

**REDE DOCTUM DE ENSINO FACULDADES
DOCTUM DE CARATINGA CURSO SUPERIOR
DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE UMA
CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO (EM UMA FÁBRICA X)
CONSIDERANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

NATAN ANICETO COSTA

Trabalho de Conclusão de Curso

Caratinga/MG

2017

NATAN ANICETO COSTA

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE UMA
CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO (EM UMA FÁBRICA X)
CONSIDERANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso Superior de Engenharia Elétrica das Faculdades Doctum de Caratinga como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.
Professor Orientador: Prof. MSC Ricardo Botelho Campos

Caratinga/MG

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

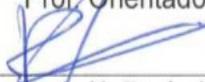
O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: ESTUDO DA VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DE UMA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO (EM UMA FÁBRICA X) CONSIDERANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, elaborado pelo(s) aluno(s) NATAN ANICETO COSTA foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceito pelo curso de ENGENHARIA ELÉTRICA das FACULDADES DOCTUM CARATINGA, como requisito parcial da obtenção do título de

BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

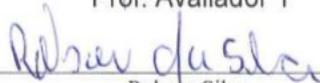
Caratinga 14 de Dezembro de 2017



Ricardo Botelho
Prof. Orientador



Reginaldo Eustáquio
Prof. Avaliador 1



Robson Silva
Prof. Examinador 2

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre ter me dado força nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais Jose Alves e Marta Aparecida e a toda minha família, que sempre me incentivaram e me fizeram acreditar que a realização deste sonho seria possível.

A minha esposa Flaviane e ao meu filho João Victor, pela compreensão nos momentos em que estive ausente.

Ao meu orientador Ricardo Botelho pela paciência e colaboração na elaboração deste trabalho.

À todos que me ajudaram e acreditaram, muito obrigado!

“Se você pode sonhar. Você pode realizar.”
(Walter Disney)

COSTA, Natan Aniceto. Estudo da Viabilidade de Implementação de uma Caldeira de Recuperação (em uma Fábrica X) Considerando a Eficiência Energética. Caratinga, 2017. 34f. Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Engenharia Elétrica - Curso de Engenharia Elétrica. Faculdades Doctum de Caratinga, Rede DOCTUM, Caratinga, 2017.

RESUMO

Este trabalho de conclusão apresenta o funcionamento e a importância das caldeiras de recuperação no setor industrial. A proposta de um projeto de análise de eficiência energética e consequentemente econômica, veio mediante a outra análise de eficiência, onde nesta percebeu-se que havia um custo desnecessário e que poderia ser substituído por um método de geração mais eficaz e mais barato. O objetivo deste trabalho foi estudar a viabilidade de se utilizar do processo de exaustão de gases energéticos, provenientes da chaminé de um forno, para implementar uma caldeira de recuperação que fornecerá vapor saturado a uma câmara de fermentação presente na fábrica de pães (adotado como fábrica X). Esta caldeira tem como objetivo substituir um gerador de vapor que funciona atualmente na fábrica. Os resultados obtidos no projeto de eficiência energética demonstraram a eficácia e a viabilidade de se utilizar uma caldeira de recuperação em relação ao processo já utilizado. Devido ao alto consumo de energia elétrica demandando pela câmara de fermentação diariamente e a necessidade de intensa mão de obra, pode-se estimar que a alternativa proposta poderá trazer benefícios econômicos em toda a cadeia produtiva da fábrica ao longo do tempo.

Palavras-chave: Caldeira de Recuperação. Eficiência Energética. Câmara de Fermentação. Vapor Saturado.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Esquema de Caldeira Aquatubular.(Fonte: Adaptado de BEGA, 2003) | 12 |
| Figura 2 – Caldeira Típica .(Fonte: Adaptada Mendes Juanico, 1995) | 13 |
| Figura 3 – Superaquecedor.(Fonte: Adaptada Mendes Juanico, 1995) | 14 |
| Figura 4 – Esquema de Caldeira Fogotubular.(Fonte: Adaptado de BEGA, 2003) . . . | 16 |
| Figura 5 – Caldeira Flamotubular Vertical.(Fonte: Adaptado de Mota, 1999) | 17 |
| Figura 6 – Caldeira de Cornuália.(Fonte: Adaptado de Mota, 1999) | 18 |
| Figura 7 – Caldeira Multitubular.(Fonte: Adaptado de Mota, 1999) | 18 |
| Figura 8 – Queimador e Chaminé.(Fonte: Autor, 2017) | 21 |
| Figura 9 – Medição da Temperatura na Chaminé.(Fonte: Autor, 2017) | 22 |
| Figura 10 – Câmara de Fermentação.(Fonte: Autor, 2017) | 23 |
| Figura 11 – Câmara de Fermentação - Interior.(Fonte: Autor, 2017) | 23 |
| Figura 12 – Câmara de Fermentação - Exterior.(Fonte: Autor, 2017) | 24 |
| Figura 13 – Gerador de Vapor.(Fonte: Autor, 2017) | 24 |
| Figura 14 – Resistor Danificado do Gerador.(Fonte: Autor, 2017) | 25 |
| Figura 15 – Dados Técnicos do Queimador.(Fonte: Autor, 2017) | 26 |
| Figura 16 – Caldeira Fogotubular série VMB.(Fonte: Tec Tecnologia em Calor Ltda, 2017) | 27 |
| Figura 17 – Esquema da Caldeira Fogotubular série VMB.(Fonte: Tec Tecnologia em Calor Ltda, 2017) | 28 |
| Figura 18 – Tabela Dados Técnicos.(Fonte: Tec Tecnologia em Calor Ltda, 2017) | 28 |
| Figura 19 – Cálculo de Retorno Financeiro.(Fonte: Autor, 2017) | 30 |
| Figura 20 – Gráfico de Retorno Financeiro. (Fonte: Autor, 2017) | 31 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------------------|--|
| GLP | Gás Liquefeito de Petróleo |
| HFP | Horário Fora De Ponta |
| HP | Horário De Ponta |
| kCal | Quilocaloria |
| kCal/Kg | Quilocaloria por Quilograma |
| kCal/m ₃ | Quilocaloria por Metros Cúbicos |
| Kg | Quilograma |
| Kg/h | Quilograma por Hora |
| kgf/cm ₂ | Quilograma Força por Centímetro Quadrado |
| kPa | Quilopascal |
| kW | Quilowatts |
| LTDA | Limitada |
| m ₂ | Metro Quadrado |
| W | - Watts |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 9 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA | 10 |
| 2.1 CALDEIRAS | 10 |
| 2.1.1 Classificação das Caldeiras | 11 |
| 2.2 TIPOS DE CALDEIRAS | 11 |
| 2.2.1 Aquatubular | 11 |
| 2.2.2 Fogotubular | 15 |
| 2.2.2.1 Tipos de Caldeiras Fogotubulares | 16 |
| 2.2.2.1.1 Caldeiras de Tubos Verticais: | 17 |
| 2.2.2.1.2 Caldeiras de Cornuália: | 17 |
| 2.2.2.1.3 Caldeiras Multitubulares de Fornalha Externa: | 18 |
| 2.3 EQUIPAMENTOS ESSENCIAIS DAS CALDEIRAS | 18 |
| 2.3.1 Superaquecedores | 19 |
| 2.3.2 Economizadores | 19 |
| 2.3.3 Precipitadores Eletrostáticos | 19 |
| 2.4 CONCEITOS DE TERMODINÂMICA | 19 |
| 3 ESTUDO DA VIABILIDADE E ANÁLISE DOS EQUIPAMENTOS | 21 |
| 3.1 EQUIPAMENTOS DA FÁBRICA X | 21 |
| 3.1.1 Forno e Queimador Industrial | 21 |
| 3.1.2 Câmara de Fermentação | 22 |
| 3.2 Análise de Viabilidade Energética | 25 |
| 3.2.1 Consumo de energia da Camara de fermentação | 25 |
| 3.3 Análise do Queimador do Forno | 26 |
| 3.3.1 Conversão de Dados e Cálculo de Geração | 26 |
| 3.4 Análise da Caldeira de Recuperação | 27 |
| 3.4.1 Orçamento da Caldeira | 27 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 30 |
| 4.1 Análise de Payback Financeiro | 30 |
| 4.2 Considerações Sobre a Caldeira | 31 |
| 5 CONCLUSÃO | 32 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 33 |

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente consumo de energia no planeta percebe-se cada vez mais a importância de se criar métodos que visam a otimização da energia elétrica. Em relação às indústrias, quando se trata de eficiência energética e passa-se a considerar uma melhor utilização do maquinário e um bom aproveitamento de recursos energéticos, tem-se como resultados não só a redução no desperdício como também a contribuição para um mundo mais sustentável, e principalmente, ações satisfatórias do ponto de vista econômico.

Pensando nesses aspectos o presente trabalho abordará a análise da viabilidade em termos de eficiência energética ao se instalar uma caldeira de recuperação de calor para geração de vapor, esta, operando em conjunto com uma turbina do queimador do forno a gás, buscando oferecer uma alternativa para reutilização dos gases liberados pela combustão do forno.

Pretende-se tratar sobre as particularidades de uma caldeira de recuperação, usando o calor formado como um subproduto de outro processo. O calor que é desperdiçado na chaminé do forno poderá ser reutilizado no processo de produção na fábrica de pães ou (fábrica X), através da caldeira que gerará vapor para suprir uma câmara de fermentação.

O trabalho tem como objetivo demonstrar a viabilidade na implementação desta caldeira para substituir o processo de geração de vapor utilizado atualmente na fábrica em questão. Pensando nesses aspectos, a proposta de análise de eficiência energética busca oferecer uma alternativa eficaz visando uma economia no consumo de energia elétrica e de mão de obra frente a este processo já existente.

Para que se alcance o objetivo proposto, serão adotados os seguintes procedimentos: estudos bibliográficos, conceitos básicos de controle de processo, análise dos tipos de caldeira, métodos de medição, cálculos.

O trabalho monográfico será dividido em quatro capítulos. O capítulo primeiro abordará os conceitos, características, tipos de caldeira e princípios fundamentais de calor, temperatura e vapor. O segundo capítulo, abordará a viabilidade da implantação da caldeira