

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÊXTIL  
CURSO DE ENGENHARIA TÊXTIL

Jeferson Hobus

**REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO NA INDÚSTRIA TÊXTIL**

Blumenau

2023

Jeferson Hobus

## **REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO NA INDÚSTRIA TÊXTIL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Têxtil do Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Têxtil.

Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Borges Valle

Blumenau

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Hobus, Jeferson

Reaproveitamento energético na indústria têxtil / Jeferson Hobus ; orientador, José Alexandre Borges Valle, 2023.

64 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Graduação em Engenharia Têxtil, Blumenau, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Reaproveitamento energético. 3. Caldeiras. 4. Efluentes quentes. 5. Secadores de tecido. I. Valle, José Alexandre Borges. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Têxtil. III. Título.

Jeferson Hobus

## Reaproveitamento energético na indústria têxtil

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Têxtil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Têxtil.

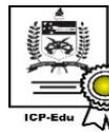
Blumenau, 30 de novembro de 2023.



Documento assinado digitalmente  
**Grazzella Cristina Oliveira de Aguiar**  
Data: 05/12/2023 10:11:00-0300  
CPF: \*\*\*.439.299-\*\*  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

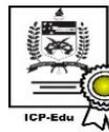
Prof<sup>ª</sup>. Grazzella Cristina Oliveira de Aguiar, Dr<sup>ª</sup>.  
Coordenadora do Curso

### Banca Examinadora:



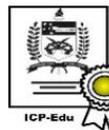
Documento assinado digitalmente  
**Jose Alexandre Borges Valle**  
Data: 05/12/2023 10:32:44-0300  
CPF: \*\*\*.292.909-\*\*  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. José Alexandre Borges Valle, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente  
**Odinei Hess Gonçalves**  
Data: 05/12/2023 10:08:17-0300  
CPF: \*\*\*.270.279-\*\*  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Odinei Hess Gonçalves, Dr.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente  
**Andrea Cristiane Krause Bierhalz**  
Data: 05/12/2023 14:45:15-0300  
CPF: \*\*\*.346.940-\*\*  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof<sup>ª</sup>. Andrea Cristiane Krause Bierhalz, Dr<sup>ª</sup>.  
Avaliadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 2023

Este trabalho é dedicado à  
minha família e amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

À minha família, que com seu incentivo me fizeram chegar à conclusão do meu curso e começo de uma nova jornada.

Ao meu orientador, Professor Dr. José Alexandre Borges Valle, pelo apoio, confiança e dedicação na realização deste trabalho.

Meus agradecimentos aos meus colegas de curso, que fizeram parte da minha formação e que com certeza vão continuar presentes em minha vida.

À Universidade Federal de Santa Catarina, em especial ao Campus de Blumenau, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a conclusão desta etapa da minha vida.

Muito Obrigado!

*“A persistência é o menor caminho do êxito.”*

(Charles Chaplin)

## RESUMO

A crescente necessidade de energia e os impactos das mudanças climáticas têm impulsionado a busca por novas soluções que aprimorem a eficiência dos processos industriais. Especificamente, a recuperação de calor residual tem ganhado destaque como uma estratégia amplamente adotada para aprimorar a eficiência energética. O calor residual é a energia produzida durante processos industriais que não encontra uma aplicação prática e, como resultado, é simplesmente perdido, sendo liberado no ambiente. A recuperação desse calor residual pode ser realizada por meio de diversas tecnologias específicas para esse fim, com o objetivo de transformá-lo em fontes valiosas de energia e, ao mesmo tempo, reduzir o consumo geral de energia. Apesar do aumento da conscientização, da disponibilidade de incentivos e do amadurecimento geral das tecnologias de recuperação de calor residual prontas para o mercado, as medidas de recuperação de calor ainda não foram implementadas a nível industrial, principalmente devido a barreiras não tecnológicas e, em particular, à falta de dados confiáveis relacionados com o consumo de calor e os potenciais de recuperação de calor residual, bem como com os tipos, custos e benefícios dessas tecnologias. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo descrever os possíveis aproveitamentos energéticos na indústria têxtil e simular condições de operação de um sistema para aproveitamento dos gases quentes do processo de secagem de tecido. Sendo assim, foi realizada uma revisão abrangente das metodologias de recuperação de calor residual e das tecnologias mais avançadas empregadas nos processos da indústria têxtil, com foco no aproveitamento energético de caldeiras, efluentes quentes e secadores de tecido. O uso dos gases quentes de caldeiras está concentrado na secagem do lodo do tratamento biológico, sendo que outra alternativa é direcionar esses gases para trocadores de calor externos nas chaminés, aquecendo o ar ou a água. Na indústria têxtil, a recuperação de energia dos efluentes quentes oferece vantagens, acelerando o resfriamento, melhorando a eficiência do tratamento biológico e permitindo o pré-aquecimento da água. No reaproveitamento energético de secadores de tecidos, o calor residual dos gases de exaustão pode pré-aquecer ar, água ou ambos em um sistema combinado. A pesquisa contínua e o desenvolvimento de tecnologias de recuperação de calor impulsionam a inovação, tornando a exploração dessas tecnologias mais atraente devido à eficácia e economia, refletindo uma preocupação crescente com a eficiência energética e a sustentabilidade em diversas indústrias.

**Palavras-chave:** Reaproveitamento energético. Caldeiras. Efluentes quentes. Secadores de tecido.

## ABSTRACT

The growing need for energy and the impacts of climate change have driven the search for new solutions that improve the efficiency of industrial processes. Specifically, waste heat recovery has gained prominence as a widely adopted strategy to improve energy efficiency. Waste heat is energy produced during industrial processes that does not find practical application and, as a result, is simply lost and released into the environment. The recovery of this waste heat can be carried out through several specific technologies for this purpose, with the aim of transforming it into valuable sources of energy and, at the same time, reducing overall energy consumption. Despite increased awareness, the availability of incentives and the general maturation of market-ready waste heat recovery technologies, heat recovery measures have not yet been implemented at an industrial level, mainly due to non-technological barriers and in particular, the lack of reliable data related to heat consumption and waste heat recovery potentials, as well as the types, costs and benefits of these technologies. In this sense, the present work aimed to describe possible energy uses in the textile industry and simulate operating conditions of a system to use hot gases from the fabric drying process. Therefore, a comprehensive review of waste heat recovery methodologies and the most advanced technologies used in textile industry processes was carried out, focusing on the energy use of boilers, hot effluents and fabric dryers. The use of hot gases from boilers is concentrated on drying sludge from biological treatment, and another alternative is to direct these gases to external heat exchangers in chimneys, heating the air or water. In the textile industry, energy recovery from hot effluents offers advantages by accelerating cooling, improving the efficiency of biological treatment and allowing water preheating. In the energy reuse of fabric dryers, the residual heat from the exhaust gases can preheat air, water or both in a combined system. Continuing research and development of heat recovery technologies drives innovation, making exploration of these technologies more attractive due to their effectiveness and cost-effectiveness, reflecting a growing concern for energy efficiency and sustainability across diverse industries.

**Keywords:** Energy reuse. Boilers. Hot effluents. Fabric dryers.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Trocador de calor de duplo tubo.....	19
Figura 2 - Trocador de calor de casco e tubo.....	20
Figura 3 - Trocador de calor de placas.....	21
Figura 4 - Trocador de calor em serpentina.....	22
Figura 5 - Trocadores de calor (a) tubos aletados; (b) placas aletadas.....	23
Figura 6 - Escoamento (a) paralelo e (b) contracorrente.....	24
Figura 7 - Escoamento cruzado (a) sem mistura e (b) com mistura.....	25
Figura 8 - Caldeira flamotubular.....	26
Figura 9 - Caldeira aquatubular.....	27
Figura 10 - Fluxograma do tratamento de efluentes têxteis.....	31
Figura 11 - Secador de lodo.....	37
Figura 12 - Recuperação de calor e central de água quente.....	40
Figura 13 - Instalação do recuperador de calor Laudatec.....	42
Figura 14 - Sistema Laudatec ar/ar.....	43
Figura 15 - Partes internas do sistema Laudatec ar/ar.....	43
Figura 16 - Sistema Laudatec ar/água.....	44
Figura 17 - Trocador de calor do tipo serpentina aletada.....	44
Figura 18 - Representação do trocador de calor ar-ar de fluxo cruzado.....	46
Figura 19 - Representação do trocador de calor ar-água de fluxo cruzado.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
$Q$	Quantidade de calor (J)
$U$	Coefficiente global de troca térmica ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
$A_s$	Área efetiva de troca térmica ( $m^2$ )
$\Delta T_{lm}$	Média logarítmica da diferença de temperatura ( $^\circ C$ )
$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor (W)
$\dot{m}$	Taxa de fluxo de massa (kg/s)
$C_p$	Capacidade térmica específica ( $kJ/kg \cdot ^\circ C$ )
$\Delta T$	Diferença de temperatura ( $^\circ C$ )
$\Delta t$	Intervalo de tempo (s)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS .....	15
1.1.1	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>15</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1	CALOR E ENERGIA.....	16
2.1.1	<b>Transferência de calor.....</b>	<b>16</b>
2.2	TROCADORES DE CALOR.....	17
2.2.1	<b>Trocador de calor de duplo tubo.....</b>	<b>19</b>
2.2.2	<b>Trocador de calor de casco e tubo.....</b>	<b>19</b>
2.2.3	<b>Trocador de calor de placas.....</b>	<b>20</b>
2.2.4	<b>Trocador de calor em serpentina .....</b>	<b>21</b>
2.2.5	<b>Trocadores de calor aletados .....</b>	<b>22</b>
2.2.6	<b>Arranjos de escoamento .....</b>	<b>23</b>
2.3	GERADORES DE VAPOR .....	25
2.3.1	<b>Caldeiras flamotubulares.....</b>	<b>25</b>
2.3.2	<b>Caldeiras aquatubulares .....</b>	<b>26</b>
2.3.3	<b>Combustíveis .....</b>	<b>27</b>
2.4	SECADORES DE TECIDO .....	29
2.5	TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS.....	30
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>34</b>
4.1	APROVEITAMENTO ENERGÉTICO NA INDÚSTRIA TÊXTIL .....	34
4.2	APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE CALDEIRAS .....	36
4.3	APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE EFLUENTES QUENTES .....	38
4.4	APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE SECADORES DE TECIDO.....	41
4.4.1	<b>Dimensionamento para aquecimento de ar para a própria rama.....</b>	<b>45</b>
4.4.2	<b>Dimensionamento para aquecimento de água limpa.....</b>	<b>49</b>
4.4.3	<b>Cálculo de economia de vapor .....</b>	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>

<b>APÊNDICE A – VISITA TÉCNICA A BERMO .....</b>	<b>59</b>
<b>APÊNDICE B – PALESTRA LAUDATEC .....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO A – CATÁLOGO LAUDATEC .....</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na era contemporânea, a crescente necessidade de energia aliada às repercussões das alterações climáticas tem estimulado a procura de alternativas inovadoras destinadas a aumentar a eficácia dos procedimentos industriais. Especificamente, a adoção da recuperação de calor residual tornou-se predominante como meio de aumentar a eficiência energética. Estudos sugerem que uma parcela substancial, variando de 20% a 50%, da energia utilizada no setor industrial é dissipada como calor através de vias como gases de exaustão quentes, água de resfriamento e perdas de calor das superfícies de equipamentos e produtos aquecidos (MAZO-RESTREPO; ALVARADO; CACUA, 2021).

O setor têxtil apresenta grandes oportunidades para aumentar sua eficiência energética, utilizando o calor residual de equipamentos que oferecem alta disponibilidade de energia, como caldeiras, geradores de gás natural, secadores, ramas e águas residuais de tingimento. A recuperação do calor residual pode ser realizada através de várias tecnologias para fornecer fontes de energia valiosas e reduzir o consumo geral de energia (MAZO-RESTREPO; ALVARADO; CACUA, 2021).

Apesar do crescente conhecimento, incentivos disponíveis e avanço tecnológico nas tecnologias de recuperação de calor residual, sua implementação industrial ainda é limitada devido a obstáculos não tecnológicos, especialmente a falta de dados confiáveis sobre consumo de calor, potenciais de recuperação, tipos, custos e benefícios dessas tecnologias (BENEDETTI; GIORDANO; SALVIO, 2022)

De acordo com Ramírez *et al.* (2019), o uso de trocadores de calor vem sendo uma das alternativas mais difundidas para recuperação energética a partir de fontes térmicas. Em seu estudo, o autor relata as diversas possibilidades de uso destes equipamentos, como aquecimento de fluidos para processos posteriores ou ainda a utilização deste calor trocado para alimentação de geradores termoelétricos.

Além da recuperação de energia, tem-se ainda a relevância econômica do emprego dos trocadores de calor. O reaproveitamento do calor residual leva a uma significativa diminuição nos custos com combustíveis, redução na emissão de poluentes, aumento da eficiência da caldeira, atendimento a regulamentações ambientais e considerável aumento da vida útil de equipamentos (RAMÍREZ *et al.*, 2019).

Certamente, a recuperação de calor é um campo diversificado e em constante evolução, com diversas tecnologias para aproveitar o calor residual de processos industriais e sistemas de

energia. A escolha da tecnologia adequada depende das características específicas do processo ou aplicação em questão (JOUHARA *et al.*, 2018).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi descrever o aproveitamento energético mais significativo na indústria têxtil e simular condições de operação de um sistema de recuperação de energia proveniente dos gases quentes liberados na chaminé de uma rama.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Descrever os possíveis aproveitamentos energéticos na indústria têxtil e simular condições de operação de um sistema para aproveitamento dos gases quentes do processo de secagem de tecido.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Descrever a transferência de calor na indústria têxtil;
- Estudar as questões energéticas das caldeiras, efluentes quentes e gases quentes dos secadores de tecido;
- Descrever as alternativas para o reaproveitamento energético dos gases de combustão em caldeiras e dos efluentes quentes que chegam nas ETEs;
- Simular condições de operação de trocadores de calor para aproveitar os gases quentes dos secadores de tecido.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CALOR E ENERGIA

A energia é uma grandeza fundamental que representa a capacidade de um sistema realizar trabalho ou de provocar mudanças em outros sistemas. Ela existe em várias formas: energia térmica, mecânica, cinética, potencial, elétrica, magnética, química e nuclear, e a soma delas constitui a energia total ( $E$ ) de um sistema. As formas de energia relacionadas com a estrutura molecular de um sistema e com o grau de atividade molecular são chamadas de energia microscópica, e a soma de todas as formas microscópicas de energia é denominada energia interna ( $U$ ) do sistema. No Sistema Internacional, a unidade de energia é o Joule (J) (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

O calor é uma forma de energia térmica associada ao movimento aleatório de átomos e moléculas, e pode ser definido como a forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro em consequência da diferença de temperatura entre eles. A energia pode ser transformada de uma forma para outra, mas a quantidade total de energia em um sistema isolado permanece constante, de acordo com o princípio da conservação de energia (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

#### 2.1.1 Transferência de calor

A transferência de energia é considerada transferência de calor quando a força motriz é a diferença de temperatura entre dois sistemas. A quantidade de calor transferido durante determinado processo é representada por  $Q$ , e a quantidade de calor transferido por unidade de tempo é denominada taxa de transferência de calor, representada por  $\dot{Q}$  (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

O símbolo acima da letra indica a derivada em relação ao tempo, ou seja, “por unidade de tempo”. A taxa de transferência de calor é medida em unidades de Joules por segundo (J/s), que é equivalente a Watts (W). Quando a taxa de transferência de calor é conhecida, é possível determinar a quantidade total de calor transferido em um determinado intervalo de tempo  $\Delta t$  de acordo com a Equação 1 (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} dt \quad (\text{J}) \quad (1)$$

O calor pode ser transferido de três diferentes modos: condução, convecção e radiação, sendo que todos os modos de transferência de calor exigem a existência da diferença de temperatura e todos ocorrem da maior para a menor temperatura (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

A condução é o processo de transferência de energia das partículas mais energeticamente carregadas para partículas adjacentes com menor energia, resultante de suas interações. Este fenômeno é observado em sólidos, líquidos e gases. Em líquidos e gases, a condução ocorre devido às colisões e difusões das moléculas durante seus movimentos aleatórios. Nos sólidos, a condução resulta das vibrações das moléculas na estrutura cristalina, com o transporte de energia através de elétrons livres (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

A convecção, por sua vez, é o modo de transferência de energia entre a superfície sólida e a líquida ou gás adjacente, que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e de movimento de um fluido. Quanto mais rápido for o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Já a radiação consiste na energia liberada pela matéria na forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons), resultante de alterações nas configurações eletrônicas de átomos ou moléculas. Diferentemente da condução e da convecção, a transferência de calor por radiação não depende da presença de um meio intermediário. Na verdade, a transferência de calor por radiação ocorre de forma mais rápida (à velocidade da luz) e não é atenuada mesmo no vácuo. Essa é a maneira pela qual a energia do Sol chega à Terra (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

## 2.2 TROCADORES DE CALOR

Os trocadores de calor são dispositivos que possibilitam a troca de calor entre dois fluidos que se encontram em diferentes temperaturas, sendo assim importantes equipamentos para o reaproveitamento e dissipação de energia térmica. Esses trocadores são empregados em uma ampla gama de aplicações, desde sistemas de ar condicionado em residências até processos químicos e de geração de energia em grandes usinas. Sua versatilidade e eficiência tornam-nos fundamentais para a otimização do uso de calor em diversas atividades industriais e domésticas (ARAÚJO, 2002; SHAH; SEKULIC, 2003).

