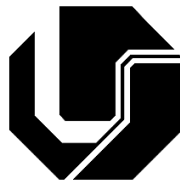


ANA PAULA BRITO SOUZA E PAULO VICTOR SILVA LIMA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA ESTUFA
DE SECAGEM DE PEÇAS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

UBERLÂNDIA – MG

2022

ANA PAULA BRITO SOUZA E PAULO VICTOR SILVA LIMA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA ESTUFA
DE SECAGEM DE PEÇAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Recuperação Energética

Orientador: Prof. Dr. Solidônio Rodrigues Carvalho

UBERLÂNDIA – MG

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S729 Souza, Ana Paula Brito e, 1996-
2022 Análise da viabilidade de recuperação de energia em
uma estufa de secagem de peças [recurso eletrônico] /
Ana Paula Brito e Souza. - 2022.

Orientador: Solidônio Rodrigues Carvalho.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Carvalho, Solidônio
Rodrigues, 1978-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

ANA PAULA BRITO SOUZA E PAULO VICTOR SILVA LIMA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA ESTUFA
DE SECAGEM DE PEÇAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Recuperação Energética

Uberlândia, 31 de março de 2022.

Solidônio Rodrigues Carvalho – Prof. Dr. (UFU)

Helder Barbieri Lacerda – Prof. Dr. (UFU)

Vitor Alberto Lemes Monteiro – Me. (UFU)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e a Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC), que não somente proporcionam ensino público de qualidade, como também estimulam a pesquisa e extensão, os três pilares da universidade, que foram cruciais para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradeço também ao Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho, pela excelente orientação e ensinamentos nessa jornada. Professores dedicados fazem toda a diferença na formação do aluno; aos demais professores da Faculdade de Engenharia Mecânica, pois seu ensino, apoio e troca de experiências foram essenciais para o meu crescimento.

Agradeço aos meus pais por serem os meus principais motivadores; meu namorado pela perseverança, paciência e conselhos.

Por fim, agradeço o meu colega de Projeto de Fim de Curso, pelo companheirismo e trabalho em equipe nessa empreitada. Sucesso!

Ana Paula Brito e Souza

Gostaria de agradecer toda minha família, em especial meus pais e minha irmã que sempre me motivaram e acreditaram em mim, o apoio de vocês foi fundamental para eu me tornar a pessoa e profissional que sou hoje.

Agradeço os amigos que fiz durante a graduação pelos ensinamentos e momentos que tivemos, foi uma caminhada desafiadora, mas de muito aprendizado, levarei isso para vida toda.

Ao Prof. Dr. Solidônio Carvalho, muito obrigado pelos ensinamentos dentro e fora da sala de aula e, principalmente, pela orientação dada para este trabalho. Agradeço a Faculdade de Engenharia Mecânica e seus professores por contribuírem com minha formação profissional.

Por último, gostaria de agradecer a minha colega de Projeto de Fim de Curso, o trabalho em equipe e a motivação que tivemos foi fundamental para que no final, tudo desse certo. Obrigado e muito sucesso!

Paulo Victor Silva Lima

SOUZA, A. P. B., LIMA, P. V. S., Análise da viabilidade de recuperação de energia em uma estufa de secagem de peças. 2022. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

RESUMO

A recuperação de calor é uma excelente alternativa a ser adotada no setor industrial, visando o aumento da eficiência energética por meio da máxima utilização do calor gerado em um processo. Este trabalho tem como principal objetivo a análise energética do sistema de lavagem e secagem de peças de uma indústria de manufatura metalmecânica. Durante o processo de secagem, ar quente é expelido para a atmosfera pelos exaustores da estufa, gerando a oportunidade de aproveitar a energia interna contida nos gases de exaustão para diversas atividades, tais como o pré-aquecimento da água de lavagem de peças. Esse processo, por sua vez, requer água quente, que é aquecida por uma caldeira que consome o combustível Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). A máxima utilização do calor gerado em um processo está relacionada com as novas diretrizes mundiais de desenvolvimento sustentável, eficiência energética e redução do consumo de energia, ou seja, a economia de combustíveis derivados do petróleo contribui para a redução da emissão de gases do efeito estufa. As análises termodinâmicas permitiram fazer uma simulação da economia de combustível anual a partir do ganho energético, e os resultados evidenciaram uma redução expressiva de despesas com GLP, tornando a implementação do sistema de recuperação de calor acessível para indústrias de médio a grande porte, com um tempo de retorno do investimento relativamente baixo.

Palavras-chaves: eficiência energética, recuperação de calor, combustíveis, calor residual, indústria de manufatura.

SOUZA, A. P. B., LIMA, P. V. S., Análise da viabilidade de recuperação de energia em uma estufa de secagem de peças. 2022. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

ABSTRACT

Energy recovery is an excellent alternative to be adopted by the industrial sector, mainly to increase energy efficiency through maximum use of heat generated in a process. This project aims to analyze in terms of energy the dry-off oven system of a manufacturing factory. During the drying process, hot air is released to the atmosphere through exhaust system, and this gives the opportunity to utilize the internal energy of exhaust gas to many activities, such as preheating the water for parts washing. This process requires hot water, which is heated by a boiler that uses Liquefied Petroleum Gas (LPG) as fuel. The maximum use of the heat generated in a process is related to the new world guidelines of sustainable development, energy efficiency and reduction of energy consumption, that is, the decrease in the amount of petroleum-derived fuels contributes to reducing the emission of greenhouse gases. The thermodynamic analysis allowed simulations of annual fuel savings to be made from energy gain and the results showed a significant reduction in the expenses with LPG, making the implementation of the energy recovery system accessible for medium to large business, with a relatively low payback period.

Keywords: energy efficiency, heat recovery, fuels, waste heat, manufacturing industry.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - A estufa de secagem e seus principais componentes | 26 |
| Figura 2 - Esquema funcional da caixa de aquecimento | 27 |
| Figura 3 - Esquema funcional do sistema de exaustão | 27 |
| Figura 4 - Esquema tanque, bombas e filtros no processo de lavagem | 28 |
| Figura 5 - Esquema funcional do trocador de calor de placas, tanque de processo e alimentação de água quente proveniente da caldeira | 29 |
| Figura 6 - Representação esquemática de uma caldeira flamotubular | 30 |
| Figura 7 - Ilustração esquemática da disposição dos processos de pintura..... | 31 |
| Figura 8 - Fluxograma esquemático do circuito de aquecimento de água | 32 |
| Figura 9 - Fluxograma esquemático da estufa de secagem | 34 |
| Figura 10 - Ilustração esquemática do volume de controle aplicado na caldeira | 35 |
| Figura 11 - Representação esquemática do volume e superfície de controle | 38 |
| Figura 12 – Exemplo ilustrativo do trocador de calor de placas cotado na Alfa Laval | 48 |
| Figura 13 - Vista superior da linha de produção | 48 |
| Figura 14 - Vista lateral da linha de produção | 49 |
| Figura 15 - Exemplo ilustrativo da tubulação de aço galvanizado cotado na Quality Tubos..... | 49 |
| Figura 16 - Exemplo ilustrativo do isolamento térmico de lã de rocha cotado na Rock Fibras..... | 50 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Dados construtivos da Caldeira flamotubular Aalborg 3P | 33 |
| Tabela 2 - Dados construtivos das bombas centrífugas KSB | 33 |
| Tabela 3 - Dados construtivos do exaustor central | 34 |
| Tabela 4 - Parâmetros de processo para o aquecimento da água utilizada na lavagem de peças | 35 |
| Tabela 5 - Propriedades da água de entrada e saída do volume de controle | 36 |
| Tabela 6 - Parâmetros de processo da renovação de ar da estufa de secagem | 38 |
| Tabela 7 - Resultados termodinâmicos da água aquecida pela caldeira sem recuperação energética..... | 42 |
| Tabela 8 - Resultados de consumo de combustível GLP pela caldeira sem recuperação energética..... | 43 |
| Tabela 9 - Resultados termodinâmicos do ar aquecido expelido pelo exaustor..... | 43 |
| Tabela 10 - Resultados termodinâmicos do ar aquecido na entrada do trocador de calor de pré-aquecimento..... | 44 |
| Tabela 11 - Resultados termodinâmicos do ar aquecido na saída do trocador de calor de pré-aquecimento..... | 44 |
| Tabela 12 - Resultados termodinâmicos da água na entrada e saída do trocador de calor de pré-aquecimento..... | 45 |
| Tabela 13 - Resultados termodinâmicos da linha de produção sem recuperação energética..... | 45 |
| Tabela 14 - Resultados termodinâmicos da linha de produção com recuperação energética..... | 46 |
| Tabela 15 – Economia mensal e anual de combustível GLP dada em reais (R\$)..... | 47 |
| Tabela 16 – Valores do investimento total e tempo de retorno do sistema de recuperação de calor..... | 50 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1. Objetivos | 13 |
| 1.2. Objetivos específicos | 13 |
| 1.3. Justificativa | 13 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 14 |
| 2.1. Temperatura e Pressão | 14 |
| 2.2. Energia | 14 |
| 2.2.1. <i>Mecanismo de Transferência de Energia</i> | 15 |
| 2.2.2. <i>Energia Mecânica</i> | 16 |
| 2.2.3. <i>Transferência de Energia pelo Calor</i> | 17 |
| 2.2.4. <i>Transferência de Energia pelo Trabalho</i> | 19 |
| 2.3. A Primeira Lei da Termodinâmica | 19 |
| 2.4. Eficiência | 21 |
| 2.5. Entalpia | 22 |
| 2.6. Transferência de Calor | 22 |
| 2.7. Combustão | 23 |
| 2.7.1. <i>Combustíveis</i> | 25 |
| 2.8. Processos Industriais | 25 |
| 2.8.1. <i>Processo de Secagem</i> | 25 |
| 2.8.2. <i>Processo de Lavagem</i> | 28 |
| 2.8.3. <i>Aquecimento de Água</i> | 29 |
| 3. METODOLOGIA | 31 |
| 3.1. O processo produtivo | 31 |
| 3.1.1. <i>Lavagem de peças e aquecimento de água</i> | 32 |
| 3.1.2. <i>Processo de Secagem</i> | 33 |
| 3.2. Análise termodinâmica dos processos de lavagem e secagem | 35 |
| 3.2.1. <i>Aquecimento de água através da caldeira</i> | 35 |
| 3.2.2. <i>Consumo de GLP na caldeira</i> | 37 |
| 3.2.3. <i>Recuperação energética</i> | 37 |
| 3.2.4. <i>Aquecimento de água através do sistema de recuperação de calor e caldeira</i> 40 | |
| 3.2.5. <i>Economia e investimento do sistema de recuperação de calor</i> | 41 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 42 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1. Análise termodinâmica sem recuperação de calor na linha de produção | 42 |
| 4.1.1. <i>Análise termodinâmica da água aquecida pela caldeira</i> | 42 |
| 4.1.2. <i>Análise de consumo de GLP pela caldeira</i> | 42 |
| 4.2. Análise termodinâmica com recuperação de calor na linha de produção | 43 |
| 4.2.1. <i>Análise do ar aquecido no trocador de calor de pré-aquecimento</i> | 43 |
| 4.2.2. <i>Análise da água no trocador de calor de pré-aquecimento</i> | 44 |
| 4.3. Comparação termodinâmica da linha de produção sem e com a recuperação de calor | 45 |
| 4.4. Análise financeira para implementação do sistema de recuperação de calor na linha de produção | 46 |
| 4.4.1. <i>Análise financeira da economia de combustível GLP dada em reais (R\$)</i> 46 | |
| 4.4.2. <i>Análise financeira de investimento e tempo de retorno da implementação do sistema de recuperação de calor</i> | 47 |
| 5. CONCLUSÃO | 51 |

1. INTRODUÇÃO

Uma indústria de manufatura de grande escala que produz itens de alta tecnologia agregada, com qualidade e a um custo eficiente, exige processos de produção robustos se almeja continuar competitiva no mercado. Para manter seus produtos atraentes em preço e qualidade, deve-se investir no aumento da produtividade aliada à redução de custos. A combinação certa de equipamentos, somados a uma mão de obra qualificada confere produtividade nas operações. Com relação às despesas, estas podem ser energéticas ou de matéria prima. Em termos de energia, a linha de produção deve dispor de equipamentos adequados ao projeto e a capacidade da fábrica, com mínimo gasto energético possível. (TUBINO, 2015).

A energia é definida como a capacidade de um sistema físico de realizar trabalho. Ela pode ser acumulada, transformada ou transferida de um sistema para o outro, tal como, na forma de calor. A transformação de energia se dá, por exemplo, através do aproveitamento da energia potencial das águas de um rio, da radiação solar em células fotovoltaicas, de reações químicas intermoleculares e intramoleculares, como a de combustão e fissão nuclear. Outros exemplos de transformação de energia são o metabolismo e a fotossíntese (ÇENGEL, *et al.* 2006). Neste trabalho, a energia utilizada nos processos de produção da fábrica analisada é a elétrica e a térmica.

O consumo total de energia de uma fábrica é direto e indireto. O consumo indireto está relacionado com a quantidade de energia que não é apropriada diretamente ao produto, como a necessária para a iluminação do ambiente e fornecimento de ar comprimido; ou o gás combustível para o funcionamento do refeitório da fábrica. Já o consumo direto refere-se a energia requerida para que os equipamentos produtivos transformem a matéria prima. No caso de máquinas elétricas, é a tensão e corrente que produz torque e rotação em um motor, que transmite a potência para um outro conjunto acoplado. Já em sistemas térmicos, como caldeiras e estufas, é o volume de combustível necessário para fornecer calor ou trabalho para atender às demandas do processo produtivo, como vapor utilizado em fábricas de processamento de alimentos, refinarias e usinas químicas (MAMEDE FILHO, 2017).

