



**UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA**

**MILENA DEMETRIO HONORATO**

**PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO DE ISOLAMENTO TÉRMICO DA LINHA  
DE DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR E EQUIPAMENTOS DE UMA INDÚSTRIA  
ALIMENTÍCIA**

Tubarão

2021

**MILENA DEMETRIO HONORATO**

**PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO DE ISOLAMENTO TÉRMICO DA LINHA  
DE DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR E EQUIPAMENTOS DE UMA INDÚSTRIA  
ALIMENTÍCIA**

Relatório de Estágio apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Alessandro de Oliveira Limas, Ms.

Tubarão

2021

**MILENA DEMETRIO HONORATO**

**PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO DE ISOLAMENTO TÉRMICO DA LINHA  
DE DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR E EQUIPAMENTOS DE UMA INDÚSTRIA  
ALIMENTÍCIA**

Este Relatório de Estágio foi julgado adequado à obtenção do título de bacharel em Engenharia Química e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Química da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 13 de Julho de 2021.

---

Professor e orientador Prof. Alessandro de Oliveira Limas, Ms.  
Universidade do Sul de Santa Catarina

---

Professor Cesar Renato Alves da Rosa, Ms.  
Universidade do Sul de Santa Catarina

---

Professor Jair Juarez João, Dr.  
Universidade do Sul de Santa Catarina

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe, Gisele, que foi o meu maior alicerce ao longo dos anos de estudos e que sempre depositou confiança no meu potencial e progresso.

Agraço também à todos os familiares e amigos, que me oferecem palavras de incentivo e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste curso.

Agradeço aos amigos que a Engenharia Química me proporcionou, que acompanharam todas as angústias e conquistas a cada unidade de aprendizagem vencida.

Agradeço aos professores, que foram os mediadores de todo o aprendizado e aguçaram à busca constante pelo conhecimento.

Dedico a todos este trabalho como forma de agradecimento.

“Dificuldades preparam pessoas comuns para destinos extraordinários” (LEWIS, C. S.).

## RESUMO

As indústrias, estando preocupadas com a minimização dos impactos ambientais e otimização de processos, buscam a máxima utilização de seus recursos para que as perdas sejam mínimas. Ainda, preocupam-se em oferecer segurança aos colaboradores, atingir maior produtividade e manter a qualidade do seu produto. A partir disso, o presente trabalho tem como finalidade o estudo das perdas de calor inerentes à produção de alimentos e formas de minimizá-las. A empresa alimentícia assistida conta com uma ampla linha de produtos que abrange diversos setores. O setor abordado conta com 8 equipamentos e uma linha de distribuição de vapor de 50,45 metros. O vapor saturado constitui a fonte de calor responsável pelo cozimento dos alimentos e escoar por uma tubulação isolada com lã de vidro, cuja eficiência está comprometida, enquanto os equipamentos não possuem isolamento. Inicialmente, calculou-se a perda de calor nas situações atuais. Após, foram calculados a perda de calor com o dimensionamento adequado e na presença de isolante térmico com espessuras recomendadas pelo fornecedor para as condições operacionais. Para tanto, foram utilizadas equações de transferência de calor e os resultados dos cálculos definiram que a instalação de isolamento térmico indicado pode diminuir a perda de calor durante a produção do alimento em 48.694,87 kcal/h, o que ocasiona uma economia anual de R\$5.305,44. Para a melhoria proposta é necessário um investimento de aproximadamente R\$15.941,92, com prazo para retorno em torno de 2 anos e 11 meses. Dessa forma, conclui-se preliminarmente que o investimento é viável, visto que o isolamento pode manter-se conservado por aproximadamente 40 anos, caso a manutenção preventiva seja realizada periodicamente.

Palavras-chave: Perdas de calor; Isolamento térmico; Transferência de calor.

## ABSTRACT

The industries, being concerned with minimizing environmental impacts and optimizing processes, seek the maximum use of their resources so that losses are minimal. Nevertheless, they are concerned with offering safety to employees, achieving greater productivity and maintaining the quality of their product. That is the reason, this work aims to study the heat losses inherent in food production and ways to minimize them. The food company, internship area, has a great range of products that cover different sectors. The sector studied has 8 equipments and a steam distribution line of 50.45 meters. Saturated steam is the heat source responsible for cooking food and flows through a glass wool source, whose efficiency is compromised, while the equipment does not have insulation. Initially, the calorie loss under current assumptions was calculated. Afterwards, the heat loss was calculated with the proper dimensioning and in the presence of thermal insulation with thicknesses recommended by the supplier for the operating conditions. For this purpose, equations of heat transfer were used and the calculations results defined that the installation of thermal insulation indicated can reduce heat loss during food production by 48,694.87 kcal/h, which leads to yearly savings of R\$5,305.44. For an improvement proposal, an investment of approximately R\$ 15,941.92 is required, with a payback period of around 2 years and 11 months. In this way, it is concluded preliminary that the investment is viable, since the insulation can be maintained for approximately 40 years, if preventive maintenance is carried out periodically.

**Key Words:** Heat losses; Thermal insulation; Heat transfer.

**LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

Figura 1 – Isométrico dos equipamentos .....	12
Figura 2 – Corte de um tubo .....	20
Figura 3 – Ilustração de um cozinhador (à esquerda) e um concentrador à vácuo (à direita) ..	23
Figura 4 – Fluxograma das etapas envolvidas na obtenção dos resultados .....	25
Figura 5 – Planta baixa da disposição dos equipamentos e tubulação no setor em estudo .....	27

**LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 – Equação da reta para obter o coeficiente de película .....	28
Gráfico 2 – Curva da espessura econômica do isolante .....	32

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Dados para a determinação experimental do coeficiente de película .....	28
Tabela 2 – Dimensões do concentrador .....	29
Tabela 3 – Propriedades do aço carbono .....	29
Tabela 4 – Dados da linha de distribuição de vapor atual .....	30
Tabela 5 – Resultados obtidos para a perda de calor na tubulação isolada com lã de vidro ....	30
Tabela 6 – Dimensões das camisas térmicas que constituem os equipamentos .....	30
Tabela 7 – Resultados obtidos para a perda de calor nas camisas sem isoladomento.....	31
Tabela 8 – Diâmetro econômico na linha de distribuição de vapor para o concentrador.....	31
Tabela 9 – Relação entre espessura do isolante, perda de calor e investimento.....	31
Tabela 10 – Propriedades do cavaco .....	32

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>123</b>
1.1 PROBLEMA.....	123
1.2 JUSTIFICATIVA .....	133
1.3 OBJETIVOS .....	144
<b>1.3.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>144</b>
<b>1.3.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>144</b>
<b>2 REVISÃO TEÓRICA .....</b>	<b>15</b>
2.1 CALDEIRA .....	125
2.2 DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR .....	126
2.3 ISOLAMENTOS TÉRMICOS .....	136
2.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	14
<b>2.4.1 Condução.....</b>	<b>14</b>
<b>2.4.2 Convecção .....</b>	<b>148</b>
<b>2.4.3 Radiação.....</b>	<b>148</b>
2.5 MODELAGEM DAS EQUAÇÕES .....	14
<b>2.5.1 Tubulação.....</b>	<b>14</b>
<b>2.5.2 Camisa térmica dos equipamentos .....</b>	<b>22</b>
<b>2.5.3 Determinação do coeficiente de película .....</b>	<b>24</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>25</b>
3.1 CONSTRUÇÃO TEÓRICA DA PESQUISA .....	25
3.2 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO .....	25
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>27</b>
4.1 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE MÉDIO DE PELÍCULA .....	28
4.2 PERDA DE CALOR NA TUBULAÇÃO COM ISOLAMENTO DANIFICADO .....	29
4.3 PERDA DE CALOR NOS EQUIPAMENTOS SEM ISOLAMENTO .....	30
4.4 DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO.....	31
4.5 ESPECIFICAÇÃO DO ISOLAMENTO .....	32
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>34</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>35</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>37</b>
<b>APÊNDICE A – Caldeira Mista.....</b>	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

