolamento térmico instalado junto a chapa de alumínio utilizada como proteção mecânica. Os valores de temperatura são iguais a condição de sem isolamento.

Tabela 7: Coeficiente de transferência de calor combinado com isolante térmico.

**TABELA 3-9**

Coeficientes de transferência de calor combinado por convecção e radiação em superfícies de janelas, paredes ou tetos. (De ASHRAE. *Handbook of fundamentals*, Cap. 22, Tab. 1.)

Posição	Direção do fluxo de calor	$h, \text{W/m}^2\text{-K}^*$		
		0,90	0,20	0,05
<b>Ar parado</b> (ambos interno e externo)				
Horiz.	para cima ↑	9,26	5,17	4,32
Horiz.	para baixo ↓	6,13	2,10	1,25
45°	para inclinação cima ↑	9,09	5,00	4,15
45°	para inclinação baixo ↓	7,50	3,41	2,56
Vertical	horiz. →	8,29	4,20	3,35
<b>Ar em movimento</b> (qualquer posição, qualquer direção)				
Condição de inverno (ventos de 24 km/h)		34,0	—	—
Condição de verão (ventos de 12 km/h)		22,7	—	—

A resistência da superfície pode ser obtida a partir de  $R = 1/h$ .

**TABELA 3-10**

Emissividades  $\epsilon$  das várias superfícies e emissividade efetiva do espaço do ar. (De ASHRAE. *Handbook of Fundamentals*, Cap. 22, Tab. 3.)

Superfície	Emissividade efetiva do espaço do ar		
	$\epsilon_1 = \epsilon$ $\epsilon \epsilon_2 = 0,9$	$\epsilon_1 = \epsilon$ $\epsilon_2 = \epsilon$	$\epsilon_2 = \epsilon$
Folha de alumínio brilhante	0,05*	0,05	0,03
Chapa de alumínio	0,12	0,12	0,06
Papel revestido de alumínio polido	0,20	0,20	0,11
Aço galvanizado brilhante	0,25	0,24	0,15
Alumínio pintado	0,50	0,47	0,35
Materiais de construção:			
Madeira, papel, alvenaria,			
tintas não metálica	0,90	0,82	0,82
Vidro comum	0,84	0,77	0,72

\* A emissividade da superfície da folha de alumínio aumenta para 0,30 com condensação pouco visível e para 0,70 com condensação claramente visível.

Fonte: Çengel e Ghajar, 2012

Para a encontrar o fluxo de calor se adotou a metodologia da análise anterior, os dados de temperatura se mantêm os utilizados para condição sem isolamento, porém foi adicionado a resistência a condução para o isolante térmico, o isolante utilizado foi poliuretano com espessura de 100 mm. Os resultados obtidos para este caso estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Levantamento do fluxo de calor do tanque com isolamento.

Componente do equipamento	Condução chapa Metálica do teto	Condução chapa Metálica do costado	Condução isolamento térmico	Convecção natural externa	Resistência total	Fluxo de calor
	$R_{T, cond.}$ (K/W)	$R_{T, cond.}$ (K/W)	$R_{T, cond.}$ (K/W)	$R_{T, Conv}$ (K/W)	$R_{T, total}$ (K/W)	$q$ (W)
Teto	0,000009	-	0,0196379	0,0036134	0,023260	554,60
Virola 01	-	0,0000001	0,0026049	0,0033596	0,0059646	2162,78
Virola 02	-	0,0000001	0,0026049	0,0016524	0,0042573	3030,08
Virola 03	-	0,0000001	0,0026049	0,0016860	0,0042909	3006,35
Virola 04	-	0,0000001	0,0026049	0,0016860	0,0042909	3006,34
Virola 05	-	0,0000002	0,0026049	0,0016524	0,0042574	3030,03
Virola 06	-	0,0000002	0,0026049	0,0016524	0,0042574	3030,03
Virola 07	-	0,0000002	0,0026049	0,0016860	0,0042910	3006,28
Virola 08	-	0,0000002	0,0026049	0,0016860	0,0042910	3006,28
Virola 09	-	0,0000002	0,0026049	0,0016524	0,0042575	3029,97
Virola 10	-	0,0000002	0,0026049	0,0016860	0,0042911	3006,26
Virola 11	-	0,0000003	0,0026049	0,0016524	0,0042575	3029,94

$q_{total} = 32,90 \text{ kW}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Com a adição do isolante térmico, é possível verificar na tabela 8 que a taxa total de troca de calor diminuiu significativamente em comparação com tanque sem isolamento. Neste caso, agora, a taxa de transferência de calor ficou em torno de 32,9 kW.