Minimizar perdas energéticas favorece a redução dos custos de produção, o que pode tornar qualquer empresa mais competitiva. Além disso, a introdução de

medidas capazes de combater o desperdício pelo uso de sistemas eficientes de energia, e a implantação de tecnologias para substituir o uso intensivo de recursos está diretamente relacionada a um menor impacto ambiental (FARHAT, *et al.* 2022).

Na medida em que as mudanças climáticas se tornam realidade, aumentar a eficiência energética de uma fábrica é de suma importância para a redução da emissão de gases do efeito estufa (GHG), como o dióxido de carbono (NA *et al.* 2019). O sucesso na redução de emissões de GHG requer esforços globais coordenados: a União Europeia já revelou um projeto legislativo para reduzir as emissões de GHG no continente em 55% até 2030 (BONILLA-CAMPOS, *et al.* 2019).

A recuperação de calor residual é uma boa alternativa para melhorar a eficiência energética industrial, pois visa a máxima utilização do calor gerado em um processo, ou seja, é uma oportunidade de redução de custos e consumo de energia na linha de produção. O aumento da eficiência através do calor recuperado pode ser obtido por meio do calor contido nos gases de exaustão, do calor dissipado nas superfícies de equipamentos, nas perdas de calor em água de resfriamento, dentre outros. Com o aumento dos preços da energia elétrica e dos combustíveis derivados do petróleo, recuperar o calor revela-se um rentável investimento, que pode apresentar curto período de retorno (CHINTALA *et al.* 2018).

A maioria dos equipamentos industriais de aquecimento de fluidos utilizam derivados do petróleo como combustível. O mais comum no Brasil é o gás liquefeito de petróleo (GLP). O GLP é composto de uma mistura de gases hidrocarbonetos e apresenta grande aplicabilidade como combustível devido ao seu alto poder calorífico. Apesar de emitir menos poluentes comparado com outros combustíveis derivados do petróleo, o principal fator que contribui para poluição é a emissão de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases, como o monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x) durante a combustão, que geralmente é incompleta (TURNS, 2013).

O presente trabalho visa avaliar energeticamente o sistema de secagem de peças de uma indústria de manufatura metalmeccânica. Durante o processo de secagem, ar quente é expelido para a atmosfera pelos exaustores da estufa. Assim, foi levantada a possibilidade de aproveitar o calor contido nos gases de exaustão em outro processo da fábrica, como a lavagem de peças. Esta, por sua vez, requer água quente, que é aquecida por uma caldeira a gás. Ao utilizar o calor presente nos gases

de exaustão para pré-aquecer a água, o calor residual expelido para a atmosfera é aproveitado e o consumo de GLP da caldeira é reduzido.

1.1. Objetivos

Este projeto de conclusão de curso tem como objetivo principal a avaliação da eficiência energética do sistema de secagem de peças de uma indústria de manufatura metalmeccânica.

1.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Simular o pré-aquecimento da água com o calor contido nos gases de exaustão da estufa;
- Realizar um estudo de viabilidade econômica da instalação de uma unidade de recuperação de calor para pré-aquecer a água;
- Cotar os componentes necessários para a instalação da unidade de recuperação de calor;
- Calcular o retorno financeiro do investimento;

1.3. Justificativa

A necessidade do presente trabalho surgiu a partir do propósito de estudar processos industriais sob a perspectiva da eficiência energética. O uso de sistemas eficientes de energia traz tanto benefícios econômicos como ambientais: é uma oportunidade de redução de custos e de emissões de CO₂.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico será apresentada uma breve discussão sobre os assuntos fundamentais para o entendimento deste trabalho. Dentre os assuntos, pode-se destacar os fundamentos em termodinâmica e transferência de calor.

2.1. Temperatura e Pressão

De acordo com Wylen et al. (2013), “a pressão em um ponto de um fluido em repouso é igual em todas as direções e definimos a pressão (P) como a componente normal da força (F_n) por unidade de área (A)”, ou seja:

$$P = \frac{F_n}{A} \quad [Pa]$$

A lei zero da termodinâmica enuncia que, se dois corpos A e B estão separadamente em equilíbrio térmico com um terceiro corpo C, então A e B também estão em equilíbrio entre si. Um termômetro é capaz de mensurar uma grandeza física intensiva comum a todos os corpos que estão em equilíbrio térmico. Essa grandeza pode ser chamada de temperatura, que estima a energia cinética média de cada grau de liberdade de cada uma das partículas de um sistema em equilíbrio térmico (ÇENGEL, *et al.* 2006).

2.2. Energia

A energia pode ser definida como a capacidade de um sistema físico em realizar trabalho, ou seja, é a habilidade de causar mudanças. A energia pode ser acumulada, transformada ou transferida de um sistema para o outro, por exemplo, na forma de calor (KONDEPUDI, *et al.* 1998).

Uma das leis mais fundamentais da natureza é a lei da conservação de energia. Ela exprime que a energia pode mudar de forma durante uma interação, mas a sua quantidade total permanece constante. Ou seja, energia não pode ser criada ou destruída na natureza, apenas transformada. O balanço de energia em um sistema pode ser expresso como: $E_{entra} - E_{sai} = \Delta E$ (ÇENGEL, *et al.* 2006).

Para quantificar a energia envolvida em um processo, o balanço de energia deve ser efetuado em um sistema ou volume de controle. Um sistema pode ser caracterizado como uma quantidade de matéria ou região no espaço escolhida para

estudo. A massa ou região fora do sistema é denominada vizinhança. A superfície real ou imaginária que separa o sistema da vizinhança é chamada de fronteira, que pode ser fixa ou móvel (ÇENGEL, *et al.* 2006).

Sistemas podem ser abertos ou fechados. Um sistema fechado consiste em uma quantidade fixa de massa, ou seja, não há fluxo mássico em um sistema fechado, porém energia, na forma de trabalho ou calor, pode cruzar a fronteira. Um sistema aberto, ou volume de controle, é uma região selecionada no espaço, podendo haver fluxo de massa e energia. Normalmente, um volume de controle abriga algum tipo de máquina ou dispositivo que envolve fluxo mássico, como um radiador de carro, compressor ou uma turbina (WYLEN, *et al.* 2013).

2.2.1. Mecanismo de Transferência de Energia

De acordo com Çengel et al. (2006), a energia pode existir em inúmeras formas, como térmica, mecânica, cinética, potencial, elétrica, magnética, química e nuclear, e a sua soma constitui a energia total “E” de um sistema. Ela, expressa por unidade de massa (m) e denotada como “e”, equivale a:

$$e = \frac{E}{m} \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

A termodinâmica não provê informação sobre como determinar o valor absoluto da energia total de um sistema, apenas a sua variação, que é o objeto de interesse em problemas de engenharia. A somatória total de energia em um sistema pode ser adotada como zero ($E = 0$), em um referencial. A mudança do valor total de energia em um sistema depende do referencial adotado (KONDEPUDI, *et al.* 1998).

As várias formas que compõem a energia total de um sistema podem ser classificadas como macroscópicas ou microscópicas. A primeira diz respeito ao somatório energético que o sistema possui como um todo, considerando um referencial externo, como energia cinética e potencial, por exemplo. A energia macroscópica está diretamente relacionada ao movimento e à influência de fatores externos como a gravidade, magnetismo, eletricidade e tensão superficial. As formas microscópicas são aquelas relacionadas à estrutura molecular e ao grau de agitação das moléculas do sistema, independem de um referencial externo e a

sua soma é denominada de energia interna, indicada como “U” (WYLEN, *et al.* 2013).

Tipicamente, volumes de controle envolvem a vazão de um fluido ao longo do tempo, e é conveniente expressar o fluxo de energia associado ao escoamento como uma taxa. Segundo Çengel et al. (2006), a vazão mássica pode ser obtida multiplicando-se a vazão volumétrica (\dot{V}) pela densidade do fluido (ρ):

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad \left[\frac{kg}{s} \right]$$

A taxa de energia associada à vazão mássica equivale a:

$$\dot{E} = \dot{m}e \quad \left[\frac{kJ}{s} \right] \text{ ou } [kW]$$

As energias microscópicas podem ser contidas ou armazenadas em um sistema, e são definidas como formas estáticas de energia. As energias que não podem ser armazenadas em um sistema são caracterizadas como formas dinâmicas de energia. Quantificadas quando cruzam a fronteira de um sistema, as formas dinâmicas de energia representam o ganho ou a perda energética durante um processo. As duas únicas interações energéticas associadas a um sistema fechado são a transferência de calor e o trabalho. Para um sistema aberto ou volume de controle, há também a transferência de massa (KONDEPUDI, *et al.* 1998).

2.2.2. Energia Mecânica

Muitos sistemas de engenharia são projetados para transportar um fluido a uma dada vazão, velocidade, distância e diferença de altura. Essa configuração de sistema pode gerar trabalho mecânico em uma turbina ou consumir trabalho em uma bomba, ventilador ou compressor, sem envolver qualquer transferência de calor significativa, permanecendo, essencialmente, a uma temperatura constante durante o processo (MORAN, *et al.* 2018).

A energia mecânica é definida como a forma de energia que pode ser convertida em trabalho mecânico e direcionada para uma máquina mecânica,

como uma turbina, por exemplo. São exemplos de energia mecânica são as energias potencial e cinética. A energia térmica não pode ser caracterizada como energia mecânica, uma vez que não é possível convertê-la em trabalho direta e completamente, como enuncia a segunda lei da termodinâmica (ÇENGEL, *et al.* 2006).

Ainda de acordo com Çengel et al. (2006), uma bomba transfere energia mecânica para um fluido através do aumento da pressão, e uma turbina extrai energia mecânica de um fluido através da redução da pressão. Logo, a pressão de escoamento de um fluido está diretamente associada com a sua energia mecânica, uma vez que a pressão que age em um fluido ao longo de uma distância produz trabalho na forma de vazão. Este pertence à energia de um fluido em escoamento, que é expressa pela equação:

$$e_{mec} = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Em que P/ρ equivale a energia de escoamento, $V^2/2$ a energia cinética e o produto $g.z$, a energia potencial, expressos em unidade por massa. Ao adaptar a equação para a variação da taxa de energia, temos:

$$\Delta E_{mec} = \dot{m} \Delta e_{mec} = \dot{m} \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) \quad [kW]$$

Sob a perspectiva da variação da taxa de energia mecânica total do sistema, se a pressão, densidade, velocidade e altura do fluido permanecem constantes, não há variação energética. Para um sistema sem perdas, se houver variação nas propriedades de pressão, densidade, velocidade ou altura, a variação da energia mecânica representa o trabalho fornecido ao fluido ($\Delta E_{mec} > 0$) ou extraído do fluido ($\Delta E_{mec} < 0$) (MORAN, *et al.* 2018).

2.2.3. Calor

Quando um corpo é inserido em um meio que está em uma temperatura diferente, a transferência de energia entre o corpo e o meio se dá até que o

equilíbrio térmico seja estabelecido, ou seja, o corpo e o meio se encontram na mesma temperatura. O gradiente de transferência de energia ocorre da maior para a menor temperatura (KONDEPUDI, *et al.* 1998).

Incropera *et al.* (2014, p.36) enuncia que o calor pode ser definido como energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço. Ou seja, o calor é a energia transferida entre dois sistemas, ou um sistema e a vizinhança, devido a uma diferença de temperatura, durante um processo.

Como uma forma de energia, o calor é comumente expresso em kJ. Çengel *et al.* (2006), discorre que a quantidade de calor transferido entre dois estados durante um processo é denotada por Q_{12} ou Q . A transferência de calor por unidade de massa (q) pode ser expressa como:

$$q = \frac{Q}{m} \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

A taxa de transferência de calor ao longo do tempo é denotada por \dot{Q} e expressa em kJ/s, equivalente à kW. Se a taxa de transferência de calor varia ao longo do tempo, a quantidade de calor transferida em um processo pode ser obtida integrando \dot{Q} durante o intervalo de duração do processo, t_1 a t_2 .

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt \quad [kJ]$$

Se \dot{Q} permanece constante, a relação se reduz a:

$$Q = \dot{Q} \Delta t \quad [kJ]$$

Em que $\Delta t = t_2 - t_1$ se caracteriza como o intervalo de duração do processo (ÇENGEL, *et al.* 2006).

Os processos que não envolvem transferência de calor são caracterizados como adiabáticos. Ainda assim, mesmo que não aconteça transferência de calor durante um processo adiabático, a quantidade de energia pode ser alterada, logo,

a temperatura também pode estar sujeita a mudanças, que podem ocorrer devido ao trabalho, por exemplo (MORAN, *et al.* 2018).

2.2.4. Trabalho

O trabalho, assim como o calor, é uma interação de energia entre dois sistemas, ou um sistema e a vizinhança, e está associada a uma força agindo em uma distância (ÇENGEL, *et al.* 2006).

O trabalho é comumente expresso em kJ. A quantidade de trabalho transferido entre dois estados durante um processo é denotada por W_{12} ou W . A transferência de trabalho por unidade de massa (w) pode ser expressa como:

$$w = \frac{W}{m} \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

O trabalho realizado por unidade de tempo é denominado potência, expresso por \dot{W} e apresentado em kJ/s ou kW (ÇENGEL, *et al.* 2006).

2.3. A Primeira Lei da Termodinâmica

Também conhecida como uma expressão do princípio da conservação da energia, a primeira lei da termodinâmica relaciona as interações de energia na forma de trabalho e calor. Baseada em observações experimentais, a primeira lei estabelece que, para processos adiabáticos em um sistema fechado, a quantidade de trabalho realizado de um estado para o outro (W_{12}) é o mesmo, não importando a natureza deste trabalho ou os detalhes do processo (FERMI, 1956; FEYNMAN, *et al.* 2008).