A transferência de calor em um trocador de calor ocorre principalmente por convecção em cada fluido e condução através da parede que separa os dois fluidos. Ao analisar esses dispositivos, é comum utilizar o coeficiente global de transferência de calor, que engloba a contribuição de todos esses efeitos na transferência de calor. A taxa de transferência de calor

entre os fluidos em um ponto específico do trocador de calor depende da magnitude da diferença de temperatura nesse ponto, a qual varia ao longo do dispositivo (ÇENGEL; GHAJAR, 2012; SHAH; SEKULIC, 2003).

O coeficiente global de troca térmica ( $U$ ) está relacionado com as propriedades do fluido, do escoamento, da diferença de temperatura entre os fluidos e do material do trocador. A Equação 2 descreve a relação entre a taxa de transferência de calor ( $\dot{Q}$ ) em Watts (W) e o coeficiente global de troca térmica.

$$\dot{Q} = U \cdot A_s \cdot \Delta T_{lm} \quad (2)$$

Onde:

$\dot{Q}$  é a taxa de transferência de calor (W);

$U$  é o coeficiente global de troca térmica (W/m<sup>2</sup>·°C);

$A_s$  é a área efetiva de troca térmica (m<sup>2</sup>);

$\Delta T_{lm}$  é a média logarítmica da diferença de temperatura (°C).

Como a diferença de temperatura entre os fluidos quente e frio varia ao longo do trocador de calor, é conveniente dispor da diferença de temperatura média ( $T_m$ ) para uso na Equação 2. A forma adequada da diferença de temperatura média para utilização na análise de trocadores de calor é por meio da diferença de temperatura média logarítmica (Equação 3).

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)} \quad (3)$$

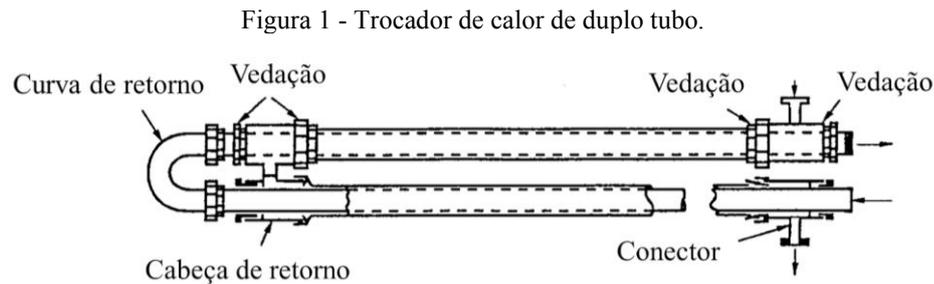
Onde  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$  representam as diferenças de temperatura entre os dois fluidos em ambas as extremidades (entrada e saída) do trocador de calor.

Atualmente, existem vários modelos de trocadores de calor e estes podem ser classificados de diversas maneiras: de acordo com o número de fluidos, a forma construtiva, o arranjo do fluxo, o mecanismo de transferência de calor, entre outros (SHAH; SEKULIC, 2003).

Neste contexto, para compreender a diversidade desses equipamentos e suas utilidades, nos próximos tópicos serão descritos os principais tipos de trocadores de calor, discutindo suas formas construtivas, funcionamentos, vantagens e aplicações.

### 2.2.1 Trocador de calor de duplo tubo

O tipo mais simples de trocador de calor é conhecido como trocador de calor de tubo duplo, que consiste em dois tubos concêntricos de diferentes diâmetros, como pode ser observado na Figura 1 (ARAÚJO, 2002; SHAH; SEKULIC, 2003).



Fonte: Adaptado de Araújo (2002) e Shah & Sekulic (2003).

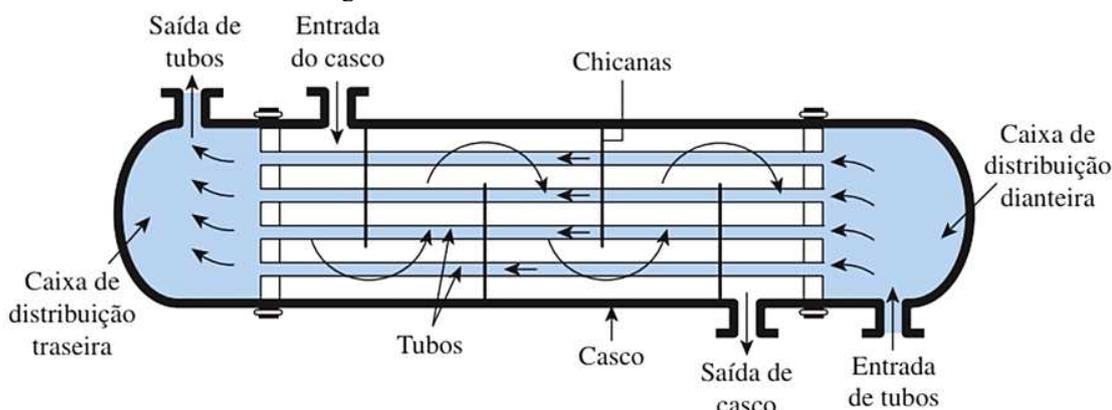
Nesse tipo de trocador de calor, um fluido flui pelo tubo interno enquanto o outro circula pelo espaço anular entre os tubos. A transferência de calor acontece através da parede do tubo interno, permitindo a troca térmica entre os fluidos (ARAÚJO, 2002; SHAH; SEKULIC, 2003).

Esse tipo de trocador apresenta várias vantagens significativas, incluindo facilidade de construção e montagem, possibilidade de ampliação de área, ou seja, a capacidade de adicionar área adicional a uma unidade já existente, e facilidade de manutenção. Além disso, permite um acesso simples para limpeza em ambos os lados de escoamento, dependendo das conexões das extremidades (ARAÚJO, 2002).

### 2.2.2 Trocador de calor de casco e tubo

O trocador de calor mais comum em aplicações industriais é o trocador de calor casco e tubo, ilustrado na Figura 2. Este tipo de trocador de calor é composto por um grande número de tubos, muitas vezes centenas deles, dispostos dentro de um casco com seus eixos paralelos ao do casco (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Figura 2 - Trocador de calor de casco e tubo.



Fonte: Çengel & Ghajar (2012).

A transferência de calor ocorre com um fluido escoando no interior dos tubos, enquanto o outro fluido escoava fora dos tubos, através do casco. Para melhorar a eficiência da transferência de calor e manter o espaçamento entre os tubos uniforme, chicanas são frequentemente colocadas dentro do casco. Essas chicanas forçam o fluido que circula pelo lado do casco a seguir um trajeto mais sinuoso, aumentando a troca de calor (ARAÚJO, 2002; SHAH; SEKULIC, 2003).

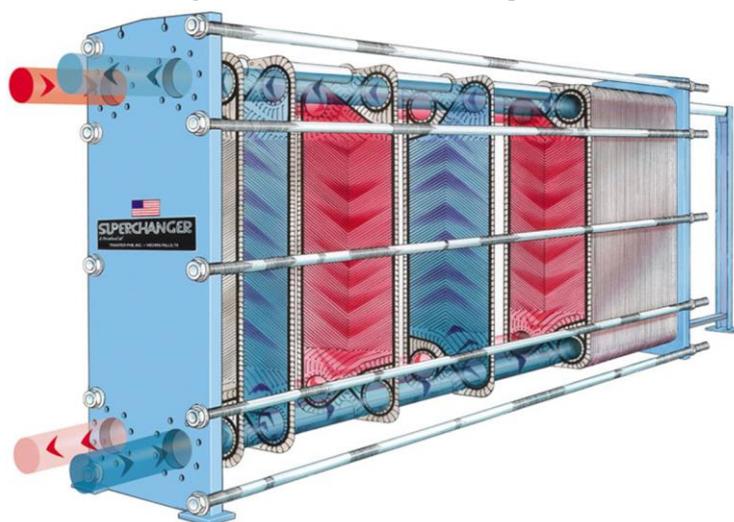
O trocador de calor casco e tubo é amplamente utilizado na indústria devido à sua versatilidade, sendo aplicável em uma ampla variedade de situações. Sua concepção permite adaptação para praticamente qualquer aplicação específica, abrangendo amplas faixas de vazão, temperatura e pressão. É notável por ser o único tipo capaz de atender a processos que demandam extensas áreas de troca de calor (superiores a 5.000 m<sup>2</sup>), operar sob pressões acima de 30 bar e resistir a temperaturas superiores a 260 °C (ARAÚJO, 2002).

Além disso, o trocador de calor casco e tubo pode ser fabricado utilizando diversos materiais, o que possibilita o manuseio de fluidos corrosivos. Sua flexibilidade é realçada pelo fato de poder operar com líquidos, gases ou vapores, assumindo a função de condensador ou vaporizador, e podendo ser instalado tanto em posição horizontal quanto vertical, conforme as necessidades operacionais (ARAÚJO, 2002).

### 2.2.3 Trocador de calor de placas

O trocador de calor de placas (Figura 3) é composto por várias placas finas e corrugadas, normalmente feitas de materiais metálicos, como aço inoxidável ou titânio. As placas são empilhadas e presas entre si, criando canais alternados para o fluxo dos fluidos (ARAÚJO, 2002).

Figura 3 - Trocador de calor de placas.



Fonte: Bell (2002).

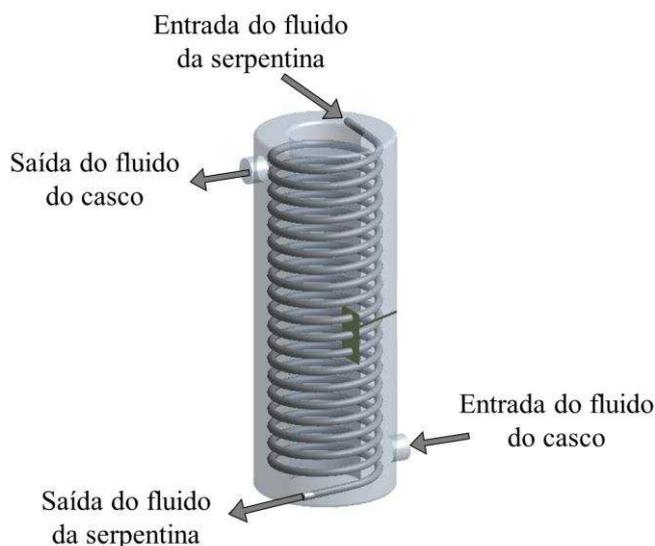
As ondulações presentes nas placas desempenham um papel importante. Além de melhorar a rigidez das placas, elas contribuem para a formação do espaçamento desejado entre as placas, otimizando a eficiência da troca térmica. Para atingir esses objetivos, as placas são projetadas de forma a gerar maior tensão de cisalhamento, promovendo o surgimento de fluxo secundário e aumentando o nível de turbulência no interior do equipamento (SHAH; SEKULIC, 2003).

Nesse tipo de trocador de calor, fluidos quentes e frios escoam em passagens alternadas. Essa disposição faz com que cada fluxo de fluido frio seja cercado por dois fluxos de fluido quente, resultando em uma transferência de calor altamente eficiente. Além disso, a área de troca térmica pode ser facilmente ampliada, bastando adicionar mais placas ao trocador (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

#### 2.2.4 Trocador de calor em serpentina

O trocador de calor tipo serpentina é composto por um tubo em formato helicoidal (serpentina) que está disposto dentro de um casco. Um dos fluidos flui dentro do tubo, enquanto o outro fluido flui através do espaço que circunda a serpentina, como pode ser observado na Figura 4 (BAHREHMAND; ABBASSI, 2016; SILVA *et al.*, 2019).

Figura 4 - Trocador de calor em serpentina.



Fonte: Adaptado de Bahrehmand & Abbassi (2016).

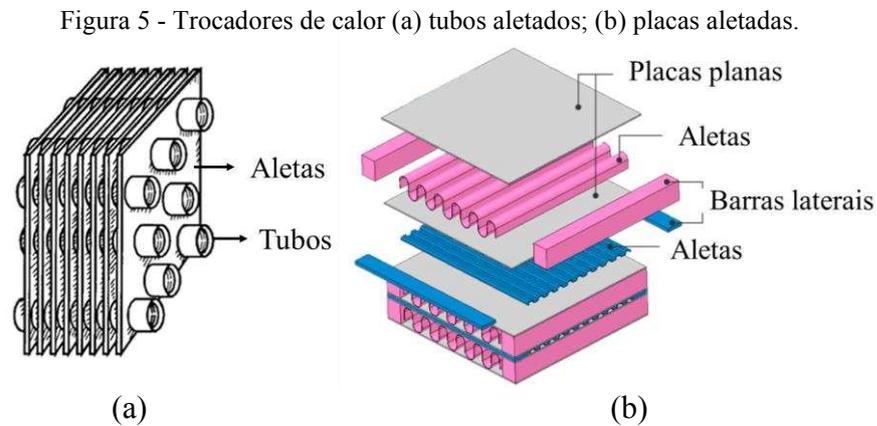
Diversos estudos destacam a performance superior do trocador de calor em formato de serpentina quando comparado aos trocadores de tubos retos. A curvatura do tubo cria uma força centrífuga que atua sobre o fluido em seu interior, gerando um fluxo secundário que aumenta significativamente a eficiência da transferência de calor, além da vantagem de poder acomodar uma grande superfície em um espaço reduzido (BAHREHMAND; ABBASSI, 2016; SILVA *et al.*, 2019).

### 2.2.5 Trocadores de calor aletados

Conforme descrito anteriormente na Equação 1, a taxa de transferência de calor é diretamente proporcional à área de superfície disponível para troca térmica. Sendo assim, para se aumentar a taxa de transferência de calor, tem-se como alternativa aumentar a área de troca térmica por meio da incorporação de superfícies estendidas chamadas aletas, que são feitas de materiais altamente condutores, como o alumínio (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Essas aletas podem ser fabricadas por meio de processos como extrusão, soldagem ou fixação de folhas finas de metal sobre a superfície existente. A presença de aletas aumenta significativamente a transferência de calor a partir da superfície, pois expõe uma área maior ao processo de convecção e radiação. Isso permite otimizar o desempenho térmico do sistema sem a necessidade de grandes modificações estruturais ou substituição completa do equipamento (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Os trocadores de calor aletados podem ser do tipo tubos aletados ou placas aletadas, conforme pode ser observado nas Figuras 5a e 5b, respectivamente.



Fonte: Adaptado de (a) Shah & Sekulic (2003); (b) Sumitomo Precision Products Co., Ltd. (s/d).

Os trocadores de calor aletados são geralmente empregados em situações onde um dos fluidos de operação é um gás. Eles apresentam algumas vantagens, como, por exemplo: alta efetividade; menor volume ocupado se comparado com outras configurações de trocadores de calor; retém menos fluido em seu interior; pode operar com menores diferenças de temperaturas entre os fluidos (ARAÚJO, 2002).

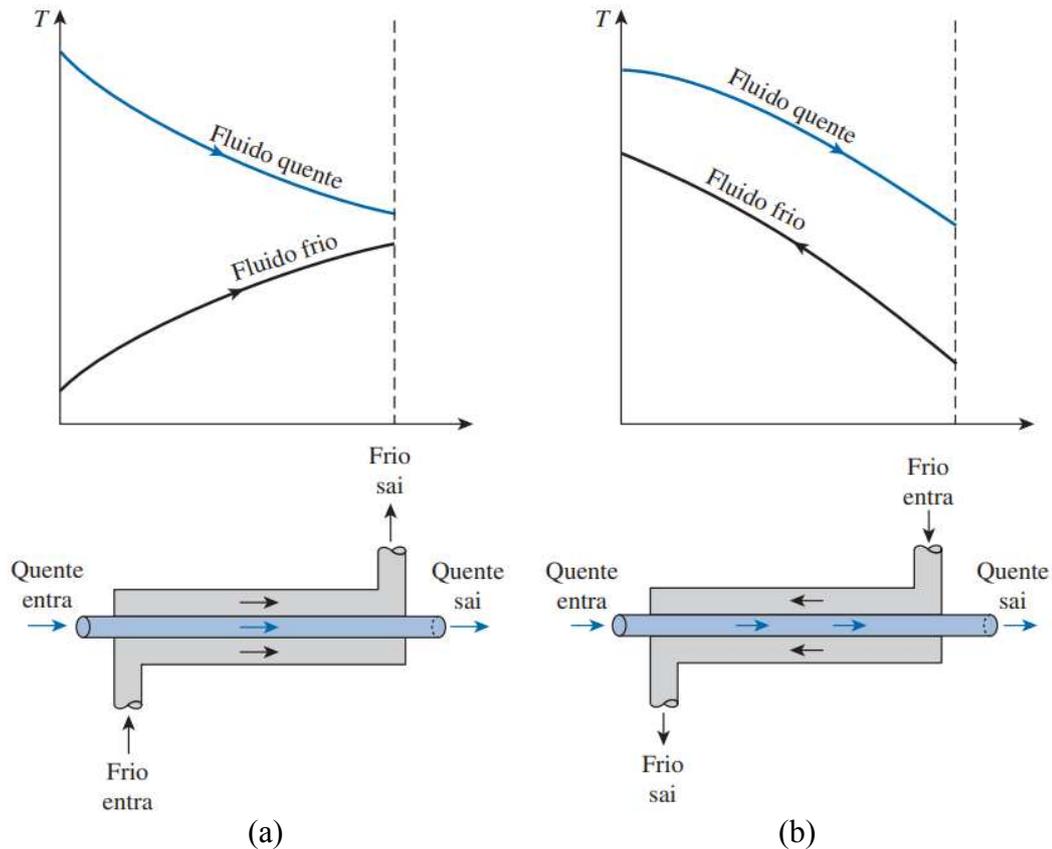
### 2.2.6 Arranjos de escoamento

O escoamento de fluidos em trocadores de calor é um aspecto fundamental para o funcionamento eficiente desses dispositivos, pois afeta diretamente a eficiência da transferência de calor. A escolha do arranjo de fluxo dependerá das especificações do processo, das temperaturas dos fluidos e dos requisitos de transferência de calor (SHAH; SEKULIC, 2003).

Os arranjos de escoamento mais comuns são o escoamento paralelo e o escoamento contracorrente. No escoamento paralelo (Figura 6a), os fluidos quente e frio entram no trocador de calor na mesma extremidade e avançam na mesma direção. Isso geralmente resulta em uma diferença de temperatura relativamente constante entre os fluidos ao longo do comprimento do trocador de calor (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Já no escoamento contracorrente (Figura 6b), os fluidos quente e frio entram no trocador de calor em extremos opostos e escoam em direções opostas. Dessa forma, a diferença de temperatura efetiva é mais alta entre os fluidos, o que geralmente leva a uma maior eficiência na transferência de calor em comparação com o fluxo paralelo (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Figura 6 - Escoamento (a) paralelo e (b) contracorrente.

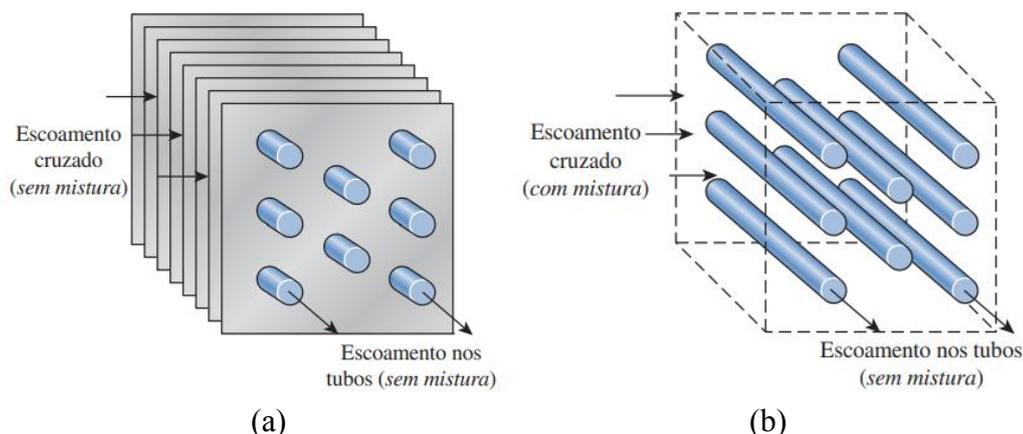


Fonte: Çengel & Ghajar (2012).

Outra configuração de escoamento é o fluxo cruzado, em que os fluidos quente e frio fluem em direções perpendiculares um ao outro. Esse tipo de escoamento é usado em trocadores de calor quando há uma necessidade de troca eficiente de calor entre fluidos que têm temperaturas significativamente diferentes e quando o espaço é limitado. O arranjo em fluxo cruzado permite que os fluidos percorram caminhos curtos através do trocador de calor, o que pode ser benéfico em termos de eficiência e tamanho do equipamento (SHAH; SEKULIC, 2003).

O escoamento cruzado pode ser ainda classificado em escoamento sem mistura e com mistura, como mostrado nas Figuras 7a e 7b. No escoamento cruzado sem mistura, as placas forçam o escoamento do fluido através de um determinado espaço entre elas e evitam que ele se mova na direção transversal (isto é, paralelo aos tubos). Por sua vez, no escoamento cruzado com mistura, o fluido está livre para avançar na direção transversal (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Figura 7 - Escoamento cruzado (a) sem mistura e (b) com mistura.



Fonte: Adaptado de Çengel & Ghajar (2012).

## 2.3 GERADORES DE VAPOR

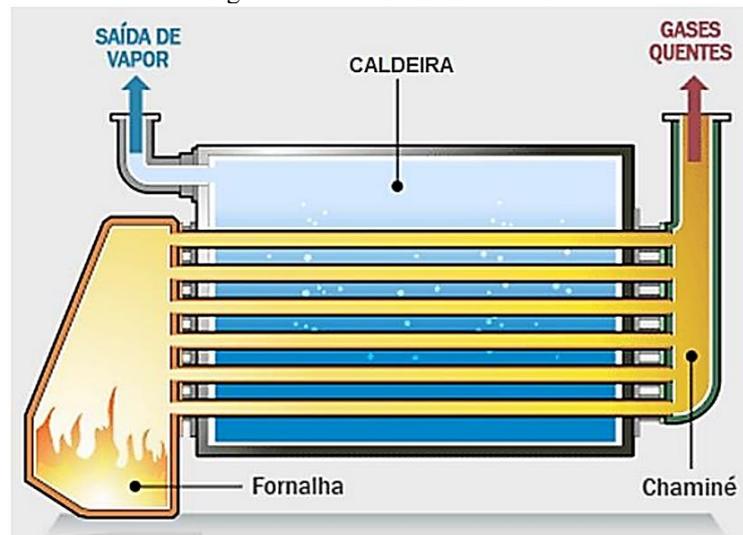
Desde o início do desenvolvimento industrial, o vapor de água tem sido utilizado como meio de geração, transporte e utilização de energia. Os geradores de vapor, comumente chamados de caldeiras, são equipamentos que utilizam o calor produzido pela queima de um combustível para converter água líquida em vapor saturado ou superaquecido. Os gases quentes resultantes da combustão transferem calor para a água, gerando vapor que é utilizado em diversas atividades industriais, incluindo a operação de máquinas, o aquecimento e a geração de energia (ANNARATONE, 2008; STULTZ; KITTO, 2005).

As caldeiras podem ser classificadas de acordo com sua aplicação, tipo de combustível utilizado, pressão de operação, teor de água e também pelo fluxo de água ou gases. A classificação mais comum leva em consideração se o fluxo da caldeira é do tipo aquatubular ou flamotubular (ANNARATONE, 2008; STULTZ; KITTO, 2005).

### 2.3.1 Caldeiras flamotubulares

As primeiras caldeiras flamotubulares contendo vários tubos de gás foram projetadas por volta de 1870, sendo atualmente constituídas de um vaso de pressão cilíndrico horizontal com dois tampos planos, denominados espelhos, onde estão fixados os tubos e a fornalha. Nesse tipo de caldeira, os gases de combustão circulam dentro dos tubos, vaporizando a água que está do lado externo dos mesmos, como pode ser observado na Figura 8 (ANNARATONE, 2008; STULTZ; KITTO, 2005).

Figura 8 - Caldeira flamotubular.



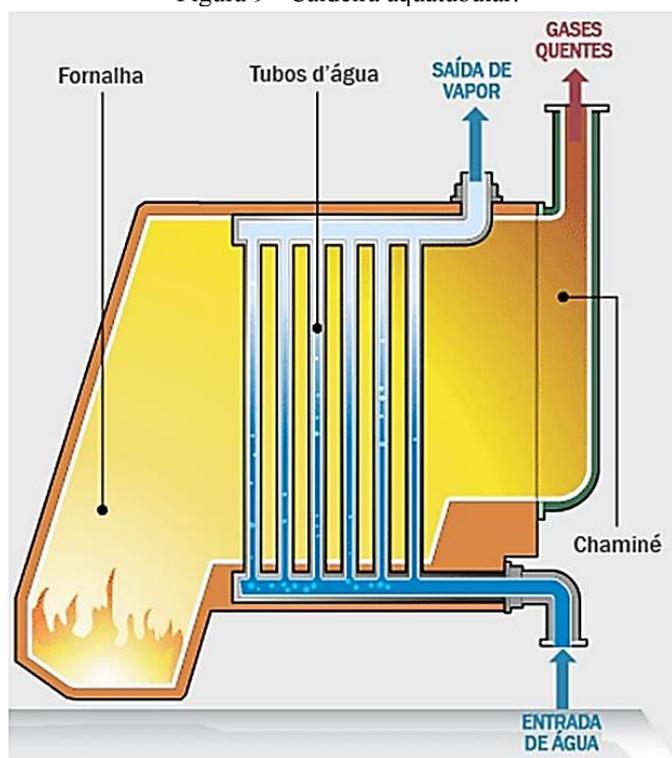
Fonte: Biglia (2016).

Esta classificação de caldeira é geralmente aplicável às instalações de pequeno porte, onde a pressão de trabalho é de até 15 bar. Outro ponto relevante a se considerar sobre as caldeiras flamotubulares é a sua susceptibilidade aos perigos de explosão. Devido à sua estrutura construtiva, a pressão do vapor age diretamente sobre a carcaça externa da caldeira, o que torna os riscos associados bastante pertinentes (BAZZO, 1995).

### 2.3.2 Caldeiras aquatubulares

Os primeiros passos para o desenvolvimento de caldeiras aquatubulares foram dados em 1766, sendo que em 1788 alguns tipos de caldeiras aquatubulares foram patenteadas por James Rumsey. Neste tipo de caldeira, os gases de combustão quentes passam pelo lado externo dos tubos, enquanto a água circula pelo interior dos tubos (Figura 9). A transferência de calor ocorre através da parede dos tubos e, conforme a água é aquecida pelos gases de combustão, ela se transforma em vapor (ANNARATONE, 2008; STULTZ; KITTO, 2005).

Figura 9 - Caldeira aquatubular.



Fonte: Biglia (2016).

As caldeiras aquatubulares possuem algumas vantagens em relação às flamotubulares, dentre elas: maior produção de vapor; possibilidade de trabalho com elevadas pressões; trabalho em elevadas temperaturas; maior variedade nos tipos de combustíveis e maior vida útil (ANNARATONE, 2008; STULTZ; KITTO, 2005).

### 2.3.3 Combustíveis

Ao longo de muitos anos, os derivados de petróleo desempenharam um papel dominante como combustíveis industriais, atendendo à maioria das necessidades nessa área. No entanto, nas últimas décadas, houve um aumento na pesquisa e utilização de outros tipos de combustíveis, especialmente aqueles que têm um impacto ambiental reduzido em comparação com os combustíveis fósseis. Essa tendência reflete a busca por fontes de energia mais limpas e sustentáveis (BIZZO, 2003).

A maioria dos combustíveis industriais apresentam em sua composição os seguintes elementos ou compostos: carbono, hidrogênio, oxigênio, enxofre, nitrogênio, água e cinzas. O carbono e o hidrogênio são os elementos que mais contribuem para o poder calorífico dos

combustíveis, enquanto que o oxigênio é geralmente presente em combustíveis vegetais e diminui o poder calorífico dos combustíveis (BIZZO, 2003).

Os combustíveis utilizados em caldeiras industriais podem ser categorizados de acordo com a sua forma física em sólidos, líquidos e gasosos. A escolha do combustível depende de vários fatores como disponibilidade, custo, eficiência energética e impacto ambiental (ANNARATONE, 2008).

Os combustíveis sólidos são materiais de origem vegetal utilizados para combustão, como a madeira, o lenhito e o carvão, podendo também ser empregados resíduos sólidos e biomassa. Entre as características mais importantes dos combustíveis sólidos estão o teor de matéria volátil, cinzas, umidade, enxofre, ponto de fusão das cinzas, poder calorífico. Além disso, as características físicas de interesse são: tamanho, densidade e porosidade, calor específico isobárico, condutividade térmica e viscosidade das cinzas (ANNARATONE, 2008).

Os combustíveis líquidos mais importantes são o óleo de alcatrão, o destilado do xisto betuminoso e o óleo combustível produzido a partir do petróleo. O óleo combustível é a fração mais importante dos combustíveis para os sistemas de aquecimento industrial, devido a seu baixo preço. Entre as principais características dos combustíveis líquidos, estão sua composição química (a razão entre o conteúdo de carbono e hidrogênio), teor de enxofre, água, sedimentos e cinzas (ANNARATONE, 2008; BIZZO, 2003).

Por fim, tem-se os combustíveis gasosos, sendo os mais populares o gás liquefeito de petróleo (GLP) e o gás natural. O GLP é uma mistura de hidrocarbonetos propano e butano; já o gás natural é composto principalmente por metano. Embora o metano tenha um poder calorífico superior ao propano e ao butano, outros componentes presentes no gás natural reduzem seu poder calorífico, tornando-o menor em comparação com o GLP (ANNARATONE, 2008).

O enxofre é um componente comum em muitos combustíveis fósseis, como carvão, petróleo bruto e seus derivados, como óleo diesel e gasolina. Quando esses combustíveis são queimados, o enxofre presente neles é oxidado durante a combustão e pode ser liberado na forma de dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e, em menor medida, trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ). Esses gases são poluentes atmosféricos e podem contribuir para problemas ambientais e de saúde pública, entre eles a chuva ácida, que ocorre quando o  $\text{SO}_2$  e o  $\text{SO}_3$  reagem com a umidade atmosférica, formando o ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) (FATH; JORGENSEN, 2020).

#### *2.3.3.1 Eficiência da combustão*

A eficácia da combustão em caldeiras desempenha um papel crucial na operação de sistemas de aquecimento e produção de energia, uma vez que tem um impacto direto tanto no desempenho energético quanto nas implicações ambientais associadas à operação da caldeira. A eficiência da combustão refere-se à capacidade da caldeira de extrair o máximo de energia possível do combustível, transformando-o em calor útil e minimizando as perdas, como apresentado na Equação 4 (ERBAS, 2021; BORA; NAKKEERAN, 2014).

$$\text{Eficiência da Combustão (\%)} = \frac{\text{Energia Útil Gerada}}{\text{Energia Total no Combustível}} \times 100 \quad (4)$$

Ao analisar as perdas de calor em uma caldeira, muitos fatores devem ser levados em consideração. As principais perdas de calor são as seguintes: tipo e qualidade do combustível, combustão incompleta, excesso de ar, limpeza e manutenção da caldeira, perda de calor sensível dos gases de combustão, carga da caldeira, entre outros (ERBAS, 2021; BORA; NAKKEERAN, 2014).

Melhorar a eficiência da combustão não apenas economiza energia e reduz os custos operacionais, mas também reduz as emissões de poluentes atmosféricos, tornando a operação da caldeira mais ambientalmente amigável. Portanto, é fundamental investir em tecnologias e práticas que otimizem a eficiência da combustão em sistemas de caldeiras (ERBAS, 2021; BORA; NAKKEERAN, 2014).

## 2.4 SECADORES DE TECIDO

Os equipamentos secadores de tecido, também denominados ramas, são amplamente utilizados na indústria têxtil para a realização de processos de secagem, acabamento, além de controle de largura e gramatura de tecidos. Durante o processo, o tecido é sustentado e transportado através da rama por duas correntes paralelas sem fim, enquanto ar quente é soprado através do tecido, produzindo assim a evaporação da água. O ar quente é recirculado e uma certa quantidade de ar é continuamente removida do sistema através de exaustores, para evitar acúmulo excessivo de umidade. Nessa medida, o sistema é complementado por ar fresco (CAY; TARAKÇIOĞLU; HEPBASLI, 2007).

As ramas podem ser classificadas devido aos seus sistemas de aquecimento de ar, que pode ser realizado por vapor indireto, óleo quente e gás direto. As ramas aquecidas a vapor não têm ampla utilização devido à sua baixa eficiência e limitações de temperatura. Um dos

aquecimentos mais eficientes é garantido pela queima direta de gás. Existem também algumas unidades de queima indireta a gás, mas suas eficiências são baixas quando comparadas aos sistemas de queima direta. Os tipos de ramas aquecidas a óleo térmico requerem uma pequena caldeira de óleo térmico (geralmente a gás), e a sua eficiência é inferior à dos sistemas aquecidos a gás direto. No entanto, eles têm a vantagem de poderem ser usados em uma ampla faixa de temperaturas (CAY; TARAKÇIOĞLU; HEPBASLI, 2007).

Os secadores de tecidos são equipamentos longos, normalmente compostos de vários módulos em série, em geral de 7 a 8. Por trabalharem em elevadas temperaturas, as ramas consomem elevada quantidade de energia e sua exaustão contém uma quantidade substancial de calor residual. Estima-se que cerca de metade da energia térmica utilizada nas indústrias têxteis é consumida em processos de acabamento e secagem (RAKIB *et al.*, 2017; CAY; TARAKÇIOĞLU; HEPBASLI, 2007).

## 2.5 TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS

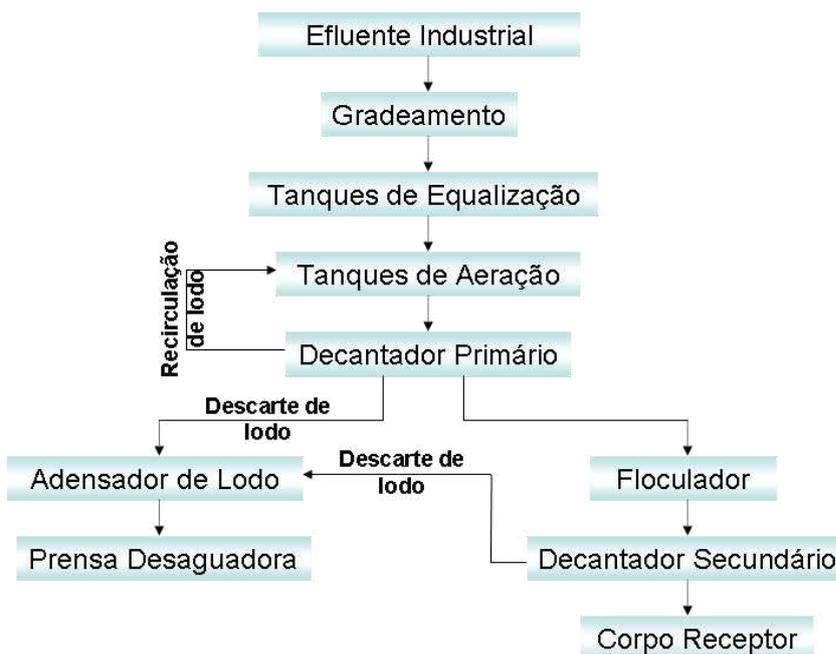
A indústria têxtil é responsável por gerar uma considerável quantidade de efluentes, que contêm níveis significativos de coloração, demanda bioquímica de oxigênio, sólidos suspensos e baixas concentrações de oxigênio dissolvido. Entre as várias substâncias químicas presentes nesse contexto, destaca-se a preocupação com os corantes sintéticos, devido à sua notável toxicidade e resistência à ação microbiana (CASTRO, 2010).

Para tratar esses efluentes, técnicas baseadas em processos de coagulação seguidos de separação por flotação ou sedimentação têm demonstrado uma eficácia considerável na remoção de partículas em suspensão (KUNZ *et al.*, 2022).

De maneira geral, a indústria têxtil utiliza abordagens que combinam processos físico-químicos, como a precipitação-coagulação, com tratamento biológico através de sistemas de lodos ativados. Esse sistema exibe uma eficiência relativamente alta, permitindo a remoção de aproximadamente 80% da carga de corantes. No entanto, enfrenta-se um desafio considerável relacionado ao acúmulo de lodo, uma vez que a quantidade de corantes adsorvidos é substancial, o que inviabiliza qualquer tentativa de reutilização (KUNZ *et al.*, 2022).

Um sistema típico empregado para o tratamento de efluentes têxteis pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma do tratamento de efluentes têxteis.



Fonte: Dalponte (2009).

A etapa inicial do tratamento de efluentes têxteis consiste no gradeamento, um conjunto de barras paralelas inclinadas com determinados espaçamentos, onde detritos (sólidos, fibras e fibrilas de tecido) ficam retidos (DALPONTE, 2009).

Em seguida, o efluente segue para o tanque de equalização, que tem como principal função manter a vazão contínua do fluxo de efluentes, bem como homogeneizar todo o material ali contido, com o objetivo de evitar que a estação de tratamento receba variações expressivas de carga e contaminantes (DALPONTE, 2009).

No tratamento biológico de efluentes, é fundamental a presença de tanques de aeração para fornecer oxigênio para o meio líquido e assim possibilitar a ocorrência de reações bioquímicas por microrganismos aeróbicos (DALPONTE, 2009).

O efluente é então submetido à decantação primária. Nessa etapa tem-se a geração do lodo que consiste principalmente em materiais orgânicos, microrganismos e sólidos em suspensão mais pesados que se depositam no fundo dos tanques. Parte desse lodo é recirculado para o tanque de aeração enquanto outra parte é descartada (DALPONTE, 2009).

Outra etapa fundamental no tratamento de efluentes é a floculação, onde são introduzidos os produtos químicos necessários para eventual remoção de cor do efluente e auxílio na formação de flocos, como coagulantes, polímeros e descolorantes (DALPONTE, 2009).

Por fim, o efluente segue para o decantador secundário, onde ocorrerá novamente a sedimentação e o descarte de lodo (DALPONTE, 2009).

O lodo segue para tratamento em adensadores de lodo e prensas desaguadoras, que têm por finalidade remover o excesso de água do lodo, reduzindo assim seu volume e peso. Nos adensadores, o lodo é alimentado em um tanque grande e raso, onde os sólidos em suspensão se depositam no fundo à medida que a água clarificada se acumula na parte superior e o lodo espessado é removido no fundo do tanque (DALPONTE, 2009).

Para finalizar o processo, na prensa desaguadora o lodo é tratado com um coadjuvante de floculação (polímero), antes de passar por um floculador e ser distribuído sobre a esteira da prensa desaguadora. A prensagem ocorre por meio de cilindros, deixando o lodo com 80 a 85% de umidade restante. A água retirada do lodo, juntamente com a água de lavagem da esteira, retorna ao tanque biológico. O lodo desidratado é coletado em um container e é encaminhado para um aterro sanitário como destino final (DALPONTE, 2009).

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho se encaixa na categoria de pesquisa bibliográfica, conforme categorizada por Gil (2002), uma vez que foi conduzido com base em informações previamente publicadas, especialmente em livros, artigos científicos, trabalhos acadêmicos e outros materiais disponíveis eletronicamente.

A metodologia aplicada foi baseada na revisão da literatura em bases de dados como *Web Of Science*, *Science Direct* e *Google Scholar*. Os tópicos de pesquisa foram subdivididos em: aproveitamento energético de caldeiras; aproveitamento energético de efluentes quentes e aproveitamento energético de secadores de tecido.

Com as informações levantadas, foi elaborada uma proposta de dimensionamento de trocadores de calor para aproveitar os gases quentes provenientes dos secadores de tecido, utilizando-se como base a equação de transferência de calor (Equação 5) e a equação dos gases ideais (Equação 6).

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (5)$$

$$P\dot{V} = \dot{m}RT \quad (6)$$

Como complemento, foram realizadas visitas nas empresas Benecke Irmãos & Cia, especializada em caldeiras, e Bermo®, fabricante de trocadores de calor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO NA INDÚSTRIA TÊXTIL

De acordo com Benedetti, Giordano e Salvio (2022), na indústria têxtil, as principais fontes de calor residual são provenientes de águas residuais do processamento químico de tecidos (purga, tingimento, lavagem, alvejamento, etc) e de gases de exaustão da secagem de tecidos, cujas temperaturas variam na faixa de 40–96 °C e 100–190 °C, respectivamente.

Dessa forma, a recuperação de calor do ar e gases de exaustão de queimadores e caldeiras, bem como a recuperação de calor de águas residuais do processamento de tecidos são classificadas como as intervenções mais relevantes no setor têxtil (BENEDETTI; GIORDANO; SALVIO, 2022).

Atualmente, existem diversas tecnologias de recuperação de calor residual, como: economizadores de calor, trocadores de calor, Ciclos de Cogeração (CHP), geradores termoelétricos, Ciclos de Rankine Orgânicos (ORC), sistemas de absorção, entre outros (JOUHARA *et al.*, 2018; RAKIB *et al.*, 2017; FARHAT *et al.*, 2022).

Os economizadores de calor são um tipo de dispositivo de troca de calor que utiliza a energia térmica residual dos gases de exaustão para pré-aquecer a água de alimentação da caldeira, reduzindo assim a temperatura dos gases de exaustão e melhorando a eficiência da caldeira, de modo a economizar combustível (TANG *et al.*, 2021). Segundo Rakib *et al.* (2017), a instalação de um economizador para pré-aquecer a água de alimentação da caldeira reduz o consumo de combustível em 5–10%.

O sistema de economizadores consiste em tubos cobertos por aletas metálicas para maximizar a área superficial de absorção de calor e a taxa de transferência de calor. Os dutos transportam os gases de exaustão da caldeira e absorvem o calor residual, deixando os gases quentes passarem por diferentes seções cobertas pelos tubos aletados. A água de alimentação passa pelos tubos e captura o calor dos mesmos. A água é então realimentada ao sistema, maximizando a eficiência térmica (JOUHARA *et al.*, 2018).

Na indústria têxtil, o aproveitamento energético é realizado principalmente por trocadores de calor. Como apresentado anteriormente, os trocadores de calor são dispositivos que transferem calor de um fluido para outro sem que eles se misturem. Dessa forma, um trocador de calor pode ser usado para capturar o calor de um fluido quente e transferi-lo para outro fluido, como água fria ou ar, que pode ser usado em processos de aquecimento (SHAH; SEKULIC, 2003).

Os Ciclos de Cogeração (CHP) envolvem a geração simultânea de eletricidade e calor útil a partir de uma única fonte de energia, como o calor residual. A fonte de energia é usada para acionar um gerador elétrico, que converte parte dessa energia em eletricidade. Enquanto a eletricidade é gerada, o calor residual produzido durante esse processo é utilizado para fins úteis, como aquecimento de água ou até mesmo para alimentar processos industriais que requerem calor (JOUHARA *et al.*, 2018; SIPILÄ, 2016).

Dessa forma, a eletricidade é utilizada para alimentar as necessidades elétricas da instalação, enquanto o calor útil é usado para atender às demandas de aquecimento. Essa abordagem proporciona uma eficiência significativamente maior do que a geração separada de eletricidade e calor, onde o calor residual muitas vezes é desperdiçado (JOUHARA *et al.*, 2018; SIPILÄ, 2016).

Também estão disponíveis sistemas que produzem eletricidade diretamente a partir do calor residual e eliminam a necessidade de conversão de calor em energia mecânica para produzir energia elétrica. Essas tecnologias incluem o uso de dispositivos termoeletricos, piezoeletricos, termiônicos e termofotovoltaicos para geração de eletricidade (JOUHARA *et al.*, 2018).

Outra tecnologia de recuperação de energia são os Ciclos de Rankine Orgânicos (ORC). Os ciclos ORC são usados para recuperar energia térmica de efluentes quentes e convertê-la em eletricidade. Eles funcionam usando um fluido orgânico que evapora a baixas temperaturas e, em seguida, condensa-se, acionando uma turbina e um gerador elétrico (JOUHARA *et al.*, 2018).

Em alguns casos, sistemas de absorção podem ser usados para capturar o calor de efluentes quentes e usá-lo para acionar um ciclo de refrigeração ou outros processos industriais. Outra opção é o armazenamento térmico, onde o calor dos efluentes quentes pode ser armazenado em materiais termicamente isolados, como tanques ou sólidos de armazenamento de calor, para ser usado posteriormente quando necessário.

De modo geral, a escolha da tecnologia de recuperação de energia depende da temperatura, quantidade e disponibilidade de calor residual, bem como das necessidades específicas da aplicação. A recuperação de energia na indústria têxtil não melhora apenas a eficiência energética, mas também reduz o impacto ambiental e os custos operacionais, tornando-a uma estratégia valiosa para a sustentabilidade e a economia de recursos.

## 4.2 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE CALDEIRAS

As caldeiras desempenham um papel fundamental em uma variedade de indústrias, sendo responsáveis pela geração de vapor e energia térmica. No entanto, grande parte dessa energia é frequentemente dissipada na forma de calor residual, resultando em perdas significativas. É nesse contexto que a recuperação de energia em caldeiras se destaca como uma estratégia valiosa para otimizar o aproveitamento de recursos energéticos, reduzir custos operacionais e minimizar o impacto ambiental (FARHAT *et al.*, 2022).

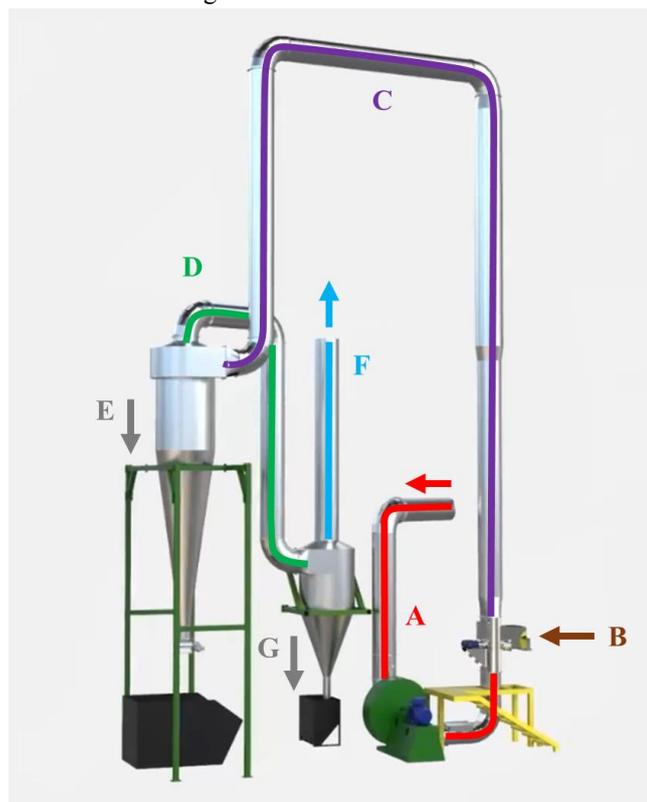
Uma das formas de se reaproveitar o calor na indústria têxtil é pela utilização dos gases quentes de exaustão de caldeiras para a secagem de lodo proveniente das estações de tratamento de efluentes.

Durante o tratamento biológico de efluentes têxteis, como banhos residuais de tingimento, a decomposição destas substâncias ocorre pela ação de microrganismos. Esta decomposição gera como resíduo grande quantidade de lodo ao longo do tempo. Para que a biota se mantenha saudável e eficiente é necessária a retirada do lodo excedente.

A secagem deste material para posterior descarte em aterro é um fator com elevado potencial para economia de recursos, visto que a presença de umidade encarece o transporte até o aterro e a retirada desta umidade por sua vez necessita de elevada quantidade de energia.

Uma das tecnologias desenvolvidas para a secagem de lodo utilizando calor recuperado é o uso de secadores integrados ao sistema de exaustão de gases provenientes da queima de combustível em caldeiras. A empresa SecaMais Metalúrgica LTDA, localizada na cidade de Blumenau (SC), é fabricante de um sistema que se baseia nesses princípios para desumidificação de lodo. O esquema de funcionamento pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Secador de lodo.



Fonte: Adaptado de SecaMais (2023).

Neste sistema, os gases de exaustão da caldeira são inseridos no equipamento de secagem pela corrente A da Figura 10. Para acelerar o fluxo dos gases pelo sistema, a corrente A é impulsionada por uma turbina rotacionada por um motor elétrico. O lodo, previamente submetido a uma prensa desaguadora, é inserido no equipamento pela corrente B da Figura 10. Segundo SecaMais (2023), para que a secagem no equipamento seja eficiente, o lodo deve ser alimentado com no máximo 85% de umidade.

O fluxo de gases quentes da corrente A ao entrar em contato com a corrente B arrasta o material sólido, originando a corrente C. O contato do lodo com os gases quentes resulta na secagem do lodo. O fluxo vertical de subida da corrente C é proposital, dificultando o arraste do lodo e permitindo maior tempo de contato entre os gases quentes e o material a ser seco. Ao fim da coluna de secagem, o lodo encontra-se com umidade média de 6% (SECAMAIS, 2023).

Em seguida, a corrente C é despejada em um separador do tipo ciclone. O lodo seco é coletado pela ação da gravidade na parte inferior do ciclone, pela corrente E. Os gases por sua vez saem pela parte superior do ciclone (corrente D) e são direcionados a um lavador de gases (SECAMAIS, 2023). A passagem pelo lavador de gases garante que qualquer particulado carregado acidentalmente pela corrente D seja removido antes dos gases serem expelidos ao

ambiente. A coleta do material particulado é feita pela parte inferior do lavador (corrente G) e os gases limpos são liberados ao meio ambiente pela corrente F (SECAMAIS, 2023).

Ainda de acordo com a fabricante, este sistema permite a redução de até 82% no peso do lodo, se comparado a apenas submeter o material a prensa desaguadora, e possibilita a economia de até 90% da energia elétrica ou térmica necessária para a secagem e descarte deste rejeito.

#### 4.3 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE EFLUENTES QUENTES

O processamento de materiais têxteis requer o aquecimento da água até a temperatura necessária para a operação e, em seguida, o resfriamento das águas residuais geradas a 40 °C para tratamento biológico, o que requer uma grande quantidade de energia. Atualmente, os custos operacionais para aquecimento de água e resfriamento de águas residuais representam 16,2% e 6,7% do custo de produção, respectivamente, de acordo com o padrão convencional da indústria têxtil (KIM *et al.*, 2022).

A utilização de efluentes quentes para fins energéticos consiste em recuperar e aproveitar o calor residual originado em processos industriais, sistemas de resfriamento ou outras fontes de calor, com o propósito de gerar energia ou aquecer água. Essa abordagem representa uma estratégia de eficiência energética, uma vez que contribui para minimizar o desperdício de energia térmica que, de outra forma, seria dissipada no ambiente (NAGPAL *et al.*, 2021).

O conteúdo de calor disponível para recuperação de águas residuais pode ser calculado usando a equação de transferência de calor, expressa na Equação 7.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (7)$$

Onde:

$\dot{Q}$  é o conteúdo de calor recuperado por unidade de tempo (W);

$\dot{m}$  é a taxa de fluxo de massa (kg/s);

$C_p$  é a capacidade térmica específica do efluente (kJ/kg·°C);

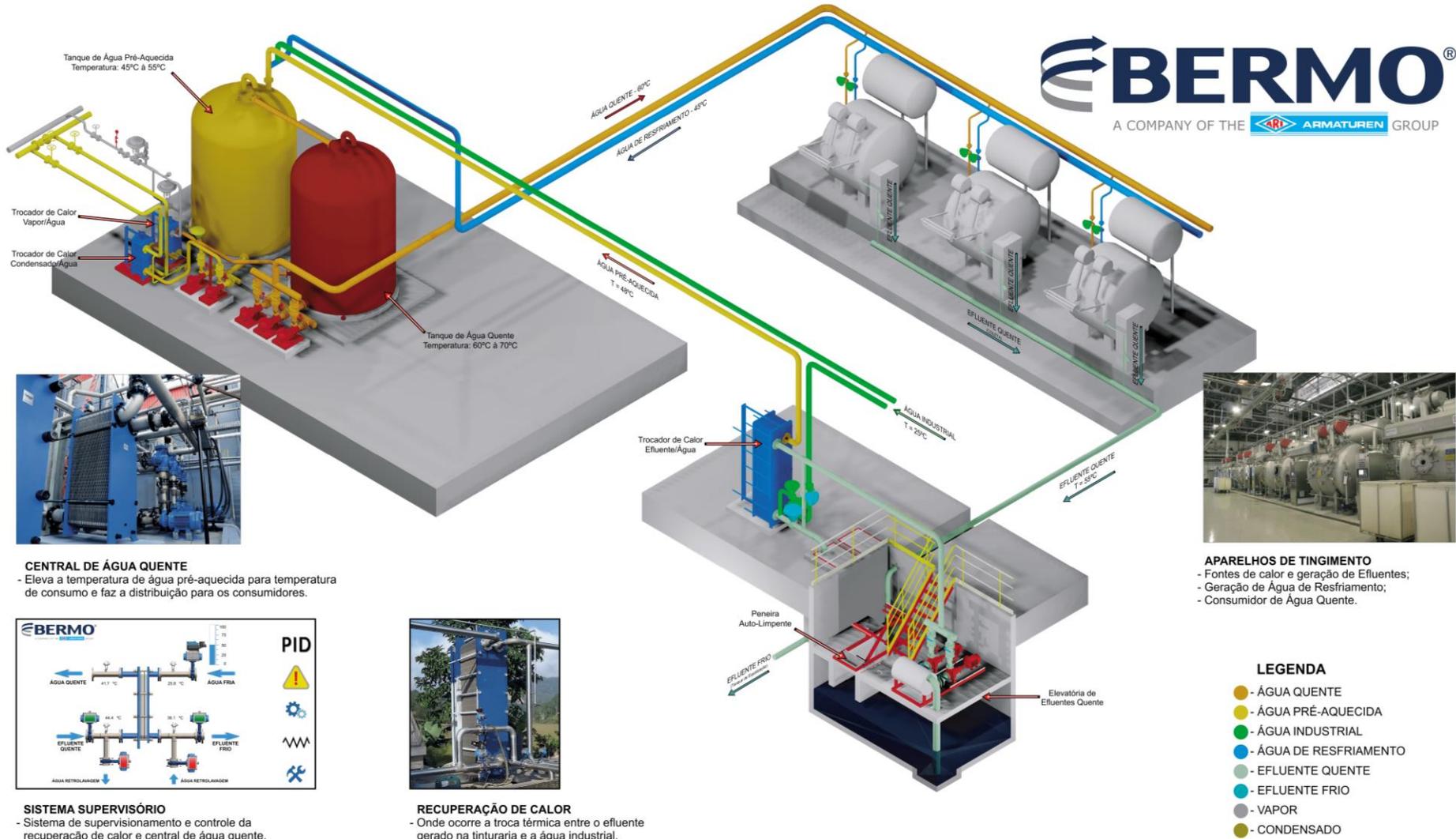
$\Delta T$  é a diferença de temperatura (°C).

De acordo com a Equação 7, uma vazão e temperatura mais altas dos efluentes resultam em um maior potencial de recuperação de calor.

No estudo de Rakib *et al.* (2017), um sistema de recuperação de calor residual baseado em um trocador de calor de contrafluxo foi projetado. O efluente quente dos processos têxteis foi primeiramente levado para um reservatório intermediário e, em seguida, foi bombeado através do trocador de calor. Simultaneamente, água fria foi fornecida e aquecida através do trocador de calor. As águas residuais foram encaminhadas à estação de tratamento de efluentes e a água pré-aquecida foi levada para um novo tanque isolado. Esta água quente foi utilizada diretamente nas máquinas de produção, o que levou à redução do consumo de combustível e do tempo do processo.

Um exemplo prático de um sistema de recuperação de energia de efluentes quentes foi observado durante visita à empresa Bermo® (Apêndice A). Foi possível compreender o funcionamento do sistema, que atua juntamente com uma central de água quente, conforme pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Recuperação de calor e central de água quente.



**CENTRAL DE ÁGUA QUENTE**  
 - Eleva a temperatura de água pré-aquecida para temperatura de consumo e faz a distribuição para os consumidores.



**SISTEMA SUPERVISÓRIO**  
 - Sistema de supervisonamento e controle da recuperação de calor e central de água quente.



**RECUPERAÇÃO DE CALOR**  
 - Onde ocorre a troca térmica entre o efluente gerado na tinturaria e a água industrial.

**APARELHOS DE TINGIMENTO**  
 - Fontes de calor e geração de Efluentes;  
 - Geração de Água de Resfriamento;  
 - Consumidor de Água Quente.

- LEGENDA**
- - ÁGUA QUENTE
  - - ÁGUA PRÉ-AQUECIDA
  - - ÁGUA INDUSTRIAL
  - - ÁGUA DE RESFRIAMENTO
  - - EFLUENTE QUENTE
  - - EFLUENTE FRIO
  - - VAPOR
  - - CONDENSADO

Fonte: Bermo (2022).

Esse sistema está conectado a máquinas de tingimento têxtil, onde geralmente tem-se banhos em elevada temperatura. Ao final do processo, os banhos são destinados ao tratamento de efluentes, entretanto, a temperatura deve estar adequada para não comprometer as etapas de tratamento, principalmente a ação dos microrganismos. Para realizar o resfriamento desse efluente, o mesmo segue para um trocador de calor de placas, onde troca energia térmica com um fluido frio. Esse fluido frio ganha calor e se torna pré-aquecido, sendo destinado a tanques de apoio para que posteriormente seja utilizado nos processos industriais. O efluente resfriado, por sua vez, segue para a estação de tratamento em temperatura adequada (BERMO, 2022).

Dessa forma, o sistema de recuperação de calor apresenta diversos benefícios não apenas em termos de agilidade no resfriamento, mas também na eficiência e eficácia do tratamento biológico de efluentes industriais, com a possibilidade de eliminação de odores e a recuperação do calor contido no fluido, contribuindo para processos mais sustentáveis e econômicos (BERMO, 2022).

#### 4.4 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE SECADORES DE TECIDO

O reaproveitamento energético de ramas é fundamental para tornar a indústria têxtil mais sustentável, eficiente e econômica, tendo em vista a ampla utilização desses equipamentos e considerando o fato de trabalharem em elevadas temperaturas, consumindo elevada quantidade de energia e liberando uma quantidade substancial de calor residual (RAKIB *et al.*, 2017; CAY; TARAKÇIOĞLU; HEPBASLI, 2007).

No estudo de Rakib *et al.* (2017), aproximadamente 10% da energia usada nas ramas foi economizada com a instalação de um trocador de calor de placas tipo ar-ar com fluxo cruzado. O trocador de calor foi projetado de modo a extrair o calor residual do ar de exaustão para pré-aquecer o ar fresco fornecido às operações da rama. A temperatura do ar de alimentação foi aumentada de 26-28 °C para 80-90 °C, enquanto a temperatura de exaustão caiu de 160-190 °C para 90-110 °C.

Já no estudo de Mazo-Restrepo, Alvarado e Cacua (2021), foi projetado um sistema de recuperação de calor com termossifões, recuperando calor dos gases de exaustão da rama para pré-aquecer o ar de alimentação. Com esse sistema, o consumo de energia térmica foi reduzido em 30,1%.

Os autores Cinar e Ceylan (2021) demonstraram que o consumo de combustível em ramas pode ser diminuído significativamente pelo uso de trocadores de calor, sendo o resultado obtido com uma redução de 13,6%.

Fiaschi *et al.* (2017) apresentaram uma melhoria da rede de recuperação de calor de exaustão de baixa temperatura de uma rama. O modelo integrado com Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) permitiu o redesenho detalhado dos recuperadores de calor, bem como uma reformulação completa do layout da rede de trocadores de calor água-gás. Os trocadores de calor foram reprojatados com aletas internas, e o calor total recuperado em cinco diferentes configurações de aletas variou entre 53 a 97%.

Dentre as alternativas disponíveis no mercado para a recuperação energética em secadores e ramas têxteis, destacam-se as soluções propostas pela empresa Laudati System®. O sistema Laudatec é acoplado às tubulações de exaustão de gases quentes e permite a utilização deste calor para aquecimento de ar limpo para entrada na rama, sendo este sistema chamado de ar/ar, ou ainda o aquecimento de água, sistema ar/água, para utilização em outras aplicações.

Para ambos os sistemas, o princípio de operação é similar. Os gases quentes que saem da rama e seriam liberados ao meio ambiente são direcionados a um conjunto de trocadores de calor, por onde também passa o fluido a ser aquecido (LAUDATI, 2023). A montagem do equipamento pode ser visualizada na Figura 13.

Figura 13 - Instalação do recuperador de calor Laudatec.

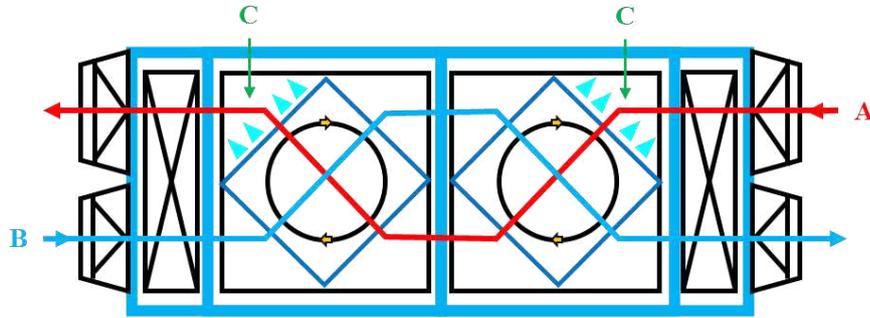


Fonte: Laudati, 2023.

Para o sistema do tipo ar/ar, os gases quentes da saída das ramas entram no recuperador de calor pelo ponto A da Figura 14. O fluxo quente acompanha a corrente de cor vermelha, passando por dois módulos cúbicos de trocadores de calor do tipo aletado (Figura 15a). Pelo ponto B da Figura 14, tem-se a entrada do ar limpo e em temperatura ambiente (corrente azul), a qual também passa pelo conjunto de trocadores de calor e é aquecida por meio dos gases

quentes. O ar limpo após aquecido é direcionado para a admissão de ar da rama, reduzindo significativamente o gasto energético para elevação de temperatura no interior do equipamento (LAUDATI, 2023).

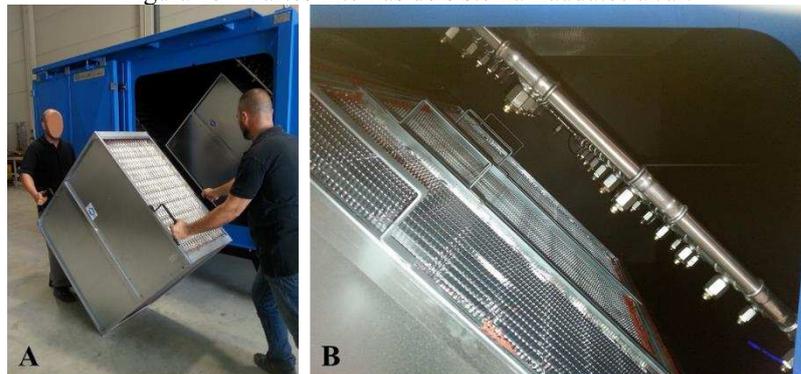
Figura 14 - Sistema Laudatec ar/ar.



Fonte: Adaptado de Laudati, 2023.

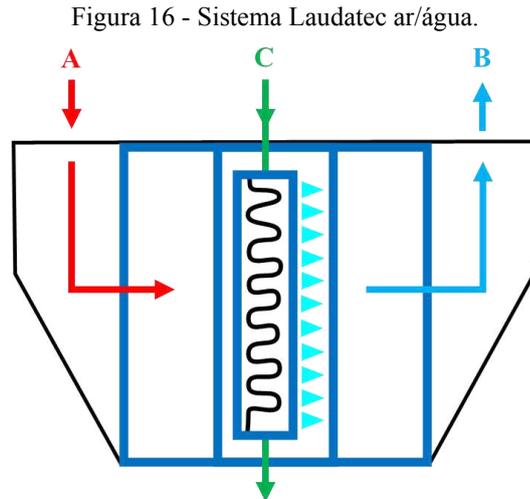
Ainda de acordo com a fabricante do sistema, para garantir que os gases de exaustão sejam liberados ao meio ambiente com redução de até 30% nos níveis de CO<sub>2</sub> e 30% das emissões de NO<sub>x</sub>, o interior do recuperador de calor conta com dois dispositivos lavadores de gases, identificados pela letra C na Figura 14 e expostos na Figura 15b. Os contaminantes são retirados pelo processo de lavagem, enquanto os gases de exaustão são emitidos ao meio ambiente limpos e em temperaturas menores (LAUDATI, 2023).

Figura 15 - Partes internas do sistema Laudatec ar/ar.



Fonte: Adaptado de Laudati, 2023.

Além do dispositivo ar/ar, a fabricante disponibiliza ainda um sistema para reutilização dos gases quentes no aquecimento de água. A Figura 16 apresenta um diagrama dos fluxos no interior do equipamento.

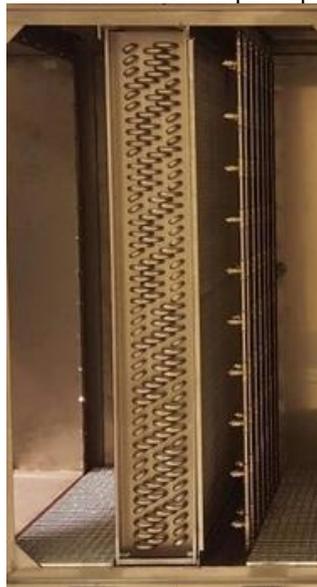


Fonte: Adaptado de Laudati, 2023.

A corrente A da Figura 16 indica a entrada dos gases quentes provenientes da rama, o fluxo de ar é direcionado a um trocador de calor do tipo serpentina aletada (Figura 17). Após passagem pelo trocador de calor, a corrente A é submetida a um processo de lavagem dos gases, retirando contaminantes de modo análogo ao visto anteriormente no sistema ar/ar. Após a lavagem, os gases já resfriados deixam o equipamento pela corrente B.

A água a ser aquecida entra no sistema pela corrente C, passando pelo interior da serpentina aletada e recebendo o calor cedido pelo ar quente. Após a troca térmica, a água está pronta para seguir para outras etapas do processo têxtil.

Figura 17 - Trocador de calor do tipo serpentina aletada.



Fonte: Laudati, 2023.

Tanto o sistema ar/ar quanto o sistema ar/água se mostram alternativas com ganhos consideráveis na economia de energia e apresentam elevado potencial para a recuperação de calor em ramos têxteis. Ainda de acordo com o fabricante, o uso destes recuperadores permite uma economia de até 30% de energia para o trocador de calor ar/ar e até 40% de economia para o trocador de calor ar/água (LAUDATI, 2023).

#### 4.4.1 Dimensionamento para aquecimento de ar para a própria rama

Para simular condições de operação de um sistema de reaproveitamento de calor dos gases de exaustão de uma rama, utilizou-se como base o Exercício 11-57 de Çengel e Ghajar (2012), adaptando o exemplo para condições reais de uma indústria têxtil.

Inicialmente, estabeleceu-se que ar ( $C_P = 1005 \frac{J}{kg \cdot K}$ ) deve ser preaquecido por gases quentes em um trocador de calor de escoamento cruzado antes de entrar em uma rama. O ar entra no trocador de calor a 95 kPa e 20 °C, a uma taxa de 0,8 m<sup>3</sup>/s. Os gases de exaustão da rama ( $C_P = 1100 \frac{J}{kg \cdot K}$ ) entram a 180 °C a uma taxa de 18.000 m<sup>3</sup>/h e saem a 95 °C. O produto do coeficiente global de transferência de calor e da superfície de transferência de calor é  $UA_S = 1200 \text{ W/K}$ .

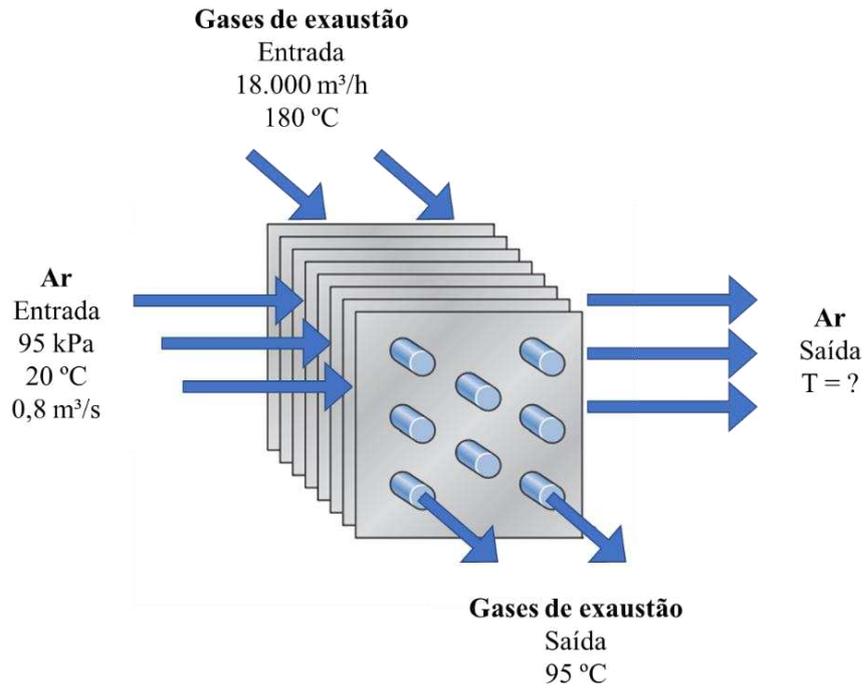
Considerando ambos os fluidos sem mistura, buscou-se determinar a taxa de transferência de calor e a temperatura de saída do ar, para verificar a viabilidade do reaproveitamento energético.

##### Solução:

Primeiramente, esquematizou-se o fluxo das correntes passando pelo trocador, conforme pode ser visualizado na Figura 18. Para o cálculo do calor transferido e determinação da temperatura de saída do ar, utilizou-se a equação de transferência de calor (Equação 8).

$$\dot{Q} = \dot{m} C_P (T_{entrada} - T_{saída}) \quad (8)$$

Figura 18 - Representação do trocador de calor ar-ar de fluxo cruzado.



Fonte: adaptado de Çengel de Ghajar (2012).

Inicialmente, determinou-se a vazão mássica de ar atravessando o sistema. Para isso, foi utilizado um rearranjo da equação dos gases ideais, representada pela Equação 9.

$$\dot{m}_{ar} = \frac{P\dot{V}}{RT} = \frac{95 \text{ kPa} \cdot 0,8 \text{ m}^3/\text{s}}{0,287 \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 293 \text{ K}} = 0,904 \text{ kg/s} \quad (9)$$

Após determinação da vazão mássica para o ar limpo a ser aquecido, realizou-se o mesmo processo para os gases de exaustão, conforme visto nas Equações 10, 11 e 12.

$$\dot{m}_{gases \text{ de exaustão}} = \frac{101,2 \text{ kPa} \cdot \dot{V}}{0,287 \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 453 \text{ K}} \quad (10)$$

$$\dot{V} = 18.000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 5 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11)$$

$$\dot{m}_{gases \text{ de exaustão}} = \frac{101,2 \text{ kPa} \cdot 5 \text{ m}^3/\text{s}}{0,287 \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 453 \text{ K}} = 3,892 \text{ kg/s} \quad (12)$$

Em posse da vazão mássica, bem como do coeficiente de calor específico e temperaturas de entrada e saída para os gases quentes, foi possível determinar a taxa de transferência de calor, conforme visto na Equação 13.

$$\dot{Q} = 3,892 \frac{kg}{s} \cdot 1,1 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} (180 - 95) = 363,902 kW \quad (13)$$

Considerando que o calor cedido pelos gases de exaustão é absorvido pelo ar, determinou-se a temperatura de saída do ar limpo pré-aquecido a partir das Equações 14, 15 e 16.

$$T_{saída} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} C_p} + T_{entrada} \quad (14)$$

$$T_{saída} = \frac{363902 W}{0,904 \frac{kg}{s} \cdot 1005 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}} + 20 ^\circ C \quad (15)$$

$$T_{saída} = 420,54 ^\circ C \quad (16)$$

Após o cálculo, constatou-se que a temperatura do ar igual a 420,54 °C é consideravelmente elevada para sua aplicação em ramas têxteis. Assim, buscou-se uma vazão de ar para a qual a temperatura de saída fosse de 180 °C, mais condizente com a aplicação têxtil.

Desse modo, utilizando-se a equação de transferência de calor, inserindo-se os valores conhecidos para temperaturas de entrada e saída de ar, bem como calor transferido e calor específico, determinou-se a vazão mássica (Equações 17 e 18).

$$363902 W = \dot{m} \cdot 1005 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} (180 - 20) \quad (17)$$

$$\dot{m} = 2,26 kg/s \quad (18)$$

A fim de determinar a vazão volumétrica para a corrente de ar, utilizou-se novamente o rearranjo da equação dos gases ideais (Equações 19 e 20).

$$\dot{m} = \frac{P\dot{V}}{RT} \quad (19)$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}RT}{P} = \frac{2,26 \frac{kg}{s} \cdot 0,287 \frac{kPa \cdot m^3}{kg \cdot K} \cdot 293 K}{95 kPa} = 2,00 m^3/s \quad (20)$$

Assim, determinou-se que 2,00 m<sup>3</sup>/s é a vazão volumétrica necessária para aquecer ar limpo de 20 °C para 180 °C, com a vazão de gases quentes da saída da rama igual a 3,892 kg/s.

Outra situação testada foi considerar a metade da vazão dos gases de exaustão (2,5 m<sup>3</sup>/s) e determinar o calor transferido e a temperatura de saída do ar limpo aquecido.

Solução:

Primeiramente, determinou-se a vazão mássica dos gases de exaustão a partir da Equação 21.

$$\dot{m}_{gases\ de\ exaustão} = \frac{101,2 kPa \cdot 2,5 m^3/s}{0,287 \frac{kPa \cdot m^3}{kg \cdot K} \cdot 453 K} = 1,946 kg/s \quad (21)$$

Com isso, calculou-se a taxa de transferência de calor, como pode ser observado na Equação 22.

$$\dot{Q} = 1,946 \frac{kg}{s} \cdot 1,1 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} (180 - 95) = 181,951 kW \quad (22)$$

A temperatura de saída do ar limpo pré-aquecido foi calculada a partir das Equações 23, 24 e 25.

$$T_{saída} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} C_P} + T_{entrada} \quad (23)$$

$$T_{saída} = \frac{181951 W}{0,904 \frac{kg}{s} \cdot 1005 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}} + 20 ^\circ C \quad (24)$$

$$T_{saída} = 220,27 ^\circ C \quad (25)$$

Neste caso, a temperatura de saída de 220,27 °C também se mostra elevada para o ar pré-aquecido na aplicação em ramas têxteis. Dessa maneira, buscou-se uma vazão de ar para

que a temperatura de saída fosse igual a 180 °C, considerando a vazão dos gases de exaustão igual a 1,946 kg/s.

Com base nas Equações 26 e 27, determinou-se a vazão mássica de 1,13 kg/s para o ar a ser pré-aquecido.

$$181951 \text{ W} = \dot{m} \cdot 1005 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} (180 - 20) \quad (26)$$

$$\dot{m} = 1,13 \text{ kg/s} \quad (27)$$

A vazão mássica foi convertida em vazão volumétrica conforme apresentado nas Equações 28 e 29.

$$\dot{m} = \frac{P\dot{V}}{RT} \quad (28)$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}RT}{P} = \frac{1,13 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 0,287 \frac{\text{kPa} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 293 \text{ K}}{95 \text{ kPa}} = 1,00 \text{ m}^3/\text{s} \quad (29)$$

Dessa forma, conclui-se que é possível aquecer 1,13 kg/s (ou 1,00 m<sup>3</sup>/s) de ar limpo de 20 °C até 180 °C com o reaproveitamento do calor residual dos gases de exaustão de uma rama, nas condições estabelecidas neste exemplo.

#### 4.4.2 Dimensionamento para aquecimento de água limpa

Utilizando como base a simulação anterior, realizou-se o cálculo para o aquecimento de água limpa a 20 °C ( $C_p = 4182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ), buscando determinar para qual vazão seria possível o seu aquecimento até 50 °C e 80 °C.

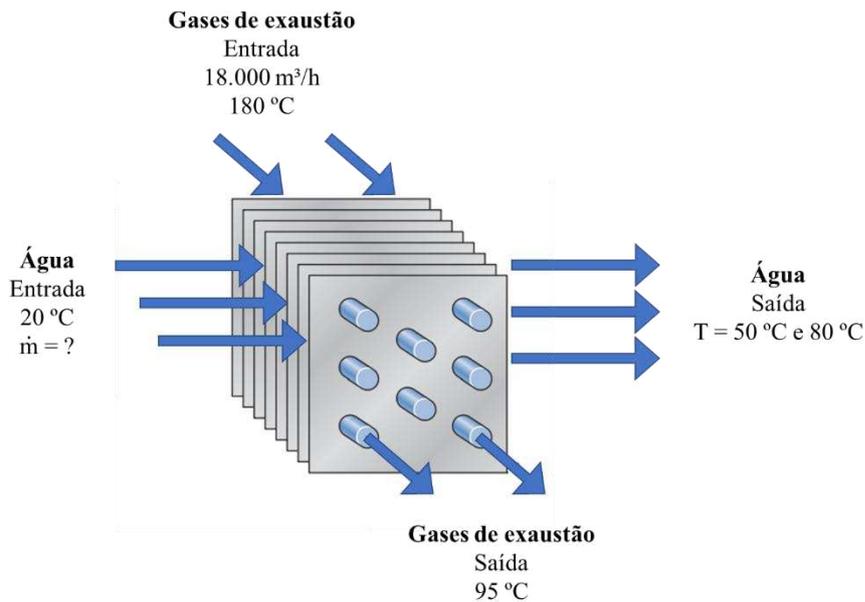
Da mesma forma que no exemplo anterior, os gases de exaustão da rama ( $C_p = 1100 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ) entram no trocador de calor a 180 °C a uma taxa de 18.000 m<sup>3</sup>/h e saem a 95 °C.

Neste caso, o produto do coeficiente global de transferência de calor e da superfície de transferência de calor é  $UA_S = 2400 \text{ W/K}$ , visto que  $U_{ar/ar}$  varia entre 10 e 40, enquanto  $U_{ar/água}$  varia de 30 a 60, praticamente o dobro do valor (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Solução:

Para resolução deste exemplo, considerou-se o esquema apresentado na Figura 19, que demonstra o trocador de calor ar-água de fluxo cruzado.

Figura 19 - Representação do trocador de calor ar-água de fluxo cruzado.



Fonte: adaptado de Çengel de Ghajar (2012).

Partindo-se da equação de transferência de calor, determinou-se a taxa de transferência de calor dos gases de exaustão (Equação 30).

$$\dot{Q}_{\text{água}} = 2 \cdot \dot{Q}_{\text{ar}} = 727804 \text{ W} \quad (30)$$

Supondo a necessidade de aquecimento de água até 50 °C, calculou-se a vazão como demonstrado nas Equações 31, 32 e 33.

$$50 \text{ }^{\circ}\text{C} = \frac{727804 \text{ W}}{\dot{m} \cdot 4182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}} + 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (31)$$

$$\dot{m} = \frac{727804 \text{ W}}{30 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot 4182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}} \quad (32)$$

$$\dot{m} = 5,80 \text{ kg/s} \quad (33)$$

Esse resultado demonstra que, ao trabalhar com água a uma vazão de 5,80 kg/s, é possível utilizar os gases de exaustão da rama para aquecê-la até 50 °C.

Para o aquecimento de água até 80 °C, calculou-se a vazão como demonstrado nas Equações 34, 35 e 36.

$$80 \text{ }^{\circ}\text{C} = \frac{727804 \text{ W}}{\dot{m} \cdot 4182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}} + 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (34)$$

$$\dot{m} = \frac{727804 \text{ W}}{60 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot 4182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}} \quad (35)$$

$$\dot{m} = 2,90 \text{ kg/s} \quad (36)$$

Dessa forma, conclui-se que a vazão de água ideal para o seu aquecimento até 80 °C é de 2,90 kg/s, para as condições estabelecidas nesta simulação.

#### 4.4.3 Cálculo de economia de vapor

Como complemento às simulações para aquecimento de ar e água, foi determinada a quantidade de vapor economizada por meio da recuperação energética por trocadores de calor. Para tal, assumiu-se que a empresa conta com rede de vapor pressurizada a 5,0 bar.

Propriedades do vapor a 5 bar, segundo Tabela 3.1 Çengel e Ghajar (2012):

- Calor sensível = 159,3 kcal/kg
- Calor latente = 498,5 kcal/kg

Manteve-se constante a taxa de transferência de calor determinada no exemplo anterior, igual a 727804 W. A fim de se trabalhar com as mesmas unidades de medida, foi realizada a conversão expressa na Equação 37.

$$727804 \text{ W} = 173,85 \text{ kcal/s} \quad (37)$$

Dessa forma, calculou-se a quantidade de vapor aquecida a partir do calor recuperado, conforme descrito nas Equações 38 e 39.

$$498,5 \text{ kcal} \cdot x = 173,85 \text{ kcal/s} \cdot 1 \text{ kg} \quad (38)$$

$$x = 0,348 \frac{\text{kg vapor}}{\text{s}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ dia}} = 30.067 \text{ kg vapor/dia} \quad (39)$$

Supondo o custo de R\$ 80,00 por tonelada de vapor, pode-se estimar o valor economizado a partir da recuperação energética (Equação 40).

$$30 \text{ toneladas/dia} \times \text{R\$ } 80,00 = \text{R\$ } 2.400,00/\text{dia} \quad (40)$$

Esse resultado evidencia os potenciais ganhos monetários da adoção de tecnologias de recuperação energética, além de tornar o processo mais sustentável.

## 5 CONCLUSÕES

A utilização de sistemas de recuperação de calor residual em processos industriais tem sido fundamental como uma das principais áreas de investigação para reduzir o consumo de combustível, diminuir as emissões nocivas e melhorar a eficiência da produção. A seleção de métodos e técnicas de recuperação de calor depende em grande parte de fatores-chave como a qualidade, a quantidade e a natureza da fonte de calor em termos de adequação e eficácia.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo descrever os possíveis aproveitamentos energéticos na indústria têxtil, bem como simular condições de operação de um sistema para aproveitamento dos gases quentes do processo de secagem de tecido.

Com relação ao aproveitamento energético de caldeiras, o enxofre desempenha um papel crucial. Este componente presente nos combustíveis, quando queimado, desencadeia processos de corrosão em metais, o que torna desafiadora a incorporação de qualquer tipo de equipamento no interior das chaminés com o propósito de aproveitamento energético. Conseqüentemente, a utilização dos gases quentes de caldeiras se concentra principalmente na secagem do lodo proveniente do tratamento biológico. Outra alternativa para a maximização da energia seria direcionar esses gases para trocadores de calor no exterior das chaminés, a fim de aquecer o ar ou a água.

Quando se trata de efluentes quentes na indústria têxtil, a recuperação de energia desses efluentes oferece uma série de vantagens, não apenas acelerando o processo de resfriamento, mas também melhorando a eficiência do tratamento biológico de efluentes e permitindo o pré-aquecimento da água para etapas subsequentes do processo.

No que diz respeito ao reaproveitamento energético de secadores de tecidos, o calor residual dos gases de exaustão pode ser aplicado no pré-aquecimento tanto de ar quanto de água, ou ainda em um sistema combinado de aquecimento ar-água.

Dessa forma, pode-se concluir que as tecnologias de recuperação de calor vem sendo cada vez mais exploradas, refletindo uma preocupação legítima com a eficiência energética e a sustentabilidade em várias indústrias e setores. A pesquisa contínua e o desenvolvimento de novas tecnologias de recuperação de calor estão impulsionando a inovação e levando a soluções mais eficazes e econômicas, o que torna ainda mais atraente a exploração dessas tecnologias.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Tendo como base as conclusões alcançadas neste estudo, foram delineadas as seguintes recomendações para prosseguir com a pesquisa:

- Aproveitamento dos gases quentes de exaustão proveniente da queima de combustíveis na caldeira;
- Aprofundamento na análise da qualidade do calor residual e composição dos gases e avaliação do impacto ambiental;
- Integração de sistemas de recuperação de calor;
- Exploração de tecnologias emergentes.

## REFERÊNCIAS

ANNARATONE, Donatello. **Steam Generators: Description and Design**. Milão: Springer, 2008. 434 p.

ARAÚJO, Everaldo César da Costa. **Trocadores de Calor**. 1. ed. São Paulo: EdUFSCar, 2002. 108 p.

BAHREHMAND, Sam; ABBASSI, Abbas. Heat Transfer and Performance Analysis of Nanofluid Flow in Helically Coiled Tube Heat Exchangers. **Chemical Engineering Research And Design**, [S.L.], v. 109, p. 628-637, maio 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2016.03.022>. Acesso em: 01 ago. 2023.

BAZZO, Edson. **Geração de Vapor**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. 216 p.

BELL, Joe. **Maintaining a Plate Heat Exchanger**. Tranter PHE, Inc. 2002. Disponível em: <https://www.process-heating.com/articles/86243-maintaining-a-plate-heat-exchanger>. Acesso em: 26 jul. 2023.

BENEDETTI, Miriam; GIORDANO, Lorena; SALVIO, Marcello. Explorative Study on Waste Heat Production Intensity and Recovery Practices in The Textile Sector: First Steps Towards The Creation Of a Decision Support Tool Based On Real Data. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 359, p. 131928, jul. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131928>. Acesso em: 08 out. 2023.

BERMO. **Soluções Avançadas para as Áreas de Troca e Recuperação de Energia Térmica**. Catálogo. 3. ed. 2022. Disponível em: <https://bermo.com.br/arquivos/filemanager/downloads/catalogo/Catalogo-Trocador-de-Calor-Troca-Termica-Bermo%20Thermal.pdf>. Acesso em: 30 set. 2023.

BIGLIA, Felipe Mercês. **Análise do Cordão de Solda no Processo de Soldagem de Caldeiras a Vapor**. 2016. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2016. Disponível em: [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11820/2/GP\\_COEME\\_2016\\_1\\_02.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11820/2/GP_COEME_2016_1_02.pdf). Acesso em: 17 jul. 2023.

BIZZO, Waldir A. **Geração, Distribuição e Utilização de Vapor**. Apostila de Curso da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. 2003. 163 p.

CASTRO, Thiago Morais de. **Solidificação/Estabilização do Lodo Gerado no Tratamento de Efluente de Lavanderia Industrial Têxtil em Blocos Cerâmicos Acústicos e seu Desempenho em Câmara Reverberante**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Urbana, Centro de Tecnologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/3583>. Acesso em: 22 out. 2023.

CAY, Ahmet; TARAKÇIOĞLU, I.; HEPBASLI, Arif. Exergetic Performance Assessment Of a Stenter System In a Textile Finishing Mill. **International Journal Of Energy Research**, [S.L.], v. 31, n. 13, p. 1251-1265, 25 out. 2007. Hindawi Limited. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/er.1295>. Acesso em: 30 set. 2023.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 928 p.

CINAR, Gelir; CEYLAN, Havva. The Effect of The Heat Recovery on Fuel Consumption in The Stenter Machine. **Thermal Science**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 1047-1055, 2021. National Library of Serbia. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2298/tsci190510336c>. Acesso em: 08 out. 2023.

DALPONTE, Francis. **Estágio Curricular Obrigatório: Têxtil Farbe LTDA**. 2009. 45 p. Relatório de Estágio Curricular Obrigatório - Curso de Engenharia Química, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2009.

ELSAID, Khaled *et al.* Recent Progress on The Utilization of Waste Heat For Desalination: A Review. **Energy Conversion And Management**, [S.L.], v. 221, p. 113105, out. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113105>. Acesso em: 30 set. 2023.

ERBAS, Oguzhan. Investigation of Factors Affecting Thermal Performance in a Coal - Fired Boiler and Determination of Thermal Losses by Energy Balance Method. **Case Studies In Thermal Engineering**, [S.L.], v. 26, n. 101047, ago. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csite.2021.101047>. Acesso em: 02 set. 2023.

FARHAT, Obeida *et al.* A Recent Review on Waste Heat Recovery Methodologies and Applications: Comprehensive Review, Critical Analysis and Potential Recommendations. **Cleaner Engineering And Technology**, [S.L.], v. 6, p. 100387, fev. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clet.2021.100387>. Acesso em: 02 set. 2023.

FATH, Brian D.; JORGENSEN, Sven E. **Managing Air Quality and Energy Systems**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2020. 823 p.

GIL, Antonio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas S.A, 2002. 176 p.

JOUHARA, Hussam *et al.* Waste Heat Recovery Technologies and Applications. **Thermal Science And Engineering Progress**, [S.L.], v. 6, p. 268-289, jun. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsep.2018.04.017>. Acesso em: 30 set. 2023.

KIM, Yurim *et al.* Optimizing Wastewater Heat Recovery Systems in Textile Dyeing Processes Using Pinch Analysis. **Applied Thermal Engineering**, [S.L.], v. 214, p. 118880, set. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118880>. Acesso em: 08 out. 2023.

KUNZ, Airton *et al.* Novas Tendências no Tratamento de Efluentes Têxteis. **Química Nova**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 78-82, fev. 2002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422002000100014>. Acesso em: 22 out. 2023.

LAUDATI. **LAUDATEC - Equipos de Recuperación**. 2023. Disponível em: <https://laudati.net/>. Acesso em: 30 set. 2023.

MAZO-RESTREPO, Ricardo; ALVARADO, Pedro; CACUA, Karen. Analysis of Potential Waste Heat Recovery From a Stenter in a Textile Plant. **Dyna**, [S.L.], v. 88, n. 217, p. 292-302, 24 maio 2021. Universidad Nacional de Colombia. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v88n217.93354>. Acesso em: 27 ago. 2023.

NAGPAL, Himanshu *et al.* Heat Recovery from Wastewater - A Review of Available Resource. **Water**, [S.L.], v. 13, n. 9, 30 abr. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/w13091274>. Acesso em: 19 set. 2023.

RAKIB, Muhammad Iftekharul *et al.* Waste-heat Utilization – The Sustainable Technologies to Minimize Energy Consumption in Bangladesh Textile Sector. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 142, p. 1867-1876, jan. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.098>. Acesso em: 30 set. 2023.

RAMÍREZ, Rafael *et al.* Evaluation of the Energy Recovery Potential of Thermoelectric Generators in Diesel Engines. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 241, n. 118412, dez. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118412>. Acesso em: 02 set. 2023.

SECAMAIS. **Secador de Resíduos Flash Dryer**. 2023. Disponível em: <https://secamais.ind.br/>. Acesso em: 30 set. 2023.

SHAH, Ramesh K.; SEKULIC, Dusan P. **Fundamentals of Heat Exchanger Design**. 1. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. 976 p.

SILVA, Marianne Tinoco *et al.* Construção de um Trocador de Calor Tubular em Espiral. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, [S.L.], p. 82-104, 3 out. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-quimica/tubular-em-espiral>. Acesso em: 01 ago. 2023.

SIPILÄ, Kari. Cogeneration, Biomass, Waste to Energy and Industrial Waste Heat for District Heating. **Advanced District Heating And Cooling (DHC) Systems**, [S.L.], p. 45-73, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-1-78242-374-4.00003-3>. Acesso em: 30 set. 2023.

STULTZ, Steven C.; KITTO, John B. **Steam: Its Generation and Use**. 41. ed. Ohio: The Babcock & Wilcox Company, 2005. 1040 p.

SUMITOMO PRECISION PRODUCTS CO., LTD. **Plate-Fin Heat Exchanger**, “**SUMALEX®**”. s/d. Disponível em: <https://www.spp.co.jp/netsu/en/products/smalex/>. Acesso em: 31 jul. 2023.

TANG, Wei *et al.* Constructal Design For a Boiler Economizer. **Energy**, [S.L.], v. 223, p. 120013, maio 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2021.120013>. Acesso em: 19 set. 2023.

## APÊNDICE A – VISITA TÉCNICA A BERMO

Visita realizada na unidade da Bermo Válvulas e Equipamentos Industriais, sediada na Rua Maringá, nº 40, Bairro Salto do Norte, Blumenau – SC.

A apresentação e atendimento foi concedido pelo Eng. Lucas Belino, onde nos apresentou a empresa e os segmentos de atuação, com ênfase nos projetos e tecnologias no reaproveitamento energético através de trocadores de calor e com sistemas de armazenamento dos efluentes aproveitados.

Ênfase na tecnologia *free flow*, que consiste em trocadores de calor que utilizam gaxetas com espessuras maiores, aplicadas em efluentes com particulados, com o intuito de evitar o entupimento dos canais de escoamento evitando a manutenção precoce do sistema.

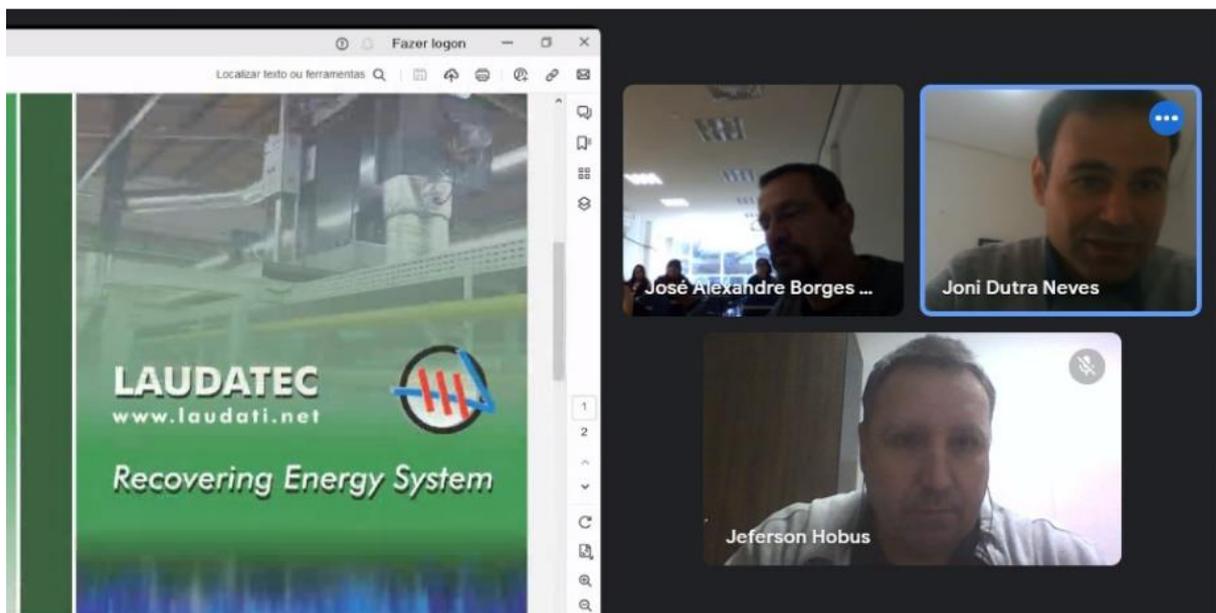


## APÊNDICE B – PALESTRA LAUDATEC

Palestra realizada pelo Sr. Joni Dutra Neves (proprietário), no dia 28 de agosto de 2023, *on-line* em horário de aula, onde foi apresentada a empresa Laudatec LTDA, sediada na Rua Barbosa, 1531, Joinville – SC. A empresa atua na recuperação energética do ar quente no processo de ramagem.

Foi abordado o reaproveitamento do calor proveniente dos gases dos campos de uma rama, redirecionando através de dutos para um trocador de calor com fluxo cruzado sem contato dos dois circuitos, ar limpo com ar de exaustão da rama.

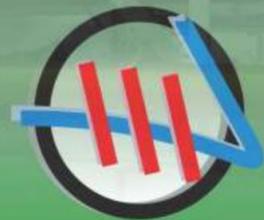
No processo de reaproveitamento o que chamou a atenção foram *sprays* aplicados no trocador de calor em tempos programados para limpeza das aletas do trocador, com a finalidade de favorecer a limpeza da condensação de óleos enzimáticos provenientes de tecidos sintéticos através da evaporação no momento da termofixação do processo de ramagem.



ANEXO A – CATÁLOGO LAUDATEC



**LAUDATEC**  
[www.laudati.net](http://www.laudati.net)



*Recovering Energy System*

## EQUIPAMENTOS DE RECUPERAÇÃO DE CALOR HEAT RECOVERY EQUIPMENTS • RECUPERACIÓN DE CALOR

### AR/AR • AIR/AIR • AIRE/AIRE



- Equipamentos para ramas e secadores.
- Redução de contaminantes.
- Redução das emissões de CO<sub>2</sub>.
- Economia de energia.
- Aumento de produção.



- Equipment for stenters and dryers.
- Reduction of contaminants.
- CO<sub>2</sub> emissions reduction.
- Energy saving.
- Production increase.



- Equipo para rames y secadores.
- Reducción de la contaminación.
- Reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Ahorro energético.
- Aumento de la producción.

### AR/ÁGUA • AIR/WATER • AIRE/AGUA



- Equipamentos para ramas e secadores.
- Obtenção de água quente por meio de recuperação dos gases da exaustão.
- Interior em aço inoxidável.



- Equipment for stenters and dryers.
- Getting hot water through recovery of energy from extraction.
- Stainless steel inside.

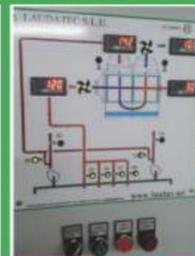


- Equipo para rames y secadores.
- Obtención de agua caliente mediante la recuperación del humo de la extracción.
- Interior en acero inox.

Novo sistema de lavagem automático  
New automatic washing system  
Nuevo sistema de lavado automático

Painéis de controle  
Control panels  
Paneles de Control

COMPACT SYSTEM  
Máxima acessibilidade  
Maximum accessibility  
Máxima accesibilidad



## ELETROFILTRO • ELECTROFILTER • ELECTROFILTRO



### Novo Eletrofiltro LAUATEC

- Sistema de refrigeração a água.
- Fácil acesso para o interior.
- Lavagem automática.
- Redução dos contaminantes de acordo com as regulações.



### New Electrofilter LAUATEC

- Water cooling system.
- Easy access inside.
- Automatic washing.
- Pollution reduction according to regulations.



### Nuevo Electrofiltro LAUATEC

- Sistema de enfriado por agua.
- Fácil acceso al interior.
- Lavado automática.
- Reducción de la contaminación según normativa.

## EQUIPAMENTOS DE AQUECIMENTO HEATING SYSTEMS • EQUIPOS DE CALEFACCIÓN



- Aumento da produção.
- Redução do consumo de combustível.
- Ajuste automático e independente em cada campo.
- Sem chama no interior da câmara de secagem.



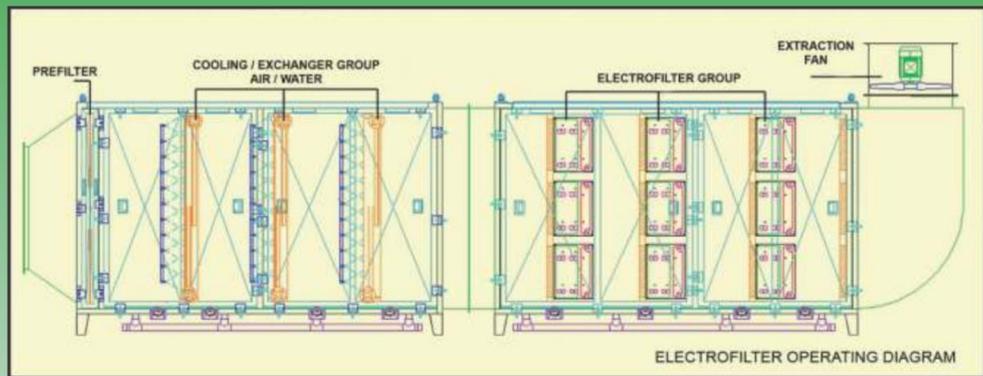
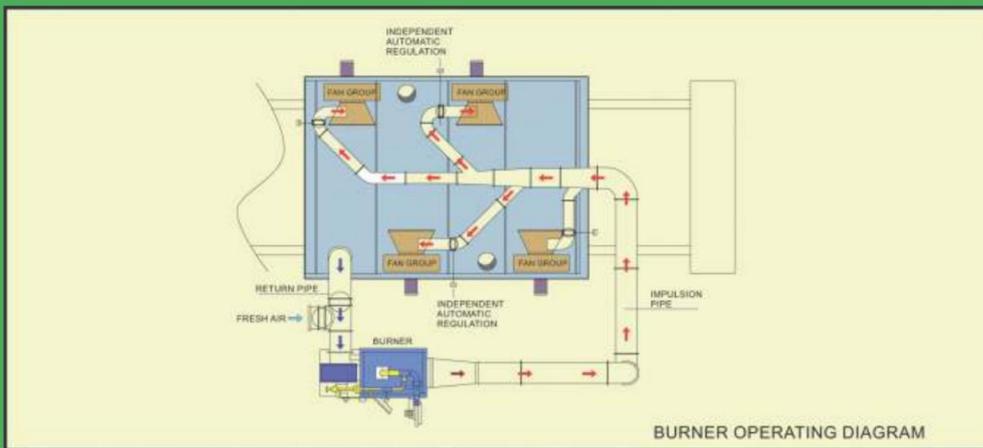
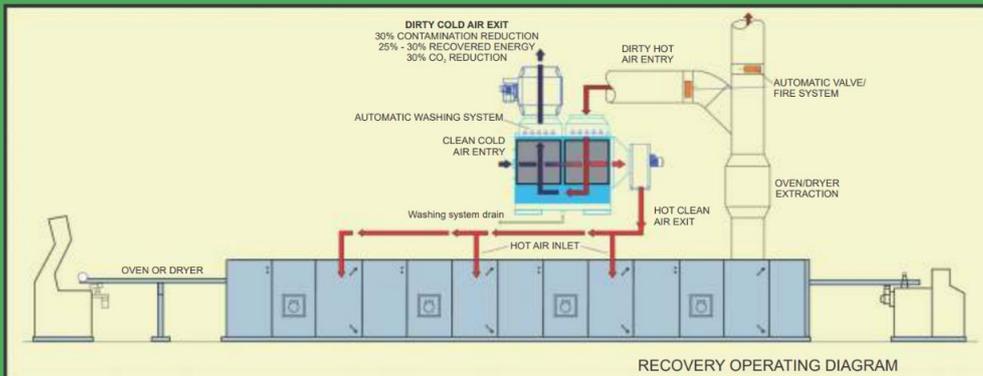
- Production increase.
- Fuel consume reduction.
- Automatic and independent control in each chamber.
- No flame inside the drying chamber.



- Incremento de la producción.
- Reducción del consumo de combustible.
- Control automático e independiente en cada campo.
- Sin llama dentro de la cámara de secado.



MODEL	GELS-5	GELS-10	GELS-15	GELS-20
Calorical Power (kW)	581 kW	1.160 kW	1.740 kW	2.326 kW
Calorical Power (kcal/h)	500.000 kcal/h	1.000.000 kcal/h	1.500.000 kcal/h	2.000.000 kcal/h
Eletrical Power	6 kW	7,50 kW	9,50 kW	13,50 kW



**LAUDATEC Ltda**

Rua Rui Barbosa, 1531, Sl. 03  
 89220-100 - Joinville, SC - Brasil  
 Tel. +55 (47) 3023-0010  
 E-mail: [laudati@laudati.net](mailto:laudati@laudati.net)  
 Web: [www.laudati.net](http://www.laudati.net)