Por fim, a fim de ter um comparativo, a conservação de energia ao instalar o isolamento térmico, foi calculada através da diferença entre a taxa de calor com isolamento térmico e a taxa de calor calculada sem o isolamento térmico. Este resultado está apresentado na tabela 9.

Tabela 9: Mapa comparativo dos cenários

Cenário	Fluxo de calor $q$ (kW)
Sem isolamento térmico	218,02
Com isolamento térmico	32,90
<b>Energia economizada</b>	<b>185,12</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

De acordo com os valores apresentados na Tabela 9, a energia economizada com a simulação da adição do isolante térmico foi de, aproximadamente, 185 kW o que corresponde a uma economia de 85 %. Com os dados de energia conhecidos, pode-se então partir para o estudo de viabilidade econômica.

#### 4.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECÔNOMICA

Para se ter uma boa análise da viabilidade econômica do estudo da adição de do isolante térmico no tanque estudado, foi preciso quantificar a energia economizada com essa adição em moeda. Para isso, a conservação de energia calculada em kW, foi multiplicada pelo multiplicando o valor unitário de R\$ 0,25kWh cobrado pela companhia em energia elétrica, pela taxa de calor reduzida durante o período de payback.

O valor unitário para a energia elétrica foi estabelecido pelo contrato vigente para consumo de energia elétrica entre a companhia proprietária do equipamento e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Os percentuais de reajuste anual sobre o valor unitário pago pela energia elétrica durante o período de payback foram utilizados conforme o IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo – IBGE, correspondente ao mês de outubro/2022 de 6,47%. O lucro estimado com a conservação de energia obtida após a instalação do isolante térmico durante os anos de 2022, 2023, 2024, 2025 e 2026 está apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Levantamento de lucro com conservação de energia

Ano	Valor
2022	R\$ 405.421,86
2023	R\$ 431.652,66
2024	R\$ 459.580,58
2025	R\$ 489.315,45

2026	R\$ 520.974,16
<b>Lucro Total</b>	<b>R\$ 2.306.944,70</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

De acordo com a tabela 10, é possível verificar que o lucro total estimado durante os 5 anos (período de payback estipulado pela companhia proprietária do equipamento) foi de aproximadamente R\$ 2.306.950,00.

Entretanto, para tornar a análise de payback mais fidedigna, foi necessário, também levantar os custos para instalação do isolamento térmico (Tabela 11). Os valores utilizados foram transcritos do contrato que a companhia tem vigente com a construtora. Esse contrato abrange todo o escopo, fornecimento de materiais e mão de obra. Além disso, juntamente com o custo de manutenção foi aplicado uma taxa de 10% sobre o valor total do investimento. Este valor corresponde ao custo de manutenção durante toda a vida útil do material. Esta taxa é baseada nos indicadores de manutenção da companhia.

Tabela 11: Levantamento de custos para instalação de isolamento térmico

Descrição do item	Quantidade $m^2$	Valor unitário	Valor total do item
Poliuretano expandido	2098 $m^2$	R\$ 141,00	R\$ 295.818,00
Chapa alumínio espessura 1mm	2098 $m^2$	R\$ 99,50	R\$ 208.751,00
Acessórios de fixação	2098 $m^2$	R\$ 8,00	R\$ 16.784,00
Mão de Obra execução	904 horas da equipe	R\$ 382,30	R\$ 345.599,20
Andaime	1872 $m^3$	R\$ 62,00	R\$ 116.064,00
Taxa de manutenção	10%	-	R\$ 98.301,62
<b>Total do investimento</b>			<b>R\$ 1.081.317,82</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Com os custos (Tabela 11) e lucros identificados (Tabela 10), pode-se avaliar o tempo de retorno (payback) do investimento. Para isso foi comparado os custos de investimentos versus o lucro estimado para o período de payback de 5 anos. Os valores obtidos para o payback estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Mapa comparativo de payback