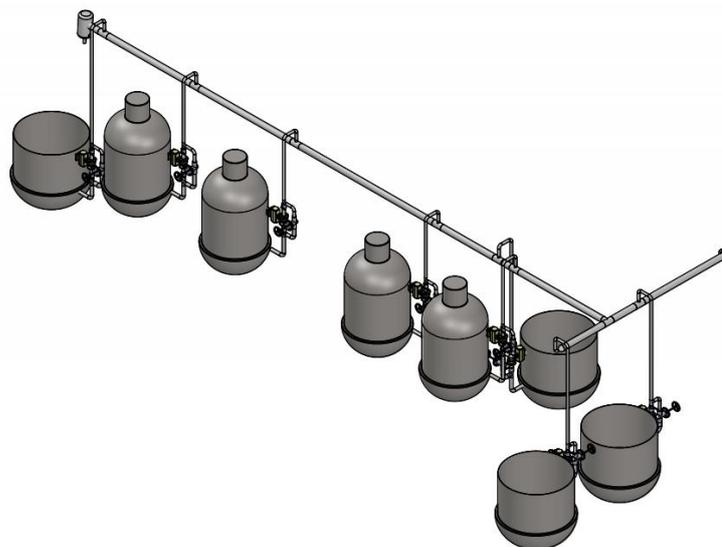
As indústrias, demonstrando preocupação com os impactos que podem causar ao meio ambiente e buscando a otimização de seus processos, prezam pela máxima utilização de recursos para que as perdas inerentes ao seu funcionamento sejam mínimas.

Em indústrias alimentícias, o cozimento de alimentos é realizado através da sua exposição às altas temperaturas do vapor saturado, que, por sua vez, está em constante troca térmica com o ar, ocasionando perdas de calor. Vale citar que quanto maior for o gradiente de temperatura entre o fluido e o ar, maior será a perda de calor associada ao processo. E, conseqüentemente, maior a demanda de vapor e gasto com combustível para sua geração. No entanto, tais perdas podem ser minimizadas através de isolamento térmico.

A partir disso, o presente trabalho tem como finalidade o dimensionamento e especificação de isolamento térmico de uma linha de distribuição de vapor e equipamentos de uma empresa alimentícia. A estrutura do setor em estudo conta com cozinhadores e concentradores à vácuo não isolados por onde escoa vapor a  $5 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Tais equipamentos são capazes de produzir doce de frutas, geleias, recheios, dentre outros. Atualmente, a tubulação que conduz vapor com pressão de  $10 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ , encontra-se com isolamento danificado, devido à falta de manutenção preventiva ao longo dos anos de uso, reduzindo sua eficiência.

Na Figura 1, observa-se a representação esquemática da disposição dos equipamentos e tubulações no setor em estudo:

*Figura 1- Isométrico dos equipamentos e tubulação.*



Fonte: da Empresa, 2019.

## 1.1 PROBLEMA

Em 2020, a indústria alimentícia teve seu faturamento aumentado em 12,8% devido ao aumento do volume de vendas e exportações, e a expectativa é que continue crescendo em 2021 (BOCCHINI, 2021). Mesmo com boas perspectivas, sabe-se que, frente à pandemia do covid-19, os brasileiros tiveram seu poder de compra reduzido e estão mais exigentes. Portanto, para se manter competitiva no mercado é indispensável que as empresas otimizem seus processos.

A energia utilizada no cozimento de alimentos é o vapor sob pressão, que impacta diretamente no custo de produção. Ainda, o vapor é conduzido da caldeira até os equipamentos através de tubulações, e ao longo do caminho são geradas perdas de carga, bem como perdas térmicas ocasionadas pela formação de condensado e gradiente de temperatura entre o ar e o fluido, por exemplo.

Diante disso, para minimizar a perda de carga ao longo da tubulação, é necessário o correto dimensionamento do diâmetro da tubulação, respeitando a velocidade econômica. Ainda, o isolamento da tubulação e equipamentos resultará em diminuição da transferência de calor, fazendo com que a temperatura do vapor saturado se mantenha alta, promovendo o aumento na velocidade do cozimento de alimentos.

A partir dos dados supracitados, questiona-se: **de que forma dimensiona-se o isolamento térmico adequado para uma linha de distribuição de vapor e camisas térmicas dos equipamentos destinados ao cozimento de alimentos em uma indústria localizada em Santa Catarina, a fim de reduzir as perdas de calor e gastos monetários inerentes ao processo?**

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A importância do presente trabalho reside no fato de que o aumento da eficiência energética através do isolamento culminará em benefícios econômicos, devido à diminuição da utilização da biomassa para geração de vapor. Atualmente, a empresa gasta aproximadamente R\$ 5.570,00 por ano para suprir a demanda de vapor no setor em estudo.

Além disso, o isolamento oferece segurança e conforto aos colaboradores, visto que proporciona temperaturas amenas no setor (que se caracteriza por ser o mais quente da empresa, chegando a 55°C em dias de verão) e evita queimaduras e/ou acidentes de trabalho. Demonstrando preocupação ambiental, a liberação de gases diminui proporcionalmente ao

racionamento da queima de combustível e os gastos em manutenção e substituição são reduzidos, poupando recursos usados na fabricação de novos produtos.

Ainda, este projeto oferece os estudos necessários para adequação da linha de distribuição e equipamentos da empresa. Também auxilia no desenvolvimento de estudos posteriores relacionados à transferência de calor e discussões no âmbito acadêmico.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Propor o dimensionamento do isolamento térmico adequado à linha de distribuição de vapor e equipamentos de um dos setores de uma empresa alimentícia, através da avaliação da perda térmica intrínseca ao processo e do investimento necessário para a melhoria mencionada.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Especificar os isolantes mais indicados, a partir dos cálculos de perda térmica;
- b) Comparar os resultados obtidos nos cálculos para as situações atual e futura;
- c) Realizar a análise financeira do investimento.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

Abaixo será apresentada uma breve revisão bibliográfica acerca das definições e esclarecimentos associados ao projeto, tais como caldeira, distribuição de vapor e transferência de calor, bem como as equações básicas e modelagem envolvidas na determinação das perdas.

### 2.1 CALDEIRA

Caldeiras convertem água líquida em vapor sob pressão, a partir da energia originada pela transferência de calor proveniente dos gases gerados com a queima do combustível. Ainda, a caldeira pode funcionar com fluidos diferentes da água, o que pode ser inviável, visto que a água apresenta ótimo calor específico (BAGIO, 2016).

No meio industrial, as quatro formas mais comuns de caldeiras são: flamotubulares, aquatubulares, mista e elétricas (BAZZO, 1995). A empresa em estudo possui uma caldeira mista (Apêndice A), sendo composta por uma fornalha com paredes revestidas de tubos por onde escoam água e passagem de gases no exterior dos tubos (aquatubular), e tambor de vapor com passagem de gases no interior dos tubos (flamotubular).

Além disso, o combustível usado para a geração de vapor é o cavaco, matéria-prima barata e de fácil armazenamento. Sabendo disso, a caldeira mista é o tipo mais viável, pois sua câmara de combustão comporta maior volume e tem maior superfície de queima através do grelhado, facilitando a queima da biomassa (BAGIO, 2016).

A caldeira conta com uma fornalha de queima em grelha fixa inclinada, de tubos paralelos, por onde circula água da própria caldeira que promove o resfriamento. A alimentação de combustível é realizada automaticamente. Há dois ventiladores que insuflam ar na fornalha, a fim de obter altos níveis de rendimento com baixos níveis de emissão. O ventilador primário insufla ar através do leito, com o objetivo de refrigerar a grelha e promover queima uniforme do combustível. Enquanto o ventilador secundário sopra ar no interior da câmara de combustão, a fim de proporcionar a combustão completa, controlando a fumaça gerada (BAZZO, 1995).

Ainda, a caldeira conta com um exaustor, responsável pela retirada e circulação dos gases no seu interior através do vácuo gerado. Para filtrar os particulados gerados da combustão é utilizado um separador do tipo multiciclones, promovendo a exaustão dos gases pela chaminé.