Se o trabalho é o mesmo para todos os processos adiabáticos entre dois estados em sistemas fechados, o valor total de trabalho depende apenas do estado inicial e final, e corresponde à mudança da energia do sistema, também denominada de balanço energético. Wylen *et al.* (2013), enuncia que o balanço de energia total de um sistema durante um processo é equivalente à diferença entre a energia que entra e a que sai do sistema, expressa por:

$$\Delta E = E_{entra} - E_{sai} \quad [kJ]$$

Segundo Feynman et al. (2008), a energia contida em um sistema é uma propriedade, e o seu valor permanecerá inalterado até que o estado do sistema mude. Considerando apenas as parcelas cinética (E_c), potencial (E_p) e interna (U), a variação da energia em um sistema pode ser expressa por:

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p \quad [kJ]$$

Os sistemas de interesse neste trabalho são estacionários. Portanto, as variações de energia potencial e cinética são iguais a zero ($E_c = E_p = 0$). Logo, a variação total de energia neste sistema em questão se reduz a $\Delta E = \Delta U$.

A transferência de calor para um sistema (ganho de calor) aumenta a energia das moléculas e, conseqüentemente, a energia interna do sistema. Já a transferência de calor de um sistema (perda de calor) diminui a energia das moléculas, uma vez que a energia transferida vem diretamente da energia molecular do sistema. O trabalho realizado para um sistema aumenta a sua energia, já o trabalho realizado por um sistema diminui a sua energia, uma vez que essa propriedade é transferida, na medida em que o trabalho vem da energia contida no sistema. Turbinas a gás ou vapor produzem trabalho, enquanto compressores e bombas consomem trabalho (FEYNMAN, *et al.* 2008).

Çengel et al. (2006), discorre que o fluxo de massa que entra e sai de um sistema é um mecanismo adicional de transferência de energia, uma vez que quantidades de matéria contêm a sua energia interna – massa é energia. Já que a energia pode ser transferida na forma de calor, trabalho e massa, a equação do balanço de energia pode ser expressa da seguinte forma:

$$\Delta E = \Delta Q + \Delta W + \Delta E_{massa} \quad [kJ]$$

A transferência de energia térmica Q equivale a zero para sistemas adiabáticos, a parcela de trabalho W é nula quando não há interações de trabalho, e o transporte de energia E_{massa} é igual a zero para sistemas em que não há fluxo mássico na fronteira (FEYNMAN, *et al.* 2008).

2.4. Eficiência

Çengel et al. (2006), enuncia que o termo eficiência (η) expressa a relação entre a energia pretendida pela consumida em um processo, ou seja, indica a performance de uma transformação de energia ou um processo de transferência:

$$\eta = \frac{\text{energia pretendida}}{\text{energia consumida}}$$

Para motores de automóveis, por exemplo, o trabalho do sistema é compreendido como a potência entregue pelo movimento do conjunto pistão-bielamanivela, convertido em rotação pelo virabrequim. Para plantas de geração de energia, o trabalho do sistema pode ser entendido como o trabalho mecânico na saída da turbina, ou a potência elétrica produzida pelo gerador (ÇENGEL, *et al.* 2006).

Para equipamentos em que a fonte energética provém da reação de combustão, como queimadores a gás, por exemplo, a eficiência é baseada no poder calorífico do combustível utilizado. O poder calorífico (PC) é a quantidade de energia liberada por unidade de massa (ou volume) cedida na reação de combustão completa de um determinado combustível. Logo, a eficiência da combustão pode ser expressa como:

$$\eta_{\text{combustão}} = \frac{Q}{PC_{\text{combustível}}}$$

Uma eficiência de 100% demonstra que o processo é realizado sem perdas. Para equipamentos em que a fonte energética provém da reação de combustão, significa que o combustível é queimado completamente, os gases são liberados na câmara de combustão em temperatura ambiente, e a quantidade de calor liberada na reação é equivalente ao poder calorífico do combustível (ÇENGEL, *et al.* 2006).

Existem duas formas de considerar o poder calorífico: poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI). O primeiro é dado pela soma da energia liberada na forma de calor e a energia gasta na vaporização da água que se forma na reação de combustão completa. Já o PCI é caracterizado apenas pela primeira parcela, ou seja, a energia liberada na forma de calor. Para combustíveis que não possuem hidrogênio em sua composição, o PCS equivale ao PCI, uma vez que não

há a formação de água como produto da reação de combustão (TURNNS, *et al.* 2013).

2.5. Entalpia

A entalpia (h) pode ser definida como uma soma da energia interna (u) com o produto da pressão (P) e volume de um sistema (v), ou seja, uma combinação de propriedades termodinâmicas:

$$h = u + Pv \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Em sistemas com gás ideal, em que é adicionado uma quantidade de calor dQ a pressão constante, fica explícito a relação da entalpia com o calor. Logo, ela é considerada como uma medida de quantidade de calor em um sistema (BOSE, *et al.* 2007).

É importante ressaltar que é possível encontrar subscritos nas tabelas termodinâmicas, como por exemplo h_l e h_g , que representam entalpia de líquido saturado e entalpia de vapor saturado, respectivamente. Também é possível encontrar h_{lg} , referindo-se a entalpia de vaporização, que representa a quantidade de energia necessária para vaporizar uma unidade de líquido saturado a uma dada temperatura e pressão (ÇENGEL, *et al.* 2006).

2.6. Transferência de Calor

De acordo com Incropera et al. (2014, p.2) podemos definir transferência de calor como energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço. Existem três modos de transferência de calor, sendo eles, condução, convecção e radiação.

A condução é um mecanismo de transferência de calor que ocorre quando há um gradiente de temperatura em um meio estacionário, podendo ele ser fluido ou sólido. A transferência de energia ocorre em direção ao meio menos energético, ou seja, da maior temperatura para a menor (INCROPERA, *et al.* 2014).

Já a convecção caracteriza a transferência de calor que ocorre quando há diferença de temperatura entre uma superfície e um fluido em movimento. Além disso, a convecção pode ser classificada em algumas formas, mas para este trabalho serão

definidas apenas duas: convecção forçada, quando o escoamento é originado por meios externos, como ventiladores; e convecção natural, quando o escoamento é gerado a partir das forças de empuxos causadas pelo próprio fluido devido a suas variações de temperaturas (KREITH, *et al.* 2003).

A radiação térmica é o terceiro modo de transferência de calor e ocorre em todas as superfícies com temperatura não nula, emitindo energia na forma de ondas eletromagnéticas. Esse mecanismo permite transferência de energia sem a necessidade de um meio material, ou seja, existe transferência por radiação no vácuo. A emissão de calor pode ocorrer por parte de superfícies sólidas, líquidas e gasosas, e todas elas possuem um poder emissivo (KREITH, *et al.* 2003).

2.7. Combustão

Turns et al. (2013, p.9) define combustão como um processo de oxidação rápida que pode gerar calor, luz ou ambos. Além disso, o autor enfatiza que a energia térmica gerada a partir desse processo químico é utilizada de diversas formas em nossa sociedade, principalmente, na indústria.

A combustão é importante para viabilizar outros processos, como por exemplo geração de energia elétrica, sistemas de transporte e produção de bens de consumo e capital. Além disso, a combustão também pode ser utilizada como uma forma de processamento, eliminando substratos tóxicos (MCALLISTER, *et al.* 2011).

A poluição ambiental é um dos grandes problemas do processo de combustão, especialmente quando ocorre a liberação de hidrocarbonetos não queimados ou parcialmente queimados, como por exemplo, óxidos de nitrogênio (NO e NO₂), monóxido de carbono (CO) e óxidos de enxofre (SO₂ e SO₃). A poluição com hidrocarbonetos pode contribuir para o agravamento do aquecimento global e a redução da camada de ozônio (TURNS, *et al.* 2013).

O processo de combustão necessita de um combustível e de um comburente, chamados também de reagentes. O combustível é a substância que será queimada (oxidada) durante o processo de combustão e contém em sua composição, principalmente, carbono e hidrogênio; mas pode apresentar outros elementos reagentes, como o enxofre. O comburente é a substância que fornece oxigênio (O₂) para a reação química e, apesar de o ar atmosférico possuir relativamente pouco oxigênio e apresentar umidade em sua composição, é o mais utilizado na combustão, pois não possui nenhum custo de aquisição. A composição média do ar é 78% de gás

nitrogênio, 21% de gás oxigênio (O₂) e 1% de outros gases, como o argônio (Ar), o dióxido de carbono e vapor d'água (NOGUEIRA, *et al.* 2005).

Porém, Çengel *et al.* (2006) enuncia que o simples contato do combustível com o comburente não é suficiente para causar o processo de combustão. Para iniciá-lo, é necessário elevar a temperatura do combustível acima da sua temperatura de ignição e ter uma relação ar-combustível (AF) adequada, que é caracterizada pela razão entre a massa de ar (m_{ar}) e a massa de combustível ($m_{combustível}$) utilizada na reação de combustão:

$$AF = \frac{m_{ar}}{m_{combustível}}$$

A combustão pode ser classificada como completa ou incompleta. O processo de combustão é completo quando todos os elementos contidos no combustível são queimados e os produtos são quimicamente estáveis, ou seja, todo o carbono (C) presente gera dióxido de carbono (CO₂), todo hidrogênio (H) gera água (H₂O) e, se houver, todo enxofre (S) gera dióxido de enxofre (SO₂). Já o processo de combustão é incompleto quando há a queima parcial dos reagentes, formando produtos como fuligem (C), gás hidrogênio (H₂) e monóxido de carbono (CO) (NOGUEIRA, *et al.* 2005; ÇENGEL, *et al.* 2006).

A principal causa para uma reação de combustão ocorrer de forma incompleta é a falta de oxigênio (O₂) no processo. A quantidade mínima de mols das moléculas dos reagentes requerida para que o processo de oxidação seja total é denominada de relação estequiométrica. Em processos industriais, é comum utilizar-se de excesso de ar, tanto para aumentar as chances de uma combustão completa quanto para fazer o controle de temperatura na câmara de combustão (MCALLISTER, *et al.* 2006).

O ar em excesso é uma forma de garantir que todo o combustível seja queimado e não gere problemas ambientais e econômicos. Entretanto, é importante atentar-se para a quantidade de excesso de ar na combustão, pois ela deve ser sempre a menor possível para que a relação de ar-combustível ideal seja mantida, caso contrário, ocorrerá perda de desempenho na utilização do calor gerado pelo combustível, ou seja, uma perda de eficiência no processo (NOGUEIRA, *et al.* 2005).

2.7.1. Combustíveis

Todo material que pode ser queimado para liberar energia térmica pode ser chamado de combustível. Os combustíveis mais comuns contêm hidrogênio e carbono, são denominados de hidrocarbonados e denotados por C_nH_m . Eles podem existir em todas as fases, e bons exemplos são o carvão, a gasolina e o gás natural (ÇENGEL, et al. 2006).

A maioria dos combustíveis hidrocarbonados líquidos são obtidos a partir dos processos de destilação e decomposição térmica do petróleo, como a gasolina, o óleo diesel e o querosene. A composição de um combustível em particular dependerá do local em que o petróleo foi extraído e do processo de refinaria. Já os combustíveis hidrocarbonados gasosos podem ser obtidos de poços de gás natural ou produzidos em processos químicos. O principal constituinte do gás natural é o metano (CH_4) (MORAN, et al. 2018).

O gás liquefeito do petróleo (GLP) é uma mistura de 50% (m/m) de n-propano com 50% (m/m) de n-butano, cuja densidade é 550 kg/m^3 a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (Resolução ANP n° 18 de 02/09/2004). O poder calorífico inferior (PCI) do GLP corresponde a 49195 kJ/kg ou 11750 kcal/kg . Para garantir a sua combustão completa, ou seja, com baixa formação de dióxido de carbono (CO), utiliza-se excesso de ar de aproximadamente 30%, ou seja, uma quantidade em mols de ar 30% superior à de combustível, comparado à proporção estequiométrica de combustão (HERBERT, 2019).

2.8. Processos Industriais

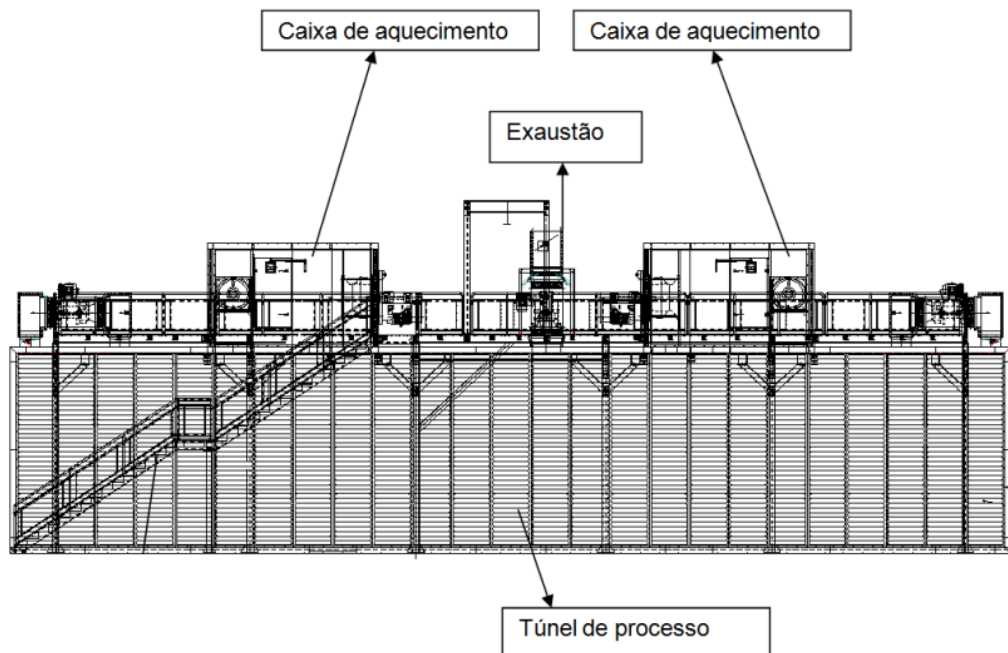
2.8.1. Processo de Secagem

A estufa de secagem da indústria de manufatura metalmeccânica analisada neste trabalho tem a finalidade de promover a secagem de água das peças provenientes do processo de lavagem, garantindo a evaporação das partículas de água remanescentes e promovendo uma superfície seca (EISENMANN, 2014).

Constituída de um túnel com painéis metálicos termicamente isolados, a estufa de secagem possui recirculação constante de ar aquecido sobre as peças metálicas. Suas funções no processo são: manter o ambiente aquecido dentro da estufa, direcionar os gases resultantes da combustão para a atmosfera e manter um ambiente livre de poeiras durante o processo de secagem. O equipamento possui um túnel de

processo, caixas de aquecimento e recirculação, e um sistema de exaustão (EISENMANN, 2014). A imagem a seguir ilustra a estufa de secagem e os seus componentes:

Figura 1 - A estufa de secagem e seus principais componentes

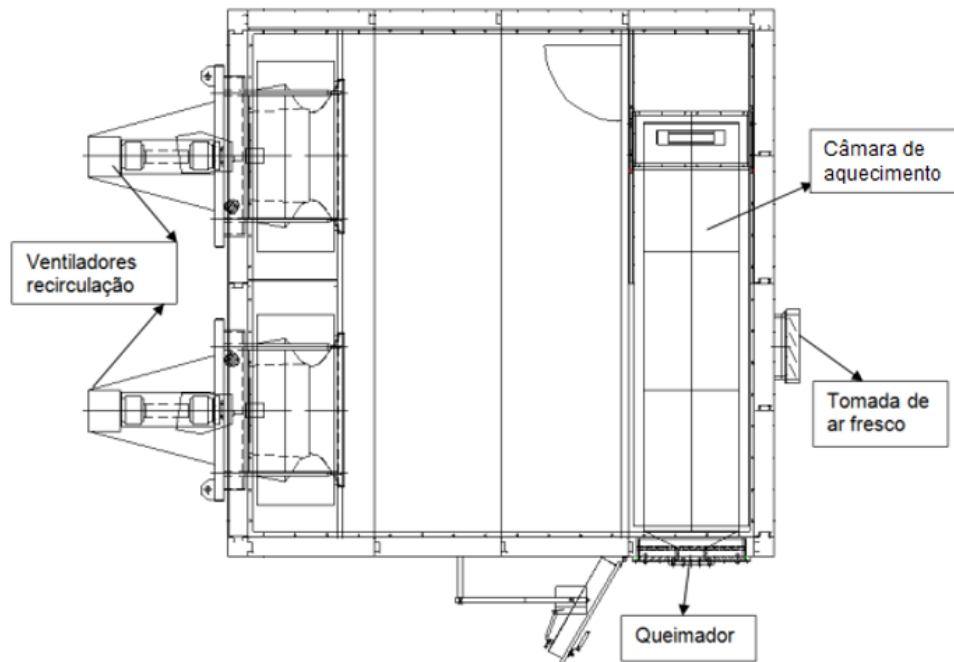


Fonte: EISENMANN, 2014.

O aquecimento e a recirculação de ar são feitos por meio das caixas de aquecimento instaladas sobre o túnel de processo, que possuem ventiladores de recirculação, uma câmara de aquecimento com queimador e um cavalete de alimentação de gás.

O princípio de funcionamento das caixas consiste na captação e recirculação: o ar aquecido no interior do túnel retorna parcialmente através dos ventiladores duto de retorno de ar, ele é reaquecido na câmara de aquecimento até a temperatura de processo e restituído para o túnel novamente (EISENMANN, 2014). A imagem a seguir ilustra um esquema funcional da caixa de aquecimento:

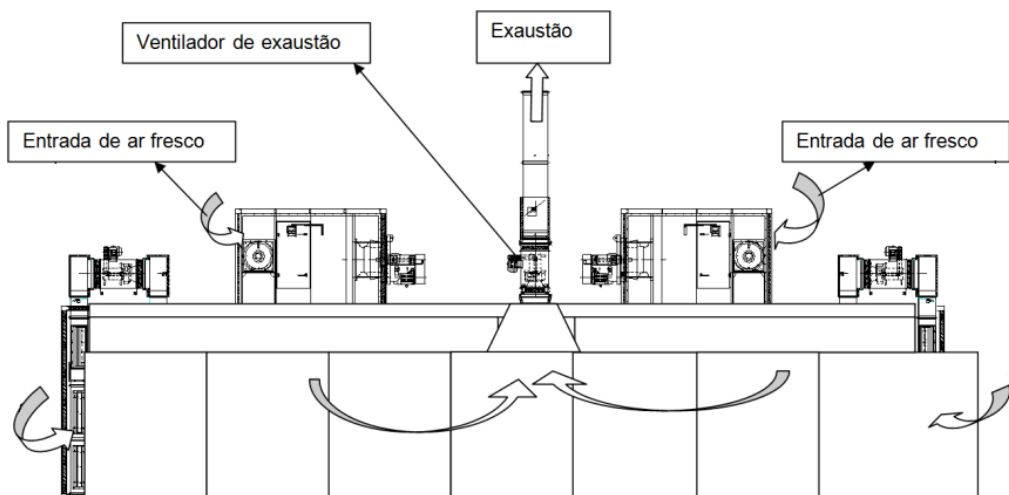
Figura 2 - Esquema funcional da caixa de aquecimento



Fonte: EISENMANN, 2014

Após um determinado tempo de trabalho, o ar de recirculação contido no interior do túnel de secagem torna-se saturado, devido ao vapor de água e resíduos proveniente da secagem das peças. Um exaustor instalado no centro do túnel promove a renovação parcial de ar. A imagem a seguir ilustra as entradas e saídas de ar da estufa de secagem:

Figura 3 - Esquema funcional do sistema de exaustão



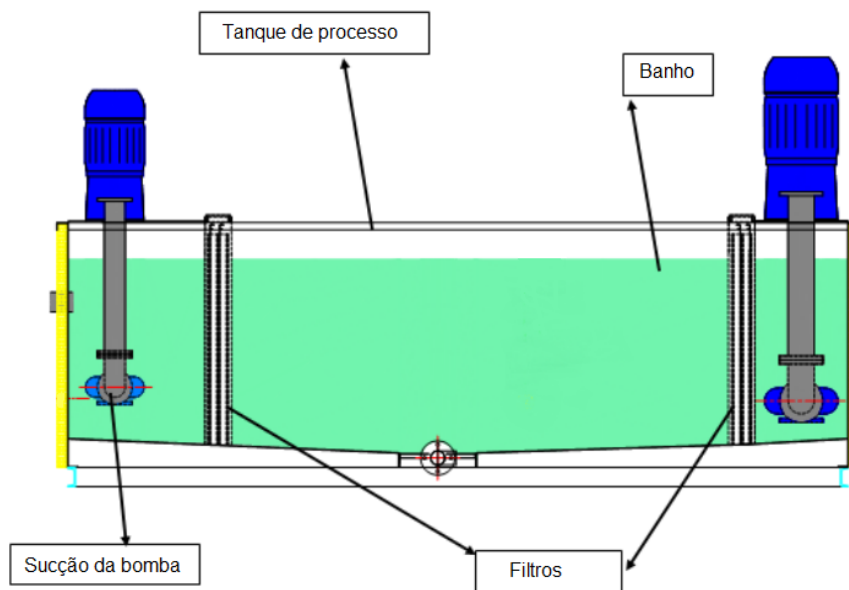
Fonte: EISENMANN, 2014

2.8.2. Processo de Lavagem

A unidade de lavagem de peças da indústria de manufatura metalmeccânica analisada neste trabalho tem a finalidade de retirar resíduos que podem estar depositados na superfície das peças metálicas. A unidade de lavagem é composta por um túnel de painéis metálicos, bicos aspersores e tanques de água aquecida (EISENMANN, 2014).

A água é aspergida nas peças através dos bicos, promovendo a lavagem. Após esse processo, a água é depositada no tanque e reutilizada sucessivas vezes. Além disso, filtros são instalados para reter partículas de sujeira, garantindo a desobstrução da tubulação e eficiência no processo. A imagem a seguir ilustra a configuração do tanque com os filtros:

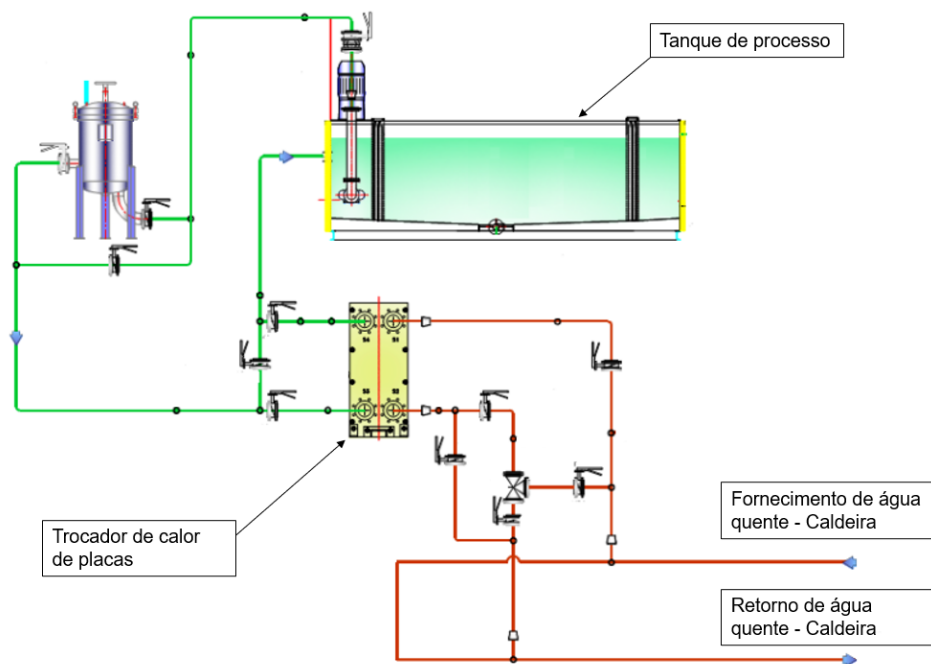
Figura 4 - Esquema tanque, bombas e filtros no processo de lavagem



Fonte: EISENMANN, 2014

A água utilizada na unidade de lavagem é aquecida através de um trocador de calor de placas, o qual proporciona a troca de calor entre a água de lavagem e a água de processo, que é aquecida por uma caldeira. A imagem a seguir ilustra o esquema funcional do trocador de calor:

Figura 5 - Esquema funcional do trocador de calor de placas, tanque de lavagem e alimentação de água quente proveniente da caldeira



Fonte: EISENMANN, 2014

2.8.3. Aquecimento de Água

O fornecimento de água quente pode representar uma necessidade nas instalações industriais. A temperatura e pressão com que a água deve ser fornecida depende da natureza do processo produtivo, ou seja, do uso a que se destina. Produzir água quente significa transferir de uma fonte de calor a energia necessária para que a água adquira a temperatura desejada. Essa transferência de calor pode ser realizada diretamente, por meio do contato do agente aquecedor com a água, assim como ocorre nos aquecedores elétricos, ou com vapor saturado, como ocorre nos sistemas de mistura vapor-água (MACINTYRE, 2018).

É possível obter a quantidade de calor necessária para o aquecimento de água através de diversas fontes de energia térmica, como: reação de combustão com combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos; energia elétrica no aquecimento de resistência elétrica com a passagem de corrente; energia solar, com o emprego de aquecedores solares; vapor, pelo aproveitamento do vapor de caldeira; ar quente, através da parede de fornos industriais; ou aproveitamento de água de resfriamento de certos equipamentos (MACINTYRE, 2018).

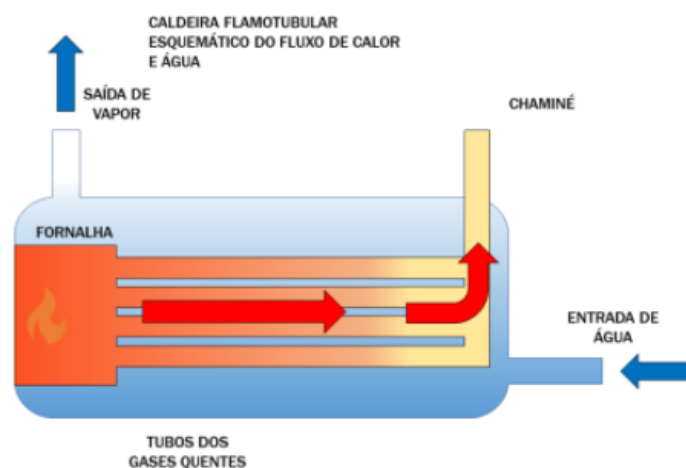
No presente trabalho, a água que transfere energia através dos trocadores de calor de placas é aquecida por uma caldeira flamotubular a gás, que utiliza GLP como combustível. Uma caldeira é um vaso de pressão que trabalha com pressão superior à pressão atmosférica, produzindo vapor ou água aquecida a partir da energia térmica fornecida por uma fonte qualquer (ALFA LAVAL, 2015).

Uma caldeira possui dois sistemas básicos: um sistema de água e vapor e o outro de gases de combustão. O sistema de água e vapor é composto pela água aquecida pela transferência de calor através dos tubos, os quais transferem energia proveniente da combustão para a água. Já o sistema de gases de combustão possui entradas de combustível e ar, que são necessários para a transferência de energia através da reação de combustão (NOGUEIRA *et al.* 2005).

Em uma caldeira flamotubular, os gases quentes da combustão circulam dentro dos tubos, em um ou mais passes, vaporizando a água que se encontra ao redor. Possui construção simples e é largamente utilizada para pequenas capacidades de produção de vapor (cerca de até 10 tonelada/h) e baixas pressões (até 10 bar) (BAZZO, 1995).

A imagem a seguir ilustra o esquema de funcionamento de uma caldeira flamotubular, evidenciando o caminho percorrido pelos gases de combustão no interior dos tubos de metais que, por sua vez, estão inseridos no tubulão cheio d'água. Os tubos metálicos também podem ser chamados de passes, os quais aumentam o rendimento da caldeira. Após a passagem, o gás sai do sistema através da chaminé (BAZZO, 1995).

Figura 6 - Representação esquemática de uma caldeira flamotubular



3. METODOLOGIA

Para realizar a análise da viabilidade de recuperação de energia na estufa de secagem, é necessário analisar termodinamicamente os sistemas da linha de produção e quantificar as energias envolvidas.

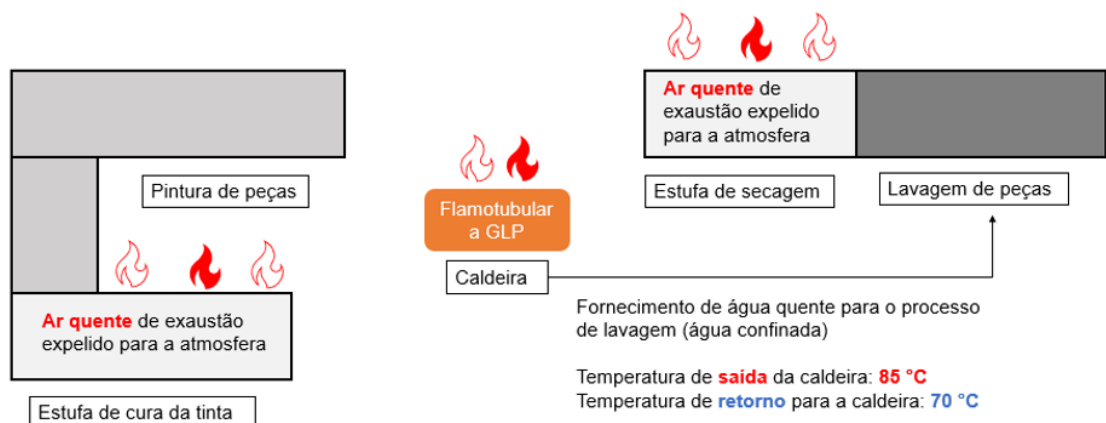
A partir dos parâmetros potência (kW), temperatura (°C), pressão (bar) e vazão mássica (kg/s) dos processos, é possível calcular a energia térmica residual que é expelido pelo sistema de exaustão da estufa de secagem. Daí, utilizando recursos computacionais, simulou-se o pré-aquecimento da água de processo contida na caldeira através do calor residual da estufa.

A partir da simulação termodinâmica, obtém-se o ganho de temperatura da água de retorno da caldeira, após trocar calor com o ar de exaustão. Se a água retorna mais quente para a caldeira, a potência requerida para reaquecê-la é menor: há economia de combustível. Calculada a economia de combustível e mensurado o custo do sistema de recuperação de calor, obteve-se o tempo de retorno do investimento.

3.1. O processo produtivo

A linha de produção de pintura é composta por vários processos, sendo eles a lavagem de peças, estufa de secagem, pintura de peças e estufa de cura da tinta. A disposição dos processos possui a seguinte configuração:

Figura 7 - Ilustração esquemática da disposição dos processos de pintura



Na Figura 7, é possível visualizar a configuração dos equipamentos da linha de produção da pintura de peças e uma caldeira, que é responsável pelo aquecimento da água que é utilizada na lavagem. Como já enfatizado, este estudo tem foco na recuperação de energia residual contida nos gases de exaustão da estufa de secagem

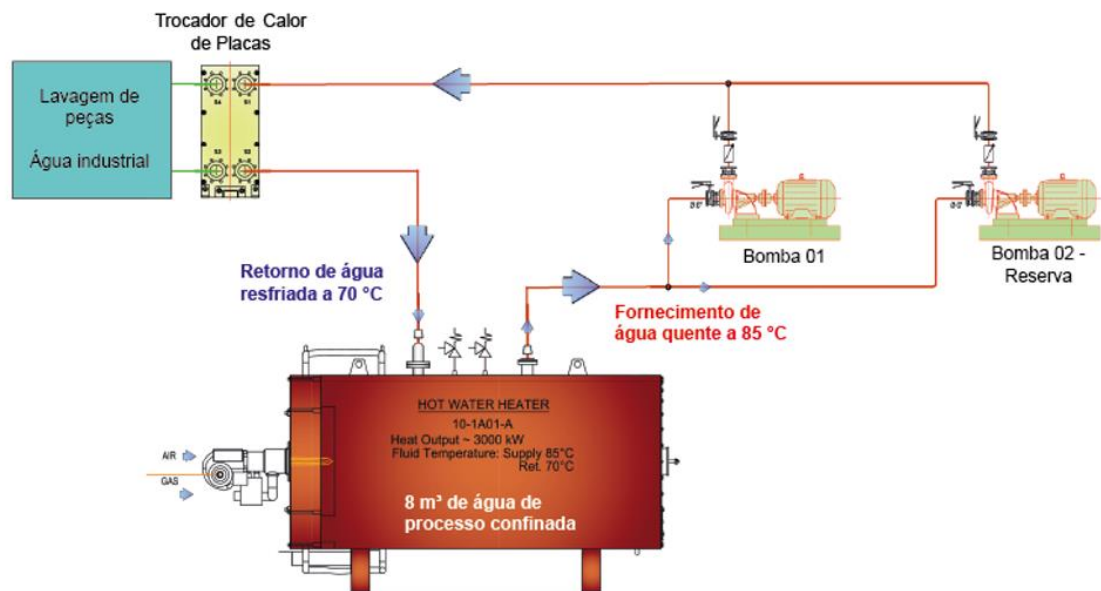
de peças. Entende-se que há a oportunidade de utilizar esse calor residual para pré-aquecer a água destinada à lavagem de peças. Portanto, a seguir estão descritos os equipamentos dos sistemas de interesse.

3.1.1. Lavagem de peças e aquecimento de água

Etapa inicial do processo, a lavagem elimina resíduos que podem estar na superfície das peças metálicas a serem pintadas. É composta por um túnel de painéis metálicos, tanque com água aquecida e bicos aspersores (EISENMANN, 2014).

As peças metálicas percorrem por todo o túnel enquanto os aspersores pulverizam água quente sobre elas. A água utilizada é aquecida por meio de um trocador de calor de placas, que é alimentado com água industrial no circuito de placas A e água de processo no circuito de placas B (TRANTER, 2014). A água de processo, por sua vez, é aquecida pela caldeira. O fluxograma a seguir ilustra os circuitos de água:

Figura 8 - Fluxograma esquemático do circuito de aquecimento de água



Fonte: EISENMANN, 2014

As características construtivas da caldeira são informadas na tabela a seguir:

Tabela 1 - Dados construtivos da Caldeira flamotubular Aalborg 3P

| Caldeira Flamotubular Alfa Laval Aalborg 3P modelo 4 | |
|--|----------------------|
| Fabricante | Alfa Laval Aalborg |
| Superfície de aquecimento | 100 m ² |
| Capacidade térmica | 3.000 kW |
| PMTA (pressão máxima de trabalho admissível) | 170 psig ou 1,17 MPa |
| Teste hidrostático (TH) | 255 psig ou 1,76 MPa |
| Peso vazia | 10.900 kg |
| Peso cheia | 18.900 kg |

Fonte: Alfa Laval, 2015

As características construtivas das bombas centrífugas são informadas na tabela a seguir:

Tabela 2 - Dados construtivos das bombas centrífugas KSB

| Bomba Centrífuga KSB MegaCPK MCPK 125-100-250 | |
|---|-----------------------|
| Fabricante | KSB |
| Vazão volumétrica | 170 m ³ /h |
| Pressão | 32 mca ou 3,14 bar |
| Potência | 30 HP ou 22,37 |

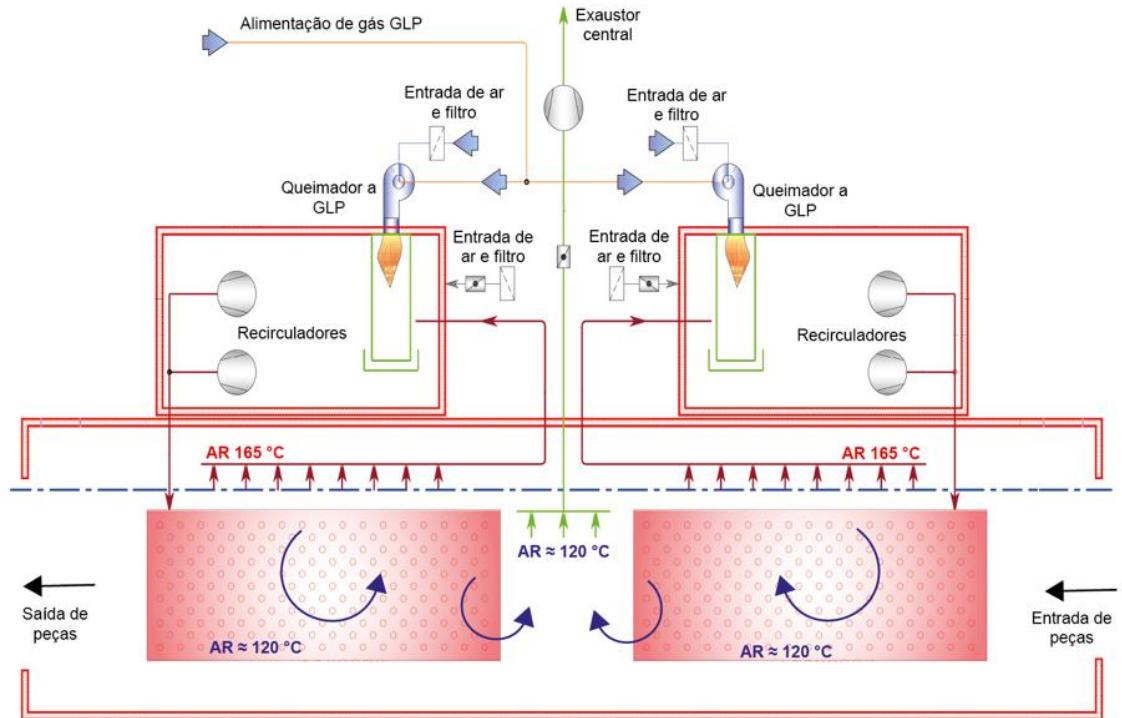
Fonte: KSB, 2013

3.1.2. Processo de Secagem

Tendo início após a lavagem, a finalidade deste processo é promover a completa secagem das peças. A unidade de secagem é composta por um túnel com painéis termicamente isolados, caixas de aquecimento e recirculação, e um sistema de exaustão. A recirculação é fundamental para manter a estufa com uma temperatura ideal para o processo de secagem. Um exaustor instalado no centro do túnel promove a renovação parcial de ar (EISENMANN, 2014).

O fluxograma a seguir esquematiza o processo de secagem:

Figura 9 - Fluxograma esquemático da estufa de secagem



Fonte: EISENMANN, 2014

Os parâmetros de processo do exaustor central da estufa de secagem são informados na tabela 4:

Tabela 3 - Dados construtivos do exaustor central

| Ventilador Centrífugo Berliner Luft | |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| Fabricante | Berliner Luft |
| Vazão volumétrica a $120\ ^\circ C$ | $15.200\ m^3/h$ |
| Vazão volumétrica normal | $8.940\ Nm^3/h$ |
| Pressão | $1,0196\ bar$ |
| Pressão manométrica | $65\ mmca\ ou\ 0,0064\ bar$ |
| Potência | $4,4\ kW$ |

Fonte: BERLINER LUFT, 2014; EISENMANN, 2014

3.2. Análise termodinâmica dos processos de lavagem e secagem

Para efetuar a análise termodinâmica e quantificar as energias envolvidas nos processos, foram considerados temperatura ambiente de 20 °C, pressão atmosférica de 1 atm ou 1,013 bar e eficiência global do sistema de 85%:

3.2.1. Aquecimento de água através da caldeira

Para realizar a análise termodinâmica do aquecimento de água, foi considerada a caldeira dentro do volume de controle, e a região imediatamente externa à caldeira como a superfície de controle. Os parâmetros de trabalho da caldeira são enunciados na tabela a seguir:

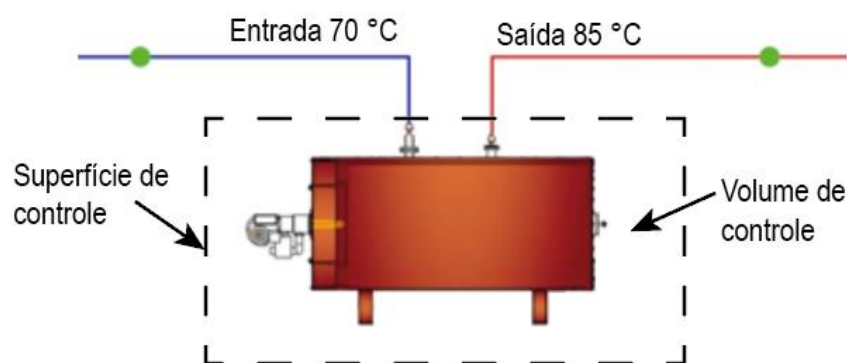
Tabela 4 - Parâmetros de processo para o aquecimento da água utilizada na lavagem de peças

| Parâmetros de processo para o aquecimento de água | Valores |
|---|----------|
| Temperatura de saída da caldeira | 85 °C |
| Temperatura de retorno da caldeira | 70 °C |
| Pressão de trabalho | 2 bar |
| Potência da caldeira (\dot{Q}) | 1.785 kW |
| Horas em trabalho por dia | 18 horas |
| Dias de trabalho por ano | 252 dias |

Fonte: parâmetros de processo coletados na indústria de manufatura metalmecânica

A figura a seguir ilustra o volume e a superfície de controle adotados para a análise:

Figura 10 - Ilustração esquemática do volume de controle aplicado na caldeira



Deve-se realizar um balanço de energia através da Primeira Lei da Termodinâmica no volume de controle para quantificar a vazão mássica de água:

$$\dot{W} + \dot{m}_{\text{agua}} h_{\text{sai}} = \dot{Q} + \dot{m}_{\text{agua}} h_{\text{entra}}$$

Em que $\dot{W} = 0$, pois não há transferência de potência na forma de trabalho mecânico. A taxa de transferência de calor que atravessa a superfície de controle equivale a 1.785 kW e foi fornecida pelo fabricante (EISENMANN, 2014). Os valores de entalpia de entrada e saída da água no volume de controle podem ser obtidos através de tabelas termodinâmicas, visto que os valores de temperatura e pressão de entrada e saída são conhecidos. A tabela a seguir ilustra os valores de entalpia, pressão e temperatura de entrada e saída de água:

Tabela 5 - Propriedades da água de entrada e saída do volume de controle

| Propriedades da água | Valores |
|---|-------------------------|
| Temperatura de saída da água | 85 °C |
| Temperatura de retorno da água | 70 °C |
| Pressão de trabalho | 2 Bar |
| Densidade da água a 85 °C e 2 bar (ρ_{sai}) | 968,7 kg/m ³ |
| Densidade da água a 70 °C e 2 bar (ρ_{entra}) | 977,8 kg/m ³ |
| Entalpia de saída da água (h_{sai}) | 297 kJ/kg |
| Entalpia de entrada da água (h_{entra}) | 293,2 kJ/kg |

Fonte: parâmetros de processo coletados na indústria de manufatura metalmeccânica e tabelas termodinâmicas.

Por fim, calcula-se a vazão mássica de água (kg/s) através da Primeira Lei da Termodinâmica no volume de controle. Para determinar a vazão volumétrica (\dot{v}_{agua}) expressa em m³/h, basta utilizar a relação de volume e densidade:

$$\dot{v}_{\text{agua}} = \frac{\dot{m}_{\text{agua}} * 3600}{\rho_{\text{agua}}}$$

Neste cálculo, optou-se por utilizar o valor da densidade da água a 85 °C pois, nessa temperatura, a água apresenta um valor menor de densidade, o que resulta em

uma vazão de água maior. Admitir valores maiores de vazão de água contribui para o conservadorismo na simulação da troca térmica entre os dois fluidos. Esses valores serão utilizados posteriormente nos próximos cálculos termodinâmicos.

3.2.2. Consumo de GLP na caldeira

A vazão mássica de combustível que a caldeira consome durante o processo pode ser obtida utilizando o conceito de eficiência da combustão. Como a taxa de transferência de calor (\dot{Q}) que atravessa a superfície de controle equivale a 1.785 kW, deve-se aplicar eficiência de 85% para calcular a potência fornecida através da queima do GLP (\dot{Q}_{GLP}).

A equação a seguir ilustra o conceito de eficiência da combustão:

$$0,85 = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{GLP}} = \frac{\text{energia pretendida}}{\text{energia consumida}}$$

Assim, o valor da vazão mássica de GLP pode ser determinado através da equação:

$$\dot{m}_{GLP} = \frac{\dot{Q}_{GLP}}{PCI_{GLP}} \quad \left[\frac{kg}{s} \right]$$

O poder calorífico do GLP usado neste trabalho foi de 11.750 kcal/kg. Ambas as taxas de transferência de calor são expressas em kJ/s ou kW. Calculou-se os valores de consumo diário, mensal e anual de GLP utilizando a quantidade de horas por dia, e dias por mês que a caldeira opera na linha de produção, e a vazão mássica de combustível GLP que é consumida por ela em um mês.

3.2.3. Recuperação energética

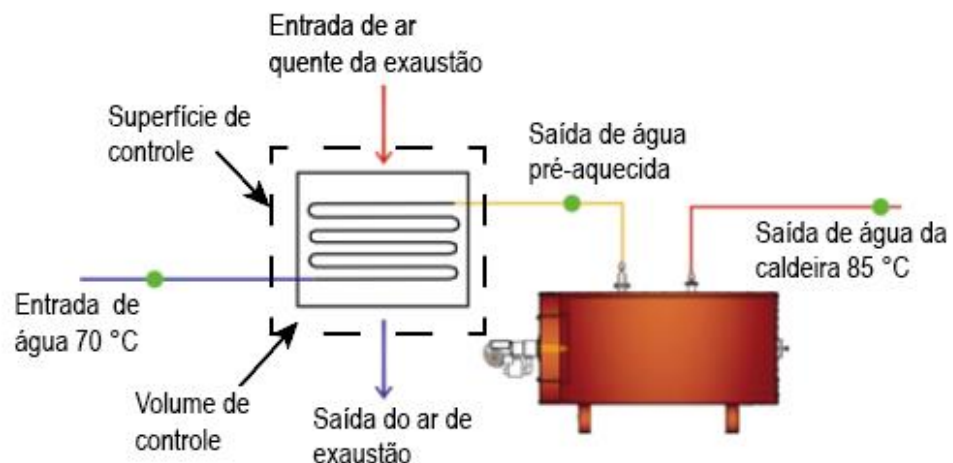
Devido a constante renovação de ar na estufa de secagem, ar quente a 120 °C é expelido através do sistema de exaustão. Ao analisar a magnitude da taxa de calor contida no ar que deixa a estufa, é possível simular o ganho de temperatura da água ao ser pré-aquecida com o calor residual contido nos gases de exaustão. O pré-aquecimento pode ocorrer antes do seu retorno para caldeira, e com isso gerar uma redução de combustível utilizado pelo vaso de pressão.

A recuperação energética proposta pode ser viabilizada por meio da instalação de um novo trocador de calor antes da caldeira. O mecanismo de troca de calor predominante será a convecção forçada: o ar aquecido que sai pelo exaustor será direcionado para trocar calor com a água de processo, que também será direcionada para o interior do trocador de calor.

Portanto, é necessário fazer uma análise termodinâmica do trocador de calor, que utilizará o expelido pelo exaustor em um circuito, e água de processo em outro. Deve-se realizar um balanço de energia através da Primeira Lei da Termodinâmica no volume de controle utilizando o conceito de eficiência. A superfície de controle adotada é imediatamente externa ao trocador de calor.

A Figura 11 ilustra o volume e a superfície de controle adotados para a análise:

Figura 11 - Representação esquemática do volume e superfície de controle



A tabela a seguir enuncia os parâmetros de processo da estufa de secagem:

Tabela 6 - Parâmetros de processo da renovação de ar da estufa de secagem

| Parâmetros de operação do sistema de exaustão | Valores |
|---|--------------------------|
| Vazão volumétrica na tubulação de exaustão (\dot{v}_{ar}) | 8.940 Nm ³ /h |
| Temperatura do ar na saída do exaustor | 120 °C |
| Pressão do ar na entrada e saída do volume de controle | 1,01938 bar |
| Densidade do ar em condições normais (ρ_{ar}) | 1,292 kg/m ³ |

Fonte: EISENMANN, 2014

Para efetuar um balanço de energia no volume de controle, deve-se conhecer a vazão mássica de ar que é expelida pela estufa e direcionada para o trocador de calor, através da superfície de controle adotada. Para tanto, é possível transformar a vazão volumétrica, expressa em $\text{N.m}^3/\text{h}$, em vazão mássica, utilizando a densidade do ar em função da pressão e temperatura em condições normais:

$$\dot{m}_{ar} = \frac{\dot{v}_{ar}\rho_{ar}}{3600} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

Após, calculou-se a taxa de transferência de calor (\dot{Q}_{ar}) contida no ar aquecido. Porém, somente o estado termodinâmico do ar na entrada do volume de controle é conhecido. Para estimar o estado termodinâmico do ar que deixa o volume de controle, pode-se utilizar o conceito de eficiência em termos da entalpia:

$$0,85 = \frac{(h_{ar,entra} - h_{ar,sai})}{(h_{ar,entra} - h')}$$

Sendo que, $h_{ar,entra}$ é um valor conhecido e representa a entalpia do ar aquecido antes do trocador de calor, e $h_{ar,sai}$ é um valor desconhecido e caracteriza a entalpia do ar aquecido após o trocador de calor. Já h' é conhecido e expressa a entalpia do ar considerando uma condição de troca de calor máxima entre os fluidos, ou seja, o ar troca calor com a água e atinge uma temperatura de $70\text{ }^\circ\text{C}$. A partir do valor da entalpia de saída do ar ($h_{ar,sai}$), pode-se calcular a taxa de transferência de calor (\dot{Q}_{ar}) através de um balanço de energia no volume de controle:

$$\dot{W} + \dot{m}_{ar}h_{sai} = \dot{Q}_{ar} + \dot{m}_{ar}h_{entra}$$

Em que $\dot{W} = 0$, pois não há transferência de potência na forma de trabalho mecânico. A partir de \dot{Q}_{ar} , pode-se utilizar do conceito de eficiência para calcular a taxa de transferência de calor fornecida pelo trocador de calor para a água ($\dot{Q}_{recuperação}$):

$$0,85 = \frac{\dot{Q}_{recuperação}}{\dot{Q}_{ar}}$$

Por fim, através da taxa de transferência de calor fornecida pelo trocador de calor para a água ($\dot{Q}_{recuperação}$), é possível determinar a entalpia de saída da água após passar pelo trocador de calor (h_{sai}), aplicando um balanço de energia no volume de controle. A vazão mássica de água do sistema ($\dot{m}_{água}$) já foi determinada na sessão de análise energética da caldeira:

$$\dot{m}_{água}h_{sai} = \dot{Q}_{trocador} + \dot{m}_{água}h_{entra}$$

Sendo que, h_{entra} é conhecida e caracteriza a entalpia da água antes do trocador de calor, h_{sai} representa a entalpia da água após o trocador de calor, ou seja, com acréscimo de temperatura após a troca térmica. O valor de temperatura da água pode ser obtido a partir de tabelas termodinâmicas, utilizando o valor da entalpia e pressão.

3.2.4. Aquecimento de água através do sistema de recuperação de calor e caldeira

Ao instalar um sistema de recuperação de calor, a água de processo passa a retornar para a caldeira com uma temperatura superior, demandando menor potência para reaquecê-la novamente a 85 °C. Logo, é necessário fazer um novo balanço energético no volume de controle que contém a caldeira para quantificar a redução da taxa de calor transferida para a água após a instalação do sistema de recuperação de calor (\dot{Q}_{novo}):

$$\dot{Q}_{novo} + \dot{m}_{água}h'_{entra} = \dot{m}_{água}h_{sai}$$

Sendo que, h'_{entra} representa a entalpia da água que adentra o volume de controle em função da nova temperatura, e h_{sai} caracteriza a entalpia da água que deixa o volume de controle, após aquecimento até 85 °C.

A partir da magnitude da nova taxa de calor transferida para a água (\dot{Q}_{novo}), é possível calcular a nova potência fornecida pelo combustível GLP (\dot{Q}'_{GLP}) através da combustão, utilizando o conceito de eficiência:

$$0,85 = \frac{\dot{Q}_{novo}}{\dot{Q}'_{GLP}}$$

A potência fornecida pelo combustível GLP pode ser descrita como o produto da vazão mássica de combustível pelo seu poder calorífico. Assim, a nova vazão mássica de combustível consumida pela caldeira (\dot{m}'_{GLP}) utilizando o sistema de recuperação de energia pode ser calculada:

$$\dot{Q}'_{GLP} = PCI_{GLP} \dot{m}'_{GLP}$$

3.2.5. Economia e investimento do sistema de recuperação de calor

Após avaliar energeticamente o pré-aquecimento da água com o calor contido nos gases de exaustão, é necessário ponderar a viabilidade econômica da instalação do sistema de recuperação de calor, contemplando custos de instalação, economia de despesas com combustível e tempo de retorno do investimento.

A economia de despesas com combustível é determinada pelo produto da diferença da quantidade de combustível consumida ($\dot{m}_{GLP} - \dot{m}'_{GLP}$) pela quantidade de horas de operação por dia, dias de operação por ano e preço atual do combustível:

$$Economia_{anual} = 3600 * (\dot{m}_{GLP} - \dot{m}'_{GLP}) horas_{trab} dias_{trab} preço_{GLP}$$

A economia gerada é uma forma de validação do processo de recuperação de calor aplicado na linha de produção. Porém, em um contexto industrial é importante fazer uma análise dos gastos necessários para a instalação do sistema e do tempo de retorno que o investimento possui, também chamado de *payback period*.

Realizou-se uma breve cotação com fornecedores de equipamentos e mão de obra necessários para a instalação do sistema de recuperação de calor e, posteriormente, calcular o *payback period* do investimento, dado pela seguinte equação:

$$payback\ period = \frac{Custo\ do\ investimento}{Economia\ anual}$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises termodinâmicas realizadas no processo de lavagem e secagem geraram resultados positivos para a avaliação da implementação de um sistema de recuperação energética na linha de produção. A máxima utilização do calor gerado em um processo é vista como uma excelente alternativa para melhorar a eficiência energética. Além disso, reduz custos e consumo de energia, revelando-se um investimento que gera retornos em curto prazo (CHINTALA et al. 2018).

4.1. Análise termodinâmica sem recuperação de calor na linha de produção

4.1.1. Análise termodinâmica da água aquecida pela caldeira

Ao realizar a análise da caldeira considerando os seus parâmetros de processo disponíveis na Tabela 4, foi possível verificar a vazão mássica de água que passa por ela e alimenta os processos de lavagem e secagem. O resultado encontrado, presente na Tabela 7, não pode ser modificado com a implementação do sistema de recuperação e é fundamental para os cálculos posteriores. Os demais resultados termodinâmicos da água aquecida pela caldeira estão disponíveis na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados termodinâmicos da água aquecida pela caldeira sem recuperação energética

| Água | Valores |
|---------------------------------------|---------|
| Temperatura de entrada (°C) | 70 |
| Entalpia de entrada (kJ/kg) | 293,2 |
| Temperatura de saída (°C) | 85 |
| Entalpia de saída (kJ/kg) | 297 |
| Vazão mássica (kg/s) | 28,37 |
| Vazão volumétrica (m ³ /h) | 105,4 |

4.1.2. Análise de consumo de GLP pela caldeira

A vazão mássica de combustível que a caldeira requer no processo de aquecimento da água foi outro ponto importante de análise. Adotar uma eficiência global para o estudo foi fundamental para determinar a potência fornecida através da queima do GLP. Com esse resultado, foi possível calcular a vazão mássica de combustível que é consumida pela caldeira. Ambos os resultados podem ser

encontrados na Tabela 8, os quais podem ser alterados ao aumentar ou diminuir a eficiência global do sistema.

Tabela 8 - Resultados de consumo de combustível GLP pela caldeira sem recuperação energética

| Combustível GLP | Valores |
|-------------------------|---------|
| Potência fornecida (kW) | 2.100 |
| PCI (kJ/kg) | 49.195 |
| Vazão mássica (kg/s) | 0,04269 |

4.2. Análise termodinâmica com recuperação de calor na linha de produção

4.2.1. Análise do ar aquecido no trocador de calor de pré-aquecimento

Para validar o aquecimento da água a partir do calor residual presente no ar, foi necessário calcular tanto a vazão com que o ar seria direcionado para o trocador de pré-aquecimento, quanto a taxa de transferência de calor que ele poderia oferecer para o sistema.

Os parâmetros de operação do sistema de exaustão, disponíveis na Tabela 6, permitiram estimar a vazão mássica na tubulação de exaustão em kg/s, determinar o estado termodinâmico do ar quente em todo o sistema e calcular a taxa de transferência de calor que o ar quente oferece. Os resultados estão disponíveis nas Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11.

Tabela 9 - Resultados termodinâmicos do ar aquecido expelido pelo exaustor

| Ar aquecido | Valores |
|--|---------|
| Vazão volumétrica (Nm ³ /h) | 8.940 |
| Vazão volumétrica (m ³ /h) | 11.919 |
| Vazão mássica (kg/s) | 2,99 |
| Taxa de transferência de calor (kW) | 128,3 |

Tabela 10 - Resultados termodinâmicos do ar aquecido na entrada do trocador de calor de pré-aquecimento

| Ar aquecido | Valores |
|---|---------|
| Temperatura de entrada (°C) | 120 |
| Pressão de entrada (bar) | 1,019 |
| Entalpia de entrada (kJ/kg) | 394,3 |
| Densidade de entrada (kg/m ³) | 0,9033 |

Tabela 11 - Resultados termodinâmicos do ar aquecido na saída do trocador de calor de pré-aquecimento

| Ar aquecido | Valores |
|---|---------|
| Temperatura de saída (°C) | 77,51 |
| Pressão de saída (bar) | 1,019 |
| Entalpia de saída (kJ/kg) | 351,4 |
| Densidade de saída (kg/m ³) | 1,013 |

Os resultados da análise termodinâmica do ar aquecido que atua no trocador de calor de pré-aquecimento, presentes nas Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11, mostram um alto valor de vazão mássica, o que requer a utilização de tubulações com diâmetro maior, principalmente pelo fato do ar possuir uma densidade muito pequena nas condições analisadas. Além disso, é possível constatar que o ar deixa o trocador de calor com uma menor temperatura, confirmando a troca térmica com a água.

4.2.2. Análise da água no trocador de calor de pré-aquecimento

O trocador de calor de pré-aquecimento possui a importante função de pré-aquecer a água antes de sua entrada na caldeira. Novamente, adotou-se uma eficiência global para determinar a taxa de transferência de calor que seria fornecida por ele para a água, uma vez que, com este resultado foi possível calcular a temperatura de saída da água após o pré-aquecimento.

A Tabela 12 apresenta os resultados da análise termodinâmica da água, em que é possível observar a taxa de transferência de calor que é fornecida pelo trocador de calor de pré-aquecimento e a temperatura de saída da água que é pré-aquecida, sendo este o resultado que chama mais atenção. O ganho de temperatura que a água obteve, ao passar pelo trocador de calor de pré-aquecimento, pode parecer irrelevante

no primeiro momento por aparentar ser mínimo, mas ao continuar as análises se mostrará eficiente o suficiente para gerar uma economia de combustível GLP.

Tabela 12 - Resultados termodinâmicos da água na entrada e saída do trocador de calor de pré-aquecimento

| Água | Valores |
|--|---------|
| Temperatura de entrada (°C) | 70 |
| Entalpia de entrada (kJ/kg) | 293,2 |
| Temperatura de saída (°C) | 70,92 |
| Entalpia de saída (kJ/kg) | 297 |
| Taxa de transferência de calor do trocador de calor (kW) | 109,1 |

4.3. Comparação termodinâmica da linha de produção sem e com a recuperação de calor

A implementação do trocador de calor de pré-aquecimento ocasionou um ganho de temperatura na água antes de sua entrada na caldeira, demandando uma menor potência para aquecê-la a 85°C. Assim, foi necessário realizar uma nova análise termodinâmica da caldeira para avaliar os efeitos que o pré-aquecimento da água gera na taxa de transferência de calor fornecida por ela e, conseqüentemente, na potência fornecida pelo combustível GLP. Mais uma vez, utilizar uma eficiência global foi fundamental para os cálculos.

Os resultados termodinâmicos da linha de produção sem recuperação e com recuperação estão, respectivamente, na *Tabela 13* e *Tabela 14*.

Tabela 13 - Resultados termodinâmicos da linha de produção sem recuperação energética.

| Variáveis originais | Valores |
|---|---------|
| Temperatura da água na entrada da caldeira (°C) | 70 |
| Taxa de transferência de calor da caldeira (kW) | 1.785 |
| Taxa de transferência de calor do GLP (kW) | 2.100 |
| Vazão mássica de combustível (kg/s) | 0,04269 |

Tabela 14 - Resultados termodinâmicos da linha de produção com recuperação energética

| Variáveis recalculadas | Valores |
|---|---------|
| Temperatura da água na entrada da caldeira (°C) | 70,92 |
| Taxa de transferência de calor da caldeira (kW) | 1.676 |
| Taxa de transferência de calor do GLP (kW) | 1.972 |
| Vazão mássica de combustível (kg/s) | 0,04008 |

Em um primeiro momento, o ganho de temperatura que a água obteve ao passar pelo trocador de calor de pré-aquecimento se mostrava irrelevante, mas os resultados da *Tabela 14* mostram que, apesar de um aumento de temperatura de apenas 0,92 °C, a caldeira pode trabalhar com uma potência que é 6,1% menor, comparado com o sistema sem recuperação de calor. Conseqüentemente, a potência fornecida pelo combustível GLP também sofreu reduções.

Além disso, é possível perceber que a caldeira consome 6,12% a menos de combustível GLP com a implementação do trocador de calor de pré-aquecimento, revelando que, apesar de gerar um ganho de temperatura relativamente baixo, o sistema de recuperação de calor se mostra eficiente para proporcionar uma economia de combustível consumido.

4.4. Análise financeira para implementação do sistema de recuperação de calor na linha de produção

As análises termodinâmicas demonstram que o sistema de recuperação de calor proposto por este trabalho é viável energeticamente. Para torná-lo viável economicamente, foi necessário determinar os custos de implementação do trocador de calor de pré-aquecimento, a economia com combustível GLP e tempo de retorno do investimento.

4.4.1. Análise financeira da economia de combustível GLP dada em reais (R\$)

A economia de combustível foi calculada a partir dos dados de operação da caldeira, como a quantidade de horas de trabalho por dia e dias de trabalho por ano, ambas disponíveis na Tabela 4. Além disso, o cálculo da economia gerada pelo sistema de recuperação de calor considerou preço atualizado do combustível GLP que, para o presente trabalho corresponde à R\$ 5,33 por kg.

A economia mensal e anual com combustível, dada em reais e estimada com a implementação do sistema de recuperação de calor, está disponível na Tabela 15.

Tabela 15 – Economia mensal e anual de combustível GLP dada em reais (R\$)

| Economia | Reais (R\$) |
|----------|-------------|
| Mensal | 18.917,00 |
| Anual | 227.001,00 |

Os resultados da Tabela 15 comprovam mais uma vez que, apesar do trocador de calor de pré-aquecimento gerar um aumento de temperatura relativamente baixo na água, ele é capaz de propiciar uma economia financeira para a empresa. Em relação a gastos com combustível GLP, o sistema de recuperação de calor pode proporcionar economias no valor de, aproximadamente, 227 mil reais (R\$ 227.000,00).

4.4.2. Análise financeira de investimento e tempo de retorno da implementação do sistema de recuperação de calor

Em um contexto industrial, é importante realizar uma análise sobre os custos de implementação do sistema de recuperação de calor proposto, assim como o tempo de retorno que o investimento possui. Para estimar os custos de implementação, uma cotação simples foi realizada com os fornecedores dos equipamentos necessários para a instalação do sistema: trocador de calor, tubulações e isolamento térmico.

O trocador de calor selecionado foi um trocador de calor de placas, e entre as especificações técnicas dadas pelo fornecedor pode-se citar duas que chamam atenção: a queda de pressão que o equipamento gera no ar aquecido, de aproximadamente 0,96 bar e a taxa de transferência de calor de 158,7 kW. O presente trabalho calculou um valor de 109,1 kW para a taxa de transferência de calor do trocador, o que evidencia o conservadorismo adotado para realizar as análises termodinâmicas. O trocador de calor de placas foi cotado a R\$140.601,56 na Alfa Laval no dia 18 de março de 2022.

Figura 12 – Exemplo ilustrativo do trocador de calor de placas cotado na Alfa Laval



Fonte: Alfa Laval, 2022

O comprimento necessário da tubulação foi estimado a partir do desenho da planta baixa da linha de produção, conforme ilustram as imagens a seguir:

Figura 13 - Vista superior da linha de produção

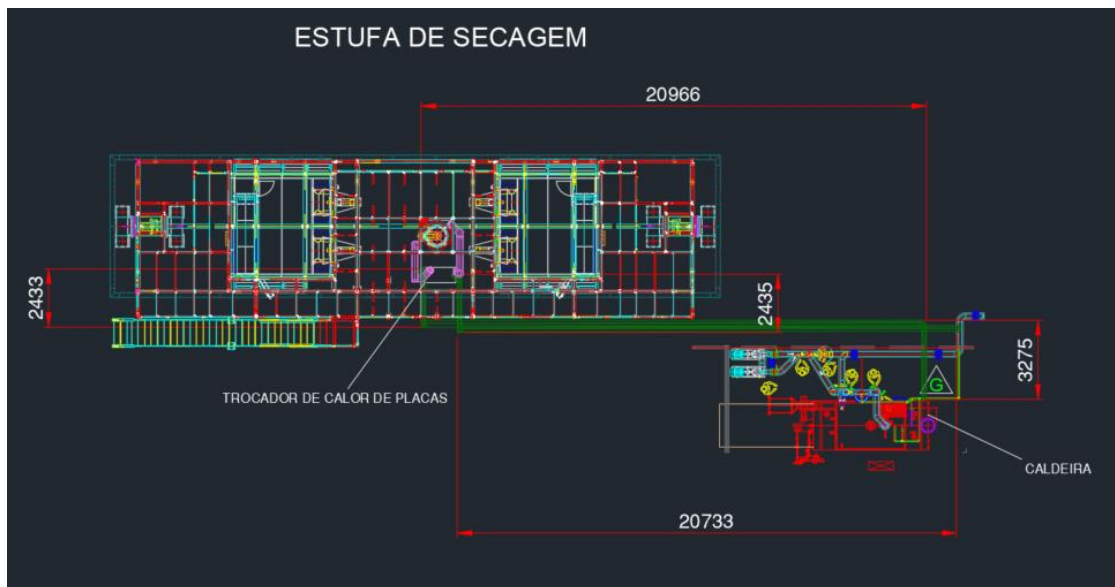
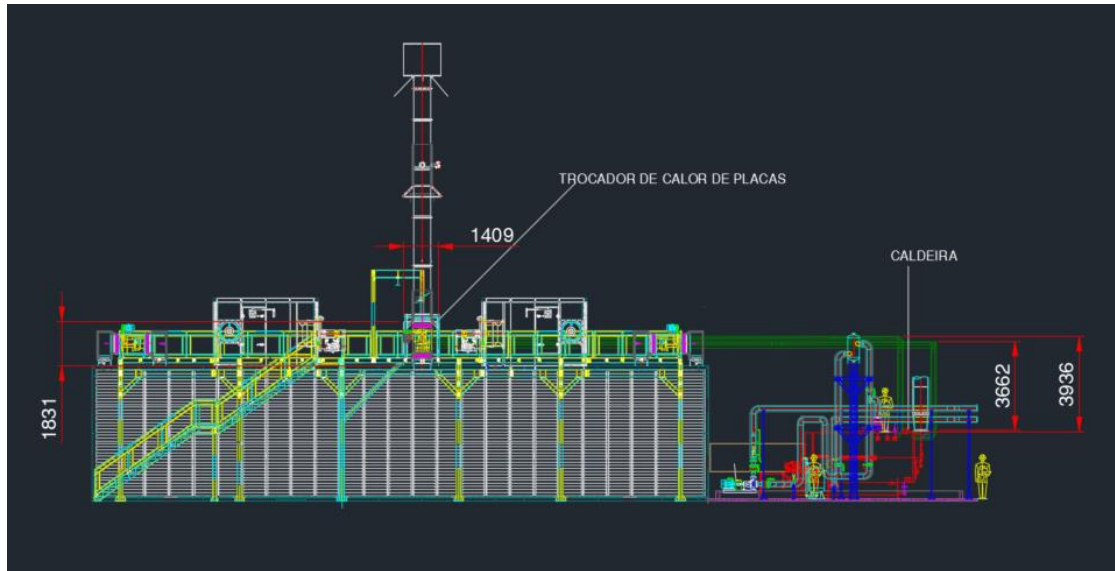


Figura 14 - Vista lateral da linha de produção



As tubulações selecionadas seguem a norma NBR 5580, que estabelece um padrão de exigência para fabricação e fornecimento de tubos de aço carbono para condução de água, gás e vapor. Serão necessários 58 metros de tubulação com diâmetro de 6 polegadas (0,0254 metros) para a instalação do sistema de recuperação de calor. Além disso, a tubulação escolhida é galvanizada, o que oferece maior proteção contra corrosão. As tubulações de aço galvanizado foram cotadas a R\$15.070,00 na Quality Tubos no dia 23 de março de 2022.

Figura 15 - Exemplo ilustrativo da tubulação de aço galvanizado cotado na Quality Tubos



Fonte: Quality Tubos 2022

O isolamento térmico da tubulação é fundamental para evitar perdas energéticas durante o transporte do ar quente em direção ao trocador. O sistema de

recuperação de calor proposto necessitará de 58 metros de material isolante para tubulações com diâmetro de 6 polegadas. Foi selecionado o material lã de rocha com 50 mm de espessura e com emissividade, capacidade de emissão de energia por radiação, de 0,9. O isolamento térmico foi cotado a R\$4.247,76 na Rock Fibras no dia 22 de março de 2022.

Figura 16 - Exemplo ilustrativo do isolamento térmico de lã de rocha cotado na Rock Fibras



Fonte: Rock Fibras 2022

Os valores foram somados e descritos como investimento total. Com este valor, foi possível também calcular o tempo de retorno ou, também chamado de *payback period*, do investimento.

O investimento dos equipamentos que compõem o sistema de recuperação de calor, assim como o tempo de retorno, estão descritos na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores do investimento total e tempo de retorno do sistema de recuperação de calor

| Recuperação energética | Valores |
|------------------------------|------------|
| Investimento total (R\$) | 159.919,32 |
| <i>Payback period</i> (anos) | 0,71 |

É possível observar que os resultados da Tabela 16 exibem um valor de investimento total acessível para a implementação do sistema de recuperação de calor e um tempo de retorno relativamente baixo, aproximadamente 9 meses, principalmente devido à economia financeira que o sistema pode gerar para a linha de produção. Os resultados apresentados e discutidos comprovam a viabilidade energética e financeira do sistema de recuperação de calor.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho propôs a máxima utilização do calor gerado em um processo, visando conformidade com as novas diretrizes mundiais de desenvolvimento sustentável, eficiência energética e redução do consumo de energia. O calor residual contido nos gases de exaustão da estufa de secagem revelou ser uma boa oportunidade para pré-aquecer a água destinada à lavagem de peças, gerando benefícios como a economia de GLP, redução das emissões de GHG e aumento da eficiência energética da fábrica.

Os resultados evidenciaram que a água não apresentou um aumento de temperatura expressivo após ser aquecida pela unidade de recuperação de calor. Ainda assim, a simulação da economia de combustível anual a partir desse ganho de calor evidenciou uma redução expressiva de despesas com combustível. A análise financeira realizada revelou que a implementação do sistema de recuperação de calor é acessível para indústrias de médio a grande porte, com um tempo de retorno do investimento relativamente baixo.

Na medida em que as mudanças climáticas se tornam realidade, soluções de recuperação de calor são uma boa alternativa a ser adotada no setor industrial, visando aumento da eficiência energética. A análise do sistema de recuperação de calor proposto por este trabalho mostra que, além de diminuir o consumo de combustível GLP da caldeira, reduz as emissões de GHG e aumenta a eficiência energética da linha de produção. As verificações termodinâmicas dos processos de lavagem e secagem de peças permitiram aprovar a viabilidade energética e financeira para a implementação de um sistema de recuperação de calor na linha de produção.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho avaliou a viabilidade de recuperação de energia em uma estufa de secagem de peças. Entretanto, em um ambiente industrial, algumas questões devem ser discutidas antes da instalação de um novo sistema: disponibilidade de um local de instalação sem interferir na configuração atual da linha de produção; análise estrutural das cargas no piso para acomodar o novo equipamento; estudo da ramificação das tubulações visando o mínimo de perda de carga e máxima retenção de calor; análise da capacidade do barramento elétrico para acomodar o novo equipamento; capacidade do corpo técnico para executar manutenções no novo sistema sempre que necessário.

Para aprimorar o valor do investimento, sugere-se o estudo e simulação do circuito de pré-aquecimento contemplando equipamentos que mantenham a pressão na linha, como sopradores e bombas centrífugas.

Este trabalho visou o aproveitamento energético do calor contido no ar expelido pelos exaustores para pré-aquecer a água. Porém, a linha de produção ainda depende de uma caldeira flamotubular que utiliza um combustível derivado do petróleo para o seu funcionamento. Logo, é interessante realizar o estudo de métodos alternativos para aquecimento da água, como a energia termossolar. As questões a serem levadas em consideração na escolha de fontes alternativas de energia são: capacidade de manutenção e tempo de *warm up* do sistema, ou seja, o período que o equipamento leva até entrar em regime permanente.

Além da caldeira, os queimadores também utilizam GLP como combustível na linha de produção. Existem tecnologias de energia termossolar aplicadas para o aquecimento de ar. Novamente, é interessante realizar o estudo de métodos alternativos para aquecimento do ar, como a energia termossolar, levando em consideração a capacidade de manutenção e tempo de *warm up* do sistema.

Ademais, há oportunidades de recuperação de energia na estufa de cura de tinta, a qual também expele ar pelo sistema de exaustão. Na instalação industrial de manufatura metalmeccânica avaliada, a estufa de cura está afastada da estufa de secagem e da caldeira. Logo, a perda térmica e a perda de carga em função da distância da tubulação devem ser avaliadas.

REFERÊNCIAS

ALFA LAVAL AALBORG. Manual de Instrução: Caldeira Aalborg 3 Pass. Petrópolis, 2015

ALFA LAVAL LTDA. Trocadores de Calor a placas gaxetado. 2022. Disponível em: < <https://www.alfalaval.com.br/produtos/transferencia-de-calor/trocadores-de-calor-a-placa/trocadores-de-calor-a-placas-gaxetado/>>

BAZZO E., Geração de vapor. Florianópolis, Brasil, Ed. UFSC, 1995.

BERLINER LUFT. Manual de Instalação, Operação e Manutenção: Ventiladores Centrífugos. São Paulo, 2014

BONILLA-CAMPOS I., NIETO N., PORTILLO-VALDES L., EGILEGOR B., MANZANEDO J., GAZTAÑAGA H. Energy efficiency assessment: Process modelling and waste heat recovery analysis. Energy Conversion and Management, vol. 196, pp. 1-12, 2019.

BOSE S., High Temperature Coatings. Oxford, Inglaterra, Ed. Butterworth-Heinemann, 200.

CAVAZZINI G., BARI S., MCGRAIL P., BENEDETTI V., PAVESI G., ARDIZZON G., Contribution of Metal-Organic-Heat Carrier nanoparticles in a R245fa low-grade heat recovery Organic Rankine Cycle. Energy Conversion and Management, vol. 199, pp. 1-13, 2019.

CHINTALA V., KUMAR S., PANDEY J. K., A technical review on waste heat recovery from compression ignition engines using organic Rankine cycle. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 81, pp. 1-13, 2018.

ÇENGEL Y. A., BOLES, M. A., Thermodynamics: An Engineering Approach. Boston, Estados Unidos, Ed. McGraw-Hill, 2006.

EISENMANN. Descritivo Funcional do Secador de água. São Paulo, 2014

EISENMANN. Descritivo Funcional do Pré-tratamento. São Paulo, 2014

FARHAT O., FARAJ J., HACHEM F., CASTELAIN C., KHALED M. A recent review on waste heat recovery methodologies and applications: Comprehensive review, critical analysis, and potential recommendations. *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 6, pp. 1-18, 2022.

FERMI. E. *Thermodynamics*. Nova Iorque, Estados Unidos, Ed. Dover Publications, 1956.

FEYNMAN R. P., LEIGHTON R. B., SANDS M. *The Feynman Lectures on Physics*. Porto Alegre, Brasil, Ed. Bookman, 2008.

HAHN P., MESQUITA M., TORRES P. L., KNAACK J. *Energia Termossolar para a Indústria: Brasil. Solar Payback*, 2018.

HERBERT, H., "Análise do consumo de gás liquefeito de petróleo (GLP) no processo produtivo de biscoitos," Trabalho de Conclusão de Curso TCC. 51 páginas. Curso de Engenharia de Alimentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Medianeira

INCROPERA F. P., BERGMAN T. L., LAVINE A. S., DEWITT D. P. *Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa*. Rio de Janeiro, Brasil, Ed. LTC, 2014.

KREITH F., BOHN M. S. *Princípios de Transferência de Calor*. São Paulo, Brasil. Ed. Thomson, 2003.

JABER H., KHALED M., LEMENAND T., FARAJ J., BAZZI H., RAMADAN M., *Effect of Exhaust Gases Temperature on the Performance of a Hybrid Heat Recovery System*, *Energy Procedia*, vol. 119, pp. 1-7, 2017.

KSB. Manual de Operação e Montagem MegaCPK. São Paulo, 2013

KONDEPUDI D., PRIGOGINE I. Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures. Nova Iorque, Estados Unidos, Ed. Wiley, 1998.

MACINTYRE, A. J. Instalações Hidráulicas Prediais e Industriais. Rio de Janeiro, Brasil. Ed. LTC, 2018.

MAMEDE FILHO, J. Instalações Elétricas Industriais: de acordo com a Norma Brasileira NBR 5419:2015. Rio de Janeiro, Brasil, Ed. LTC, 2017.

MCALLISTER S., CHEN J., FERNANDEZ-PELLO A. C. Fundamentals of Combustion Processes. Nova Iorque, Estados Unidos, Ed. Springer, 2011.

MORAN M. J., SHAPIRO H. N., BOETTNER D. D., BAILEY M. B. Princípios de Termodinâmica para Engenharia. Rio de Janeiro, Brasil, Ed. LTC, 2018.

NA S., KIM M. S., BAIK Y., KIM M. Optimal allocation of heat exchangers in a Supercritical carbon dioxide power cycle for waste heat recovery. Energy Conversion and Management, vol. 199, pp. 1-9, 2019.

NOGUEIRA, L. A. H., NOGUEIRA, F. J. H., ROCHA, C. R. Eficiência Energética no uso de vapor. Eletrobrás, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 58-76, 2005.

QUALITY TUBOS. Tubos Galvanizados NBR 5580. 2022. Disponível em: < <https://www.lojaqualitytubos.com.br/tubo-galvanizado-a-fogo-6-p993990>>

REBOLLAR P. B. M., RODRIGUES P. R. Energia Solar. Araranguá, Brasil, Ed. Unisul, 2011.

ROCK FIBRAS. Especificações de isolamento térmico. 2022. Disponível em: < <https://rockfibras.com.br/isotubo/>>

TRANTER. Manual de Instalação e Operação: Trocador de Calor a Placas Superchanger. Cotia, 2014

TUBINO D. F. Manufatura Enxuta como Estratégia de Produção: A Chave para a Produtividade Industrial. São Paulo, Brasil, Ed. Atlas, 2015.

URNS S. R. Introdução à Combustão: conceitos e aplicações. Boston, Estados Unidos, Ed. McGraw-Hill, 2013.

TOGAWA, V. Os Principais Tipos de Caldeiras. 2020. Disponível em: <<https://togawaengenharia.com.br/blog/os-principais-tipos-de-caldeiras/>>

WYLEN G. J. V., BORGNAKKE C., SONNTAG R. E. Fundamentos da Termodinâmica. São Paulo, Brasil, Ed. Blucher, 2013.