Descrição	Valor
Valores de investimento	R\$ 1.081.317,82

Economia de energia durante o período de payback	R\$ 2.306.944,70
Período de payback	2 anos e 3 meses

---

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Logo, é possível verificar na Tabela 12, que a análise do tempo de retorno demonstrou que o período de payback encontrado foi de 2 anos e três meses sendo este período inferior ao período estipulado pela companhia que são de 5 anos. Tendo em vista o que foi exposto, o presente estudo demonstrou que há viabilidade econômica para implementação do isolante térmico no tanque de armazenamento estudado.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve por objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica para instalação de um isolamento térmico em um tanque para conservação de energia. Este tanque tem capacidade de armazenamento de 10.800 m<sup>3</sup> de Estireno. Para isso foi necessário estimar a taxa de transferência de calor para os casos do tanque sem e com isolamento térmico.

Os resultados mostram que a taxa de calor ocorre e do lado interno do equipamento para o meio externo. Ao simular a instalação de isolamento térmico a troca de calor reduziu em aproximadamente 85%, demonstrando grande eficácia, refletido diretamente nos valores obtidos na conservação de energia.

A energia reduzida ao se instalar o isolamento foi de 185,12 KW, resultando em lucro estimado de R\$ 2.306.944,70 em 5 anos. Comparando com o custo de investimento de R\$ 1.081.317,82, o período de payback ficou de 2 anos e três meses, período esse inferior ao período estipulado pela empresa (5 anos) onde o tanque sem isolamento está instalado.

Sendo assim, o estudo demonstrou que há viabilidade econômica para a implantação do projeto, atendendo todos os objetivos específicos do presente trabalho de conclusão de curso.

Por fim, o estudo deixou algumas oportunidades de inclusão de algumas variáveis de estudo que não foram possíveis de ser contempladas durante a pesquisa, mas que poderia dar continuidade ao assunto estudado.

- Estudar a viabilidade do uso de *blanketing* como gás inerte. O código de projeto do equipamento contempla API STD 2000, que é uma norma de segurança contra pressurização ou vácuo de tanque atmosférico de teto fixo. Esta norma recomenda o uso de *blanketing* com gás inerte. No caso do equipamento estudado é utilizado nitrogênio. Com isso quando o equipamento é exposto a oscilações de temperaturas externas ocorre a alteração de pressão do gás aliviando-o para atmosfera ou reabastecendo-o para mantê-lo na pressão de operação. Estas oscilações das temperaturas são comuns no local de operação do equipamento, onerando o custo de produção.
- Ampliar a análise com diferentes materiais e espessuras diversas.

Por fim, recomenda-se fazer a análise apresentada no presente estudo já no projeto básico do equipamento. Pois ao instalar o isolante térmico durante a construção do equipamento, alguns custos podem ser reduzidos, como a montagem de andaime e o valor da mão de obra.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Inflação**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>>. Acesso em: 4 dez. 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *In*: INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/normais>>. Acesso em: 29 out. 2022.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa**: abordagem prática . [s.l.]: Grupo A, 2009. E-book. ISBN 9788580551280. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580551280/>. Acesso em: 04 out. 2022.

CUSTO da energia elétrica para indústria. *In*: PORTAL da Industria. Brasília, 17 nov. 2021. Disponível em: <<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/inovacao-e-tecnologia/custo-da-energia-eletrica-para-industria/>>. Acesso em: 14 set. 2022.

DEEPL Translate - O melhor tradutor do mundo. Disponível em: <<https://www.deepl.com/translator>>. Acesso em: 20 nov. 2022.