## 2.2 DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR

A distribuição de vapor é feita através de tubulações, que são classificadas como um conjunto de tubos, conexões, válvulas e acessórios responsáveis pela condução de fluidos. Geralmente, são feitas de aço carbono, a fim de evitar corrosão e ferrugem. São submetidas a variações de pressão e temperatura, por isso estão sujeitas a dilatações e contrações.

Um dos problemas relacionado ao dimensionamento de tubulações é a formação de condensado, o qual necessita ser drenado da tubulação através de purgadores, visto que sua presença pode acarretar danos estruturais pelo surgimento de choques de pressão, conhecidos como golpe de aríete. Ainda, a presença de condensado provoca maior consumo de energia e tempo para que se atinja a temperatura desejada (MILCENT, 2007).

Além disso, o dimensionamento de uma tubulação para transporte de vapor deve possuir um diâmetro que esteja de acordo com a sua vazão, ou seja, é necessário levar em conta parâmetros econômicos. Sabe-se que em tubulações com diâmetro menor do que o recomendado, a velocidade é intensificada podendo ocasionar maior desgaste. Por outro lado, um superdimensionamento no diâmetro encarece o projeto com materiais. Portanto, de acordo com Telles (2001), para o vapor saturado a velocidade econômica deve ficar entre 20 e 30 m/s na linha geral, e no máximo 15 m/s nas linhas secundárias.

## 2.3 ISOLAMENTOS TÉRMICOS

Os isolamentos térmicos têm por finalidade a conservação da energia, ou seja, a diminuição da dissipação de calor, visto que aumentam a resistência à transferência térmica pelo surgimento de uma “barreira” com condutividade baixa.

A condutividade térmica nos materiais é determinada por suas estruturas químicas. Por exemplo, os isolantes possuem seus elétrons mais externos fortemente ligados uns aos outros, impossibilitando que ocorram colisões entre as moléculas, fato que dificulta a transferência de calor. Normalmente, são materiais porosos, cuja elevada resistência térmica se deve à baixa condutividade de ar contido em seus vazios (MILCENT, 2007).

Ao realizar a escolha de um isolante térmico deve-se levar em conta as particularidades pertinentes ao seu uso, que podem influenciar no seu desempenho térmico, por exemplo: temperatura de operação, umidade e esforços mecânicos.

No entanto, deve-se tomar cuidado durante a especificação de isolamentos, pois o efeito alcançado pode ser o contrário. Isto porque, apesar de o material introduzir uma resistência

térmica, proporcional à sua espessura, a área exterior aumenta e, por consequência, aumenta-se a convecção para o ambiente. Dependendo da relação entre estas duas contribuições – condução na camada de isolamento e convecção na superfície exterior – o efeito final poderá ser diferente do esperado (OLIVEIRA, 2014).

## 2.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Sobre a transferência de calor pode-se afirmar que:

Transferência de calor, por definição, é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura no espaço. Sempre que existir uma diferença de temperaturas em um meio ou entre meios, haverá, necessariamente, transferência de calor (INCROPERA, 2019).

Existem três modos de transferir energia: condução, convecção e radiação. Apesar de serem considerados separadamente, é raro apenas um mecanismo estar envolvido na transferência de energia em situações reais. Portanto, será intuitivo olhar algumas situações em que transferência de calor ocorre por uma combinação desses mecanismos.

### 2.4.1 Condução

Segundo Welty (2017), a condução pode ocorrer por interação molecular, ou seja, o movimento de uma molécula em um nível mais energético transmite energia para moléculas adjacentes a níveis inferiores de energia. Esse tipo de transferência está presente, de certa forma, em todos os sistemas em que existe gradiente de temperatura e em que moléculas de um sólido, um líquido ou um gás estejam presentes.

Ainda, a condução pode ocorrer na forma de elétrons livres, isto é, a capacidade de sólidos de conduzir calor varia com a concentração de elétrons livres. Por isso, é bastante significativa em sólidos metálicos puros e baixa para sólidos não metálicos.

Para a condução térmica, a equação da taxa de transferência de calor é conhecida como Lei de Fourier:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Onde:

q: taxa de transferência de calor na direção  $x$  (W);

k: condutividade térmica  $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$ ;

A: área perpendicular ao fluxo de calor ( $m^2$ );

$\frac{dT}{dr}$ : gradiente de temperatura na direção  $x$  ( $\frac{K}{m}$ ).

A condutividade térmica independe da direção do fluxo de calor e constitui uma propriedade do material da parede, variando em função da temperatura (WELTY, 2017).

#### 2.4.2 Convecção

A convecção envolve a troca de energia entre uma superfície e um fluido adjacente, que estão a diferentes temperaturas. Distingue-se *convecção forçada* (em que um fluido escoar por uma superfície sólida impulsionado por agentes externos, tais como ventiladores, bombas ou ventos atmosféricos) e *convecção livre ou natural* (em que um fluido mais quente – ou mais frio – próximo a um contorno sólido provoca circulação devido à diferença de densidade resultante da variação de temperatura, denominado efeito de empuxo) (WELTY, 2017).

A taxa de transferência de calor é proporcional ao coeficiente de película:

$$q = hA\Delta T \quad (2)$$

Onde:

q: taxa de transferência de calor (W);

h: coeficiente médio de película ( $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ );

A: área perpendicular ao fluxo de calor ( $m^2$ );

$\Delta T$ : gradiente de temperatura (K).

O coeficiente de película não é uma propriedade do fluido, visto que depende de vários fatores, como: propriedades, perfil de temperatura e regime de escoamento do fluido; geometria do sistema; e, superfície do sólido. Portanto, existe grande dificuldade na sua determinação, que pode ser feita através de correlações empíricas ou métodos experimentais (ROSA, 2020).

#### 2.4.3 Radiação

Na radiação nenhum meio é requerido para a propagação do calor, visto que a transferência é máxima quando as duas superfícies estão separadas por um vácuo perfeito (WELTY, 2017). Portanto, não há necessidade de contato físico entre os corpos para que o calor seja transmitido (BARROSA, 2004). Além disso, a radiação ocorre na velocidade da luz, tendo propriedades de onda e propriedades de partícula. A Equação 3 representa a radiação térmica:

$$q = \sigma T^4 A \quad (3)$$

Onde:

q: taxa de transferência de calor (W);

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann  $\left(5,676 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}\right)$ ;

A: área perpendicular ao fluxo de calor ( $m^2$ );

T: temperatura absoluta (K).

## 2.5 MODELAGEM DAS EQUAÇÕES

Anteriormente, demonstrou-se as equações básicas envolvidas na formulação de sistemas térmicos. No entanto, sua utilização para uma situação real é mais delicada quando comparada à solução de problemas acadêmicos. Portanto, verifica-se que a adequação de um modelo requer a adoção de aproximações que precisam ser bem justificadas, de modo que o modelo obtido seja suficientemente capaz de fornecer resultados confiáveis.

Para este trabalho modelou-se as equações da perda de calor na tubulação e camisas térmicas dos equipamentos que compõem o setor em estudo a partir de dados experimentais.

### 2.5.1 Tubulação

Inicialmente, é necessário determinar a velocidade do fluido na tubulação para verificar se obedece aos parâmetros econômicos. Para isso, tem-se a Equação 4:

$$Q = \frac{v}{A} \therefore v = Q \cdot A$$

$$v = \dot{m} \bar{V} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \quad (4)$$

Onde:

$\dot{m}$ : vazão mássica do vapor saturado  $\left(\frac{kg}{h}\right)$ ;

$\bar{V}$ : volume específico do vapor saturado  $\left(\frac{m^3}{kg}\right)$ ;

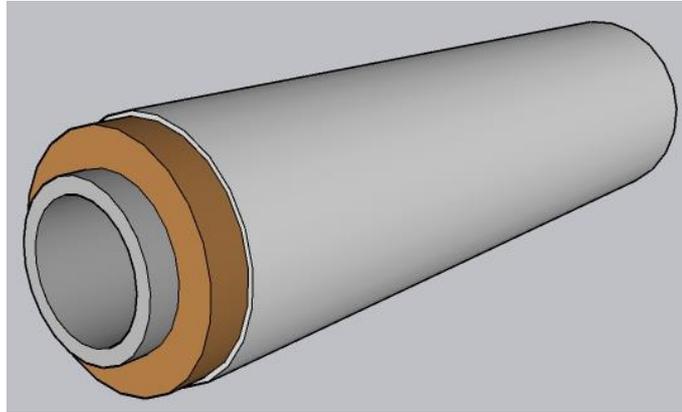
d: diâmetro da tubulação (m).

Caso esteja fora do intervalo especificado para as condições econômicas, é necessário adequar o diâmetro da linha estudada, a fim de gerar menor perda de carga. Ressalta-se que é indispensável atender aos diâmetros disponíveis comercialmente.

Assim, é possível partir para a avaliação dos fenômenos de transferência de calor que, nas tubulações, ocorre através de um fluido, com uma dada temperatura, que transmite a energia por convecção à superfície interna de um tubo. O calor é propagado por condução à superfície externa do tubo. Em tubulações isoladas, o isolamento atua como uma barreira à transferência

de calor, o qual é transmitido por condução, assim como no acabamento. Por fim, o calor se propaga novamente por convecção e radiação. A Figura 2, que dispõe o corte de uma tubulação com isolamento e acabamento metálico, auxilia na visualização do fenômeno:

Figura 2- Corte de um tubo, revestido com isolamento e acabamento metálico.



Fonte: da Autora, 2021.

Para tubulações, cuja forma é um cilindro vazado, a área efetiva de transmissão de calor é igual à superfície lateral do cilindro:

$$A = 2\pi rL \quad (5)$$

Onde:

r: raio da tubulação (m);

L: comprimento da tubulação (m);

Em seguida, deve-se organizar e integrar os termos da Equação 1:

$$q = -k \cdot 2\pi rL \frac{dT}{dr} \therefore q \int_{r_i}^{r_o} \frac{dr}{r} = -2\pi kL \int_{T_i}^{T_o} dT \therefore q = \frac{-2\pi kL(T_o - T_i)}{\ln r_o - \ln r_i}$$

$$q = \frac{-2\pi kL\Delta T}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (6)$$

Portanto, a transferência de calor em uma tubulação, considerando camadas de isolamento e acabamento metálico, é representada abaixo:

$$q = h_1 A(T_1 - T_2) = \frac{-2\pi kL(T_3 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} = \frac{-2\pi kL(T_4 - T_3)}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} = \frac{-2\pi kL(T_5 - T_4)}{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)} = h_6 A(T_5 - T_6)$$

Ou,

$$q = h_1 A(T_1 - T_2) = \frac{2\pi kL(T_2 - T_3)}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} = \frac{2\pi kL(T_3 - T_4)}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} = \frac{2\pi kL(T_4 - T_5)}{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)} = h_5 A(T_5 - T_6)$$

Onde:

- 1- Região localizada no interior do tubo por onde escoia o fluido;
- 2- Face interna da parede do tubo;
- 3- Face externa da parede do tubo e interna da parede do isolante;
- 4- Face externa da parede do isolante e interna da parede do acabamento metálico;
- 5- Face externa da parede do acabamento metálico;
- 6- Região onde se encontra o fluido que envolve a tubulação (ar).

Expressando as equações em função da taxa de transferência de calor:

$$(T_1 - T_2) = \frac{q}{h_1 A}$$

$$(T_2 - T_3) = \frac{q \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k L}$$

$$(T_3 - T_4) = \frac{q \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi k L}$$

$$(T_4 - T_5) = \frac{q \ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{2\pi k L}$$

$$(T_5 - T_6) = \frac{q}{h_6 A}$$

Somando as equações acima, tem-se a Equação 7:

$$(T_1 - T_6) = q \left( \frac{1}{h_1 A} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k L} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi k L} + \frac{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_6 A} \right) \quad (7)$$

Logo, a taxa de transferência de calor é dada pela Equação 8:

$$q = \frac{\Delta T}{\left( \frac{1}{h_1 A} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k L} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi k L} + \frac{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_6 A} \right)} \quad (8)$$

A condução e convecção podem ser analisadas de forma semelhante à Lei de Ohm. Neste caso, a diferença de temperatura é a "força" que faz com que exista transferência de calor. A combinação da condutividade térmica (ou coeficiente de película), espessura de material e área representam a "resistência" à passagem do calor. Assim:

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_{t\acute{e}rmica}} \quad (9)$$

A resist\ecencia condutiva \e inversamente proporcional \a condutividade t\ermica:

$$R_{condutiva} = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi kL} \quad (10)$$

A resist\ecencia convectiva \e inversamente proporcional ao coeficiente de pel\edcula:

$$R_{convectiva} = \frac{1}{hA} \quad (11)$$

Portanto,

$$\sum R_{t\acute{e}rmica} = \frac{1}{h_1A} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi kL} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi kL} + \frac{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_5A} \quad (12)$$

Ou seja, para uma tubula\c3o isolada e revestida, a resist\ecencia total \e igual ao somat\orio das resist\ecencias ocasionadas pela convec\c3o interna e externa e pela condu\c3o do a\c3o, do isolante e do acabamento met\alico:

$$\sum R_{t\acute{e}rmica} = R_{conv.int} + R_{cond.a\c3o} + R_{cond.isolante} + R_{cond.acabamento} + R_{conv.ext}$$

Desprezando-se

a transfer\ecencia por convec\c3o interna. Assim a express\ao para o somat\orio das resist\ecencias do sistema fica:

$$\sum R_{t\acute{e}rmica} = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi kL} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi kL} + \frac{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_5A} \quad (13)$$

Estima-se a temperatura do ar e calcula-se a taxa de transfer\ecencia de calor total:

$$q = \frac{(T_2 - T_6)}{\sum R_{t\acute{e}rmica}} \quad (14)$$

Sabendo que a taxa de transfer\ecencia de calor se d\aa em s\erie e n\ao h\aa ac\umulo de calor no percurso, \e poss\ivel calcular a temperatura nas superf\ecies de cada camada:

$$q_{total} = q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = q_6 \quad (15)$$

### 2.5.2 CAMISA T\ERMICA DOS EQUIPAMENTOS

A estrutura da Unidade de Produ\c3o conta com cozinhadore e concentradore \a v\acuo, sendo que objetivo do presente projeto \e realizar o isolamento das camisas t\ermicas de tais equipamentos. As camisas t\ermicas possuem forma de calota esf\erica, com \area representada pela equa\c3o abaixo:

$$A = 2\pi rh \quad (16)$$

Onde:

h: altura da calota esférica (m);

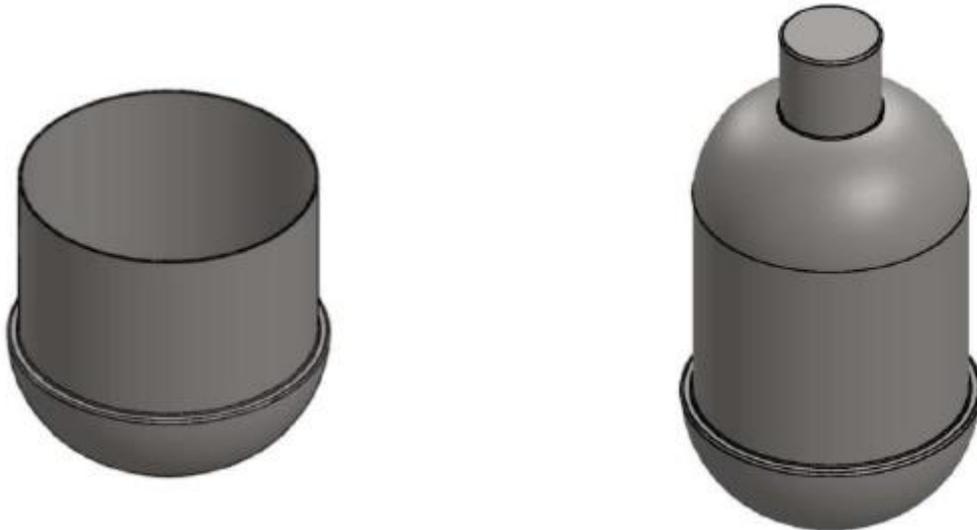
L: comprimento da calota esférica (m);

Os cálculos posteriores se dão como no cálculo da transferência de calor em tubos:

$$\sum R_{térmica} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k h} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi k h} + \frac{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)}{2\pi k h} + \frac{1}{h_5 A} \quad (17)$$

Abaixo está representada uma ilustração dos cozinhadores e concentradores à vácuo, por onde circula o vapor responsável pelo cozimento de alimentos:

*Figura 3- Ilustração de um cozinhador (à esquerda) e um concentrador à vácuo (à direita).*



Fonte: da Empresa, 2019.

Na sequência de equações mostrada acima, considerou-se equipamentos isolados. No entanto, é possível calcular a transferência de calor em equipamentos não isolados, excluindo-se as resistências ocasionadas pelo isolante e revestimento:

$$\sum R_{térmica} = R_{cond.aço} + R_{conv.ex} \quad (18)$$

### 2.5.3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PELÍCULA

O coeficiente de película pode ser determinado experimentalmente a partir da medição da temperatura da face externa de um equipamento durante certo intervalo de tempo. Posteriormente, os dados coletados são aplicados na seguinte equação abaixo:

$$\psi = \frac{T_S - T_\infty}{T_{S0} - T_\infty} \quad (20)$$

O procedimento experimental consiste no traçado do gráfico  $\ln \psi \times t$ . O coeficiente angular da reta fornece o valor do coeficiente médio de película (ROSA, 2020):

$$\bar{h} = -\alpha \frac{\rho c_p V}{A} \quad (21)$$

Onde:

$\bar{h}$ : coeficiente de película médio  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$ ;

$\rho$ : massa específica do sólido  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$ ;

$V$ : volume do sólido ( $m^3$ );

$A$ : área superficial do sólido ( $m^2$ );

$\alpha$ : coeficiente angular da reta;

A área é calculada a partir do raio externo, bem como coeficiente de película externo:

$$A = 2\pi r_o h_o \quad (22)$$

Para o volume tem-se:

$$V = \frac{\pi h_o^2}{3}(3r_o - h_o) - \frac{\pi h_i^2}{3}(3r_i - h_i) \quad (23)$$

As propriedades do fluido devem ser determinadas na temperatura média entre a superfície e o fluido:

$$T_{média} = \frac{T_S - T_\infty}{2} \quad (24)$$

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 CONSTRUÇÃO TEÓRICA DA PESQUISA

Para a investigação proposta, a pesquisa explicativa é a mais adequada, visto que tem como objetivo estabelecer relações de causa-efeito por meio da manipulação direta das variáveis relativas ao objeto de estudo, buscando identificar as causas do fenômeno analisado.

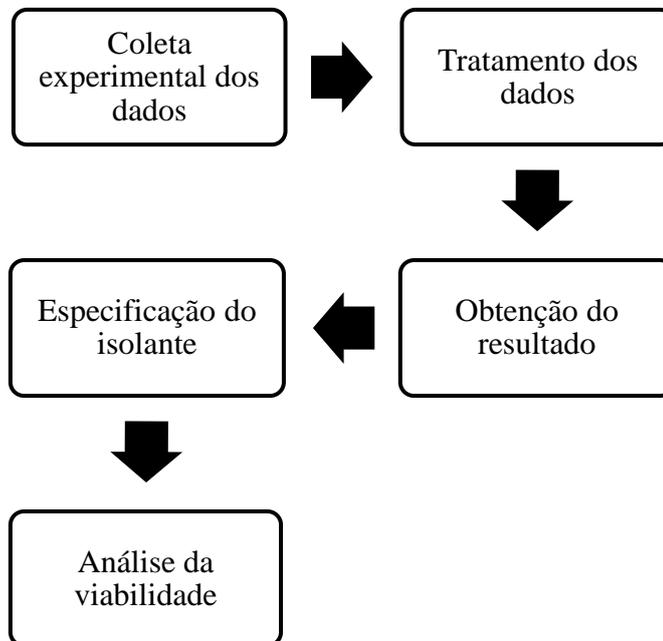
Ainda, a investigação é fundamentada pelo método de procedimento experimental, que busca selecionar as variáveis que influenciam o objeto de estudo, ou seja, caracteriza-se pela manipulação de variáveis. Assim, visa identificar a variável independente que determina a causa da variável dependente.

Com relação à abordagem, o estudo caracteriza-se como quantitativo. Este tipo de abordagem é definido pelo emprego da quantificação, tanto nas modalidades de coleta de informações quanto no tratamento delas por meio de técnicas estatísticas.

#### 3.2 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO

A Figura 4 simplifica as etapas envolvidas para a obtenção dos resultados:

*Figura 4- Fluxograma das etapas envolvidas na obtenção dos resultados.*



Fonte: da Autora, 2021.

Inicialmente coletou-se os dados referentes ao atual processo da empresa, tais como: dimensões da tubulação e equipamentos (que foram disponibilizados através de relatórios

fornecidos pela empresa). Além disso, determinou-se a temperatura de trabalho e vazão mássica do vapor saturado.

Com auxílio de termômetro infravermelho, mediu-se a temperatura da superfície externa de um equipamento não isolado durante certo intervalo de tempo, a fim de determinar o coeficiente médio de película externo. O experimento foi realizado em triplicata, a fim de aumentar a confiabilidade dos dados gerados.

Posteriormente, obteve-se a perda de calor para a atual condição de trabalho da empresa, através da aplicação dos dados nas equações modeladas no Tópico 2.5, por meio de planilhas eletrônicas desenvolvidas no Excel. Calculou-se a perda de calor para apenas 1 equipamento (concentrador à vácuo e cozinhador) e expandiu-se o resultado para todos os equipamentos do setor. Na tubulação, a perda de calor é proporcional ao comprimento dos tubos. Frisa-se que desprezou-se os efeitos promovidos pela convecção interna e pela radiação.

A fim de otimizar o processo, determinou-se as velocidades na tubulação para verificar se respeitam aos critérios econômicos estipulados na literatura— caso não estejam de acordo, deve-se redimensionar a linha. Ainda, definiu-se o isolante ideal, bem como a sua espessura econômica, por meio da relação entre várias espessuras, redução da perda de calor gerada pela melhoria e investimento necessário.

Comparou-se a economia térmica gerada após o isolamento adequado com as condições atuais da empresa e analisou-se a viabilidade da implantação do projeto. Salienta-se que, os dados financeiros foram calculados a partir de cotação realizada pela própria empresa.

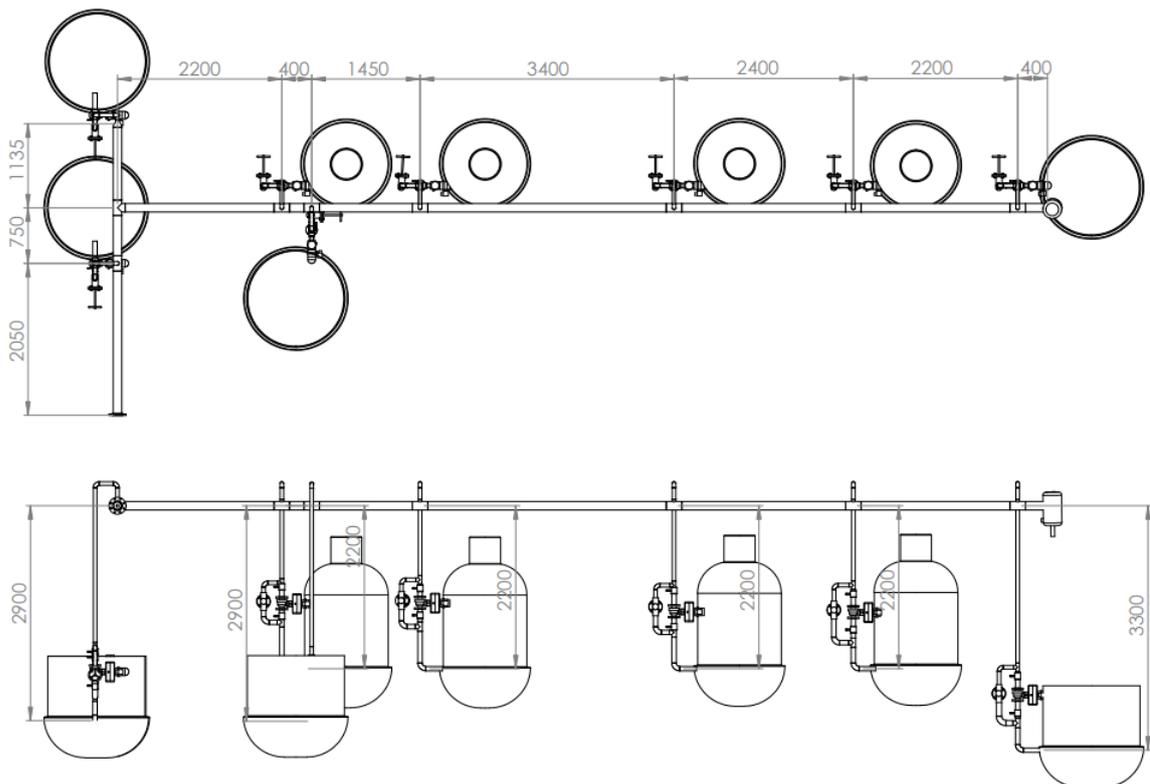
Além disso, observou-se o comportamento físico do sistema investigado e relacionou-se com os conceitos obtidos em artigos científicos e bibliografias, que auxiliaram na resolução dos cálculos.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, obteve-se um coeficiente médio de película externo igual a  $28,60 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , que serviu como parâmetro para os cálculos posteriores. Ainda, determinou-se que a velocidade nos concentradores à vácuo está acima das condições econômicas, portanto o diâmetro da linha deve ser maior, buscando diminuir a perda de carga do trajeto. Estimou-se que a lã de rocha MIT 48 com espessura de 75 mm é o isolante mais adequado para as condições operacionais e trará o maior custo/benefício para a empresa, campo de estágio.

Na Figura 5 está representada a planta baixa que apresenta a disposição dos equipamentos, bem como o comprimento da tubulação no setor em estudo:

*Figura 5- Planta baixa da disposição dos equipamentos e tubulação no setor em estudo.*



Fonte: da Empresa, 2019.

#### 4.1 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE PELÍCULA EXTERNO

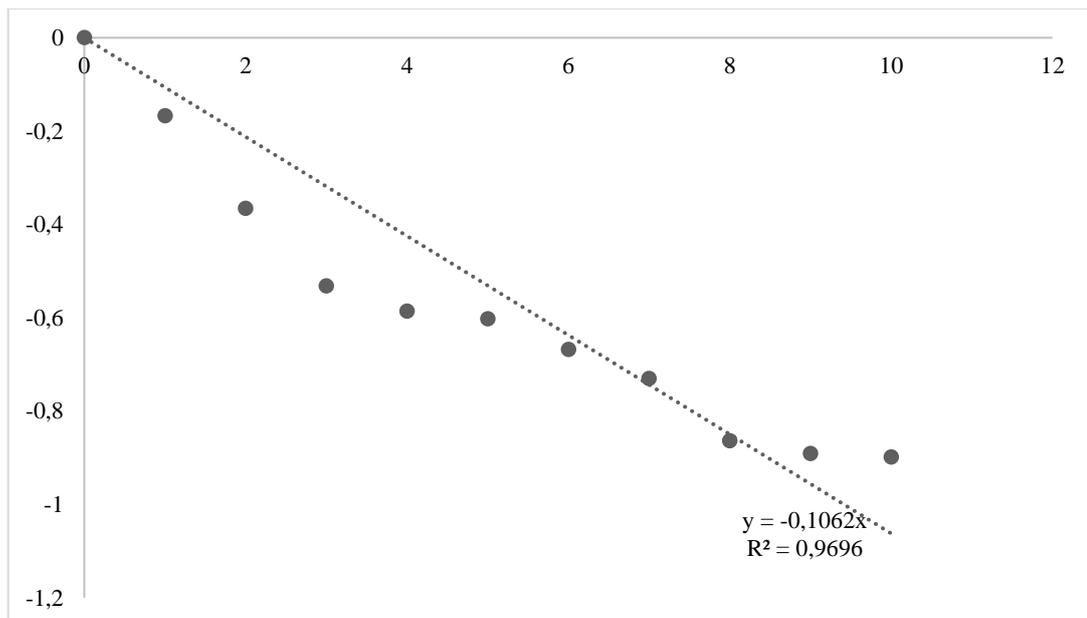
Para a determinação do coeficiente médio de película externo, mediu-se a temperatura da face externa de um concentrador à vácuo não isolado durante 10 minutos (após seu desligamento decorrente do fim do processo produtivo) e a partir disso aplicou-se tais valores na Equação 20, de forma a obter  $\Psi$ . Posteriormente, calculou-se o logaritmo natural de  $\Psi$  para traçar a reta  $\ln \Psi \times t$ :

*Tabela 1- Dados para a determinação experimental do coeficiente de película.*

<b>t (min)</b>	<b>T<sub>s</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>∞</sub> (°C)</b>	<b>Ψ</b>	<b>LnΨ</b>
<b>0</b>	151,10	28,00	1	0
<b>1</b>	139,10	28,00	0,9033	-0,1017
<b>2</b>	120,40	28,00	0,7412	-0,2995
<b>3</b>	107,30	28,00	0,6277	-0,4658
<b>4</b>	103,50	28,00	0,5947	-0,5197
<b>5</b>	102,40	28,00	0,5852	-0,5358
<b>6</b>	101,10	28,00	0,5739	-0,5553
<b>7</b>	94,30	28,00	0,5150	-0,6637
<b>8</b>	86,90	28,00	0,4508	-0,7967
<b>9</b>	85,50	28,00	0,4387	-0,8240
<b>10</b>	85,10	28,00	0,4352	-0,8320

Fonte: da Autora, 2021.

*Gráfico 01- Equação da reta para obter o coeficiente de película.*



Fonte: da Autora, 2021.

Na Tabela 2 estão representadas as dimensões do equipamento, que foram calculadas a partir das Equações 22 e 23:

*Tabela 2- Dimensões do concentrador.*

<b>Dimensões do Concentrador</b>	
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	2,0686
<b>V (m<sup>3</sup>)</b>	0,00956

Fonte: da Autora, 2021.

Foi necessária a determinação de algumas propriedades do aço carbono, obtidas na sua temperatura média, medida em Kelvin (362,70 K):

$$T_{Média} = \frac{151,097 \text{ }^{\circ}\text{C} + 28 \text{ }^{\circ}\text{C}}{2} \therefore T_{Média} = 89,55 \text{ }^{\circ}\text{C ou } 362,70 \text{ K}$$

Na tabela 3, estão dispostas propriedades do aço carbono, cuja obtenção se deu com base em referências bibliográficas:

*Tabela 3- Propriedades do aço carbono.*

<b>Propriedades do Aço Carbono</b>	
<b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	7854
<b><math>C_p</math> (J/kg·K)</b>	434

Fonte: da Autora, 2021.

Realizada a sequência de cálculos demonstrada, através da utilização da Equação 21, determinou-se que o coeficiente médio de película externo é igual a 28,60 W/m<sup>2</sup>·K.

#### 4.2 PERDA DE CALOR NA TUBULAÇÃO COM ISOLAMENTO DANIFICADO

Determinou-se que o vapor saturado escoar pela tubulação com uma pressão de 9,5 kgf·cm<sup>-2</sup>, sendo a temperatura para esta condição é de 176,82 °C.

Considerou-se a temperatura na face interna da tubulação igual à temperatura do vapor, dessa forma desprezou-se os efeitos promovidos pela convecção interna. Ainda, adotou-se que a temperatura ambiente é de 28°C (temperatura média na região).

Ressalta-se que a transferência de calor por radiação foi desprezada, visto que é significativa apenas em situações que envolvem temperaturas extremamente altas. Também, sabe-se que o fluido quente está contido no interior do tubo e, portanto, o calor flui de dentro para fora.

O vapor saturado é distribuído aos setores através da linha geral e, posteriormente, distribuído aos equipamentos pelas linhas secundárias. Para a realização dos cálculos, é necessário conhecer as dimensões atuais da tubulação, as quais estão dispostas na Tabela 4:

Tabela 4- Dados da linha de distribuição de vapor atual.

Dados	Linha Geral	Linhas Secundárias	
		Cozinhador	Concentrador
<b>Diâmetro nominal</b>	DN 4"	DN 1 <sup>1/4</sup> "	DN 1 <sup>1/4</sup> "
<b>Schedule</b>	80	40	40
<b>Raio interno- R<sub>1</sub> (m)</b>	0,049	0,018	0,021
<b>Raio externo- R<sub>2</sub> (m)</b>	0,057	0,021	0,0263
<b>Comprimento (m)</b>	18,65	16,40	15,40
<b>ṁ (kg/s)</b>	550,00	170,00	380,00
<b>Face interna do tubo- T<sub>2</sub> (K)</b>	449,97	449,97	449,97
<b>Ar ambiente- T<sub>5</sub> (K)</b>	301,15	301,15	301,15

Fonte: da Autora, 2021.

Atualmente, a tubulação está isolada com lã de vidro danificada, cuja eficiência está comprometida em aproximadamente 50%, devido à falta de manutenção preventiva. Portanto, de acordo com a Tabela 5, tem-se que a perda térmica para estas condições é 3.779,62 kcal/h:

Tabela 5- Resultados obtidos para a perda de calor na tubulação isolada com lã de vidro.

DADOS	Linha Geral	Linhas Secundárias	
		Cozinhador	Concentrador
<b>Condutividade térmica do aço (W/m·K)</b>	50,00	50,00	50,00
<b>Coefficiente de película do ar (W/m<sup>2</sup>·K)</b>	28,60	28,60	28,60
<b>Condutividade térmica do isolante (W/m·K)</b>	0,047	0,047	0,047
<b>Espessura de isolante (mm)</b>	70,00	70,00	70,00
<b>Espessura do revestimento (mm)</b>	0,80	0,80	0,80
<b>Perda de calor (W)</b>		4.391,92	
<b>Perda de calor (kcal/h)</b>		3.779,62	

Fonte: da Autora, 2021.

#### 4. 3 PERDA DE CALOR NOS EQUIPAMENTOS SEM ISOLAMENTO

Estimou-se que o vapor saturado chega à camisa térmica dos equipamentos com uma pressão igual a 5 kgf·cm<sup>-2</sup> e temperatura de 151,10 °C. Na Tabela 6, estão dispostas as dimensões das camisas térmicas para os cozinhadores e concentradores à vácuo:

Tabela 6- Dimensões das camisas térmicas que constituem os equipamentos.

DADOS	Cozinhador	Concentrador
<b>Raio externo (cm)</b>	69,99	60,99
<b>Espessura (cm)</b>	0,52	0,53
<b>Raio interno (cm)</b>	69,48	60,47
<b>Altura (cm)</b>	41,00	53,98

Fonte: da Autora, 2021.

De acordo com a Figura 5, tem-se 4 cozinhadores e 4 concentradores a vácuo, portanto calculou-se a perda térmica para 1 equipamento de cada classe e expandiu-se o resultado para os demais equipamentos, ocasionando perdas de aproximadamente 46.731,31 kcal/h, como demonstrado na Tabela 7:

*Tabela 7- Resultados obtidos para a perda de calor nas camisas sem isolamento.*

<b>DADOS</b>	<b>Cozinhador</b>	<b>Concentrador</b>
<b>Face interna- T<sub>2</sub> (K)</b>	424,25	424,25
<b>Ar ambiente- T<sub>5</sub> (K)</b>	301,15	301,15
<b>Condutividade térmica do aço- k</b>	50,00	50,00
<b>Coefficiente de película do ar- h</b>	28,60	28,60
<b>Perda de calor por equipamento (W)</b>	6.322,32	7.253,13
<b>Perda de calor total (W)</b>	54.301,78	
<b>Perda de calor total (kcal/h)</b>	46.731,31	

Fonte: da Autora, 2021.

Portanto, a perda de calor total, na forma de calor, no setor (incluindo a perda ocasionada ao longo da tubulação e nas camisas térmicas) é igual à 51.123,23 kcal/h, gerando um gasto anual com cavaco igual à R\$5.700.

#### 4.4 DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO

O vapor escoou pela tubulação com uma pressão de 9,5 kgf·cm<sup>-2</sup> e volume específico de 0,208 m<sup>3</sup>/kg. Com os dados da Tabela 4 e através da Equação 4, tem-se que a velocidade do vapor nos concentradores é igual à 22,75 m/s, portanto está acima da velocidade econômica (aconselha-se até 15 m/s nas linhas secundárias). Assim, é necessário adequar o diâmetro dessa linha. Os resultados estão dispostos na Tabela 8:

*Tabela 8- Diâmetro econômico na linha de distribuição de vapor para o concentrador.*

<b>Dados</b>	<b>Concentrador</b>
<b>Velocidade econômica (m/s)</b>	Máx. 15
<b>Velocidade adotada (m/s)</b>	15
<b>ṁ (kg/s)</b>	380,00
<b>D<sub>interno</sub> (in)</b>	1,7
<b>DIÂMETRO COMERCIAL</b>	
<b>Diâmetro nominal</b>	DN 2''
<b>Schedule</b>	40
<b>Diâmetro externo (in)</b>	2,380
<b>Diâmetro interno (in)</b>	2,07
<b>v (m/s)</b>	10,14

Fonte: da Autora, 2021.

Vê-se que aumentando o diâmetro da tubulação para 2", a velocidade do vapor diminui, respeitando aos parâmetros econômicos e reduzindo a perda de carga ao longo do trajeto.

#### 4.5 ESPECIFICAÇÃO DO ISOLAMENTO

As perdas térmicas podem ser reduzidas através do isolamento, assim estimou-se que a lã de rocha MIT 48 é o isolante mais adequado para otimizar o processo de cozimento de alimentos na empresa.

A Tabela 9 relaciona diferentes espessuras do isolante com a redução de perda de calor conjunta na tubulação e equipamentos, bem como o investimento necessário para que a melhoria proposta seja adotada. Ressalta-se que, para os resultados abaixo, considerou-se o correto dimensionamento da tubulação, demonstrado no tópico anterior.

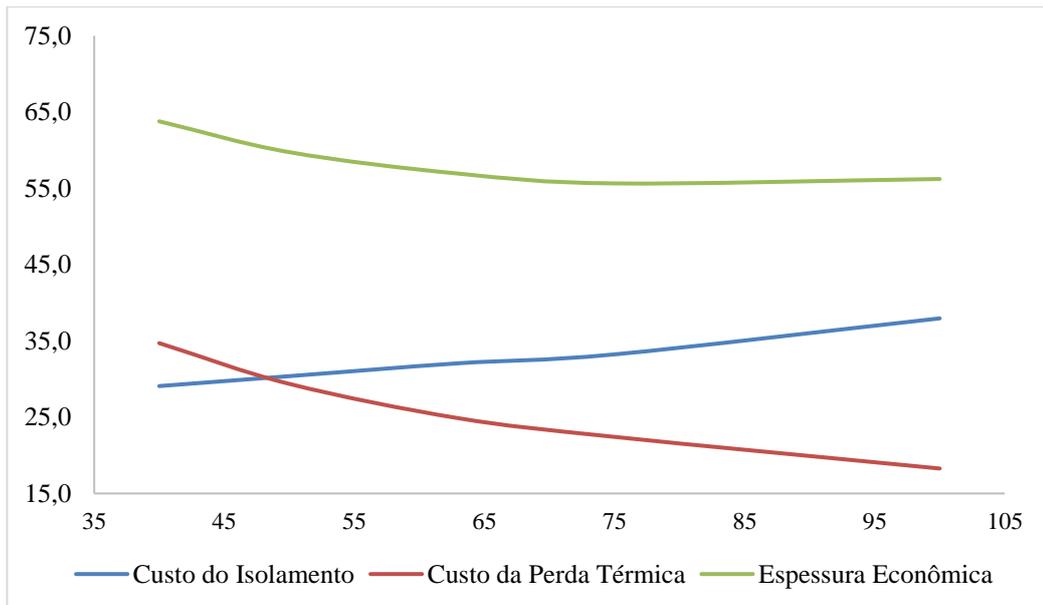
*Tabela 9- Relação entre espessura do isolante, perda de calor e investimento.*

<b>Espessura (mm)</b>	<b>Perda de Calor (kcal/h)</b>	<b>Investimento (R\$)</b>
<b>40</b>	3823,05	12.213,93
<b>50</b>	3234,62	12.759,59
<b>63</b>	2.738,94	13.469,36
<b>75</b>	2012,39	15.941,92
<b>100</b>	7.253,13	6.322,32

Fonte: da Autora, 2021.

A partir dos dados acima e considerando-se um tempo de vida útil de 40 anos para o isolamento, têm-se o Gráfico 2, que representa a curva da espessura econômica do isolante:

*Gráfico 2- Curva da espessura econômica do isolante.*



Fonte: da Autora, 2021.

A partir do Gráfico 2, percebe-se que à medida que a espessura do isolante aumenta, as perdas térmicas diminuem, mas o custo do isolamento aumenta. Ainda, a espessura econômica será aquela para a qual a soma do custo das perdas térmicas e do custo de amortização do isolante é mínimo. Graficamente, a espessura econômica é lida no eixo horizontal no local de inflexão da curva verde, que representa o menor custo operacional anual para a empresa. Para o caso em estudo, a espessura econômica é de 75 mm e a temperatura na face externa do isolante será de aproximadamente 29,5°C.

Para a análise da viabilidade observou-se dois aspectos: o investimento relacionado à aquisição e manutenção do isolante e a economia gerada com a diminuição da utilização de cavaco para geração de vapor após o investimento.

Considerando a espessura econômica de 75 mm, tem-se que o investimento necessário é de R\$15.941,92, sendo que neste orçamento está incluso os custos com isolante – isotubo e manta térmica –, acabamento de alumínio e mão de obra.

O setor utiliza vapor por 10 horas durante 26 dias ao longo do mês, portanto a economia gerada com combustível após o isolamento é igual à R\$442,12 por mês. Abaixo, tem-se as propriedades características do cavaco utilizado na empresa:

*Tabela 10- Propriedades do Cavaco.*

<b>Propriedades do Cavaco</b>	
<b>Poder Calorífico (kcal/kg)</b>	3500
<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	180
<b>R\$/m<sup>3</sup></b>	22,00

Fonte: da Autora, 2021.

Finalmente, determinou-se que o payback simples é de aproximadamente 2 anos e 11 meses. Logo, o período de retorno para o investimento é relativamente pequeno quando comparado ao tempo de vida útil estimado para o isolante.

## 5 CONCLUSÃO

Propôs-se o dimensionamento das linhas de vapor e isolamento térmico, bem como comparou-se as condições atuais com a condição otimizada, respeitando as limitações impostas pelo modelo.

A velocidade na linha secundária que conduz vapor para os concentradores à vácuo está acima dos critérios econômicos. Portanto, é necessário aumentar o diâmetro da tubulação, gerando menor perda de carga ao longo do caminho percorrido pelo vapor. Determinou-se que o isolamento mais ideal para as condições operacionais é lã de rocha MIT 48, com espessura de 75 mm, podendo reduzir em 48.694,87 kcal/h o consumo de vapor no setor.

A partir disso, tem-se que o investimento necessário para realizar o projeto é de R\$15.941,92 e que a economia anual com combustível resulta em R\$5.305,44, com prazo previsto para o retorno financeiro de aproximadamente 2 anos e 11 meses.

Considerando que o projeto se trata de instalações que podem ultrapassar 40 anos de vida útil (se a manutenção preventiva for realizada periodicamente), conclui-se que as melhorias propostas no presente trabalho trazem grande economia a longo prazo, justificando os custos relacionados à sua implementação.

## REFERÊNCIAS

ALANO, Wilson. **Fundamentos de transferência de calor**. Curso de fenômenos de transferência de calor, 2020. Notas de Aula. Universidade do Sul de Santa Catarina.

BAGIO, Ronaldo William de Oliveira. **Modelagem de uma caldeira flamotubular com fornalha aquatubular**. UFSC, 2016. Disponível em: <<https://comunidade.rockcontent.com/referencia-bibliografica-abnt/#:~:text=Para%20fazer%20a%20refer%C3%Aancia%20de,data%20de%20publica%C3%A7%C3%A3o%20da%20obra.>> Acesso em: 15 de Fevereiro de 2020.

BAZZO, Edson. **Geração de vapor**. 2. ed. rev. e ampl. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 1995. 216 p.

BOCCHINI, Bruno. **Agência Brasil: Faturamento da indústria de alimentos cresce 12,8% em 2020**. Disponível em: Disponível em: <[https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-02/faturamento-da-industria-de-alimentos-cresce-128-em-2020#:~:text=J%C3%A1%20o%20volume%20de%20produ%C3%A7%C3%A3o,8%25%20em%20rela%C3%A7%C3%A3o%20a%202019&text=O%20faturamento%20da%20ind%C3%BAstria%20de,Interno%20Bruto%20\(PIB\)%20nacional.](https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-02/faturamento-da-industria-de-alimentos-cresce-128-em-2020#:~:text=J%C3%A1%20o%20volume%20de%20produ%C3%A7%C3%A3o,8%25%20em%20rela%C3%A7%C3%A3o%20a%202019&text=O%20faturamento%20da%20ind%C3%BAstria%20de,Interno%20Bruto%20(PIB)%20nacional.)> Acesso em: 15 de Março de 2021.

INCROPERA, Frank e DEWITT, David. 2008. Fundamentos da Transferência de Calor e Massa. 6. Rio de Janeiro : LTC, 2008.

MILCENT, Paul Fernand. 2007. Noções de Isolamento Térmico de Tubulações. Curitiba : UFPR, 2007.

OLIVEIRA, P. J. **Transmissão de Calor-Condução Estacionária: Raio Crítico de Isolamento**. Outubro, 2014. Disponível em: <<http://webx.ubi.pt/~pjpo/TransCal6.pdf>> Acesso em: 21 de Abril de 2021.

**Propriedades térmicas dos materiais**. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME733/Semin%C3%A1rios%20Inox/Propriedades%20T%C3%A9rmicas%20de%20Materiais.pdf>> Acesso em: 20 de Fevereiro de 2020.

ROSA, César Renato Alves. **Determinação do coeficiente de transferência de calor.** Curso de laboratório de fenômenos e operações de transferência de calor, 2020. Notas de Aula. Universidade do Sul de Santa Catarina.

TELLES, Pedro Carlos da Silva. Tubulações industriais: materiais, projeto, montagem. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

WELTY, James R. **Fundamentos de transferência de momento, de calor e de massa.** 6. Ed. Rio de Janeiro. LTC 2017. Recurso Online.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A – Caldeira mista

*Representação da caldeira geradora de vapor saturado no campo de estágio.*



Fonte: da Autora, 2021.