DOS DA SILVA, Nivea de Lima; DALBERTO, Bianca T.; SANTOS, Luana Santana; *et al.* **Operações Unitárias de Transferência de Calor e Massa**. [s.l.]: Grupo A, 2021. E-book. ISBN 9786556902371. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786556902371/>. Acesso em: 04 out. 2022.

DOS NUNES, Edilene de Cássia D.; SANTOS, Leandro José. **Termoplásticos. Estruturas, Propriedades e Aplicações**. [s.l.]: Editora Saraiva, 2015. E-book. ISBN 9788536520551. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536520551/>. Acesso em: 18 out. 2022.

ERWIN, Douglas L. **Projeto de Processos Químicos Industriais**. [s.ed.] [s.l.]: Grupo A, 2016. E-book. ISBN 9788582604083. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582604083/>. Acesso em: 20 nov. 2022.

GAUTO, Marcelo A.; ROSA, Gilber R. **Química industrial (Tekne)**. [s.l.]: Grupo A, 2013. E-book. ISBN 9788565837613. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788565837613/>. Acesso em: 20 out. 2022.

GITMAN, L. J. **Princípios de Administração Financeira**. 12. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2010.

KREITH, Franco; MANGLIK, Raj M.; BOHN, Mark S. **Princípios de download de calor**. Tradução da 7ª edição norte-americana. [s.l.]: Cengage Learning Brasil, 2015. E-book. ISBN 9788522122028. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522122028/>. Acesso em: 04 out. 2022.

MATIAS, Alberto B. **Finanças empresariais estratégicas**. [s.ed.] [s.l.]: Editora Manole, 2019. E-book. ISBN 9788520452448. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788520452448/>. Acesso em: 19 nov. 2022.

NAÇÕES Unidas. **Relatório da ONU aponta recorde de emissões de gases de efeito estufa**. In: ONU News. [s.l.] 04 abril 2022. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2022/04/1785102>>. Acesso em: 22 set. 2022.

PROTOLAB, Laboratório de Propriedades Termofísicas e Prototipação. **Tabela de Condutividade Térmica de Materiais de Construção**. São Paulo. Disponível em: <<http://www.protolab.com.br/Tabela-Condutividade-Material-Construcao.htm>>. Acesso em: 29 out. 2022.

SIQUEIRA, Cintia. **Eficiência energética na indústria: as melhores dicas para economizar!** Disponível em: <<https://omsengenharia.com.br/blog/eficiencia-energetica-na-industria/#:~:text=Investir%20em%20motores%20de%20alta%20efici%C3%Aancia%20energ%C3%A9tica%20%C3%A9,Desligue%20os%20motores%20de%20m%C3%A1quinas%20fora%20de%20opera%C3%A7%C3%A3o.>>. Acesso em: 19 set. 2022.

**Injeção e Spray de Poliuretano - Isar Isolamento Térmico e Acústico**. Disponível em: <<https://www.isar.com.br/isolamento-termico/injecao-e-spray-de-poliuretano/>>. Acesso em: 9 dez. 2022.

TELLES, Pedro C. Silva. **Tubulações Industriais - Materiais, Projeto, Montagem**. 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC. E-book. SBN 8521612893.

WELTY, James R.; RORRER, Gregório L.; FOSTER, David G. **Fundamentos de Transferência de Momento, de Calor e de Massa**; 6ª ed. [s.l.]: Grupo GEN, 2017.

E-book. ISBN 9788521634201. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634201/>. Acesso em: 04 out. 2022.

WESTON, J.F.; BRIGHAM, E.F. **Fundamentos da administração financeira**. [s.ed.] São Paulo: Makron Books, 2000.

ETD 2000 - Venting Atmospheric and Low-Pressure Storage Tanks.

API STD 650 - Welded Tanks for Oil Storage; B1.1

PETROBRAS. **N-0894 - Projeto de Isolamento Térmico a Baixa Temperatura**.

ASTM – American Society for Testing and Materials. AÇOS ASTM A36 (2008).

NBR-7821 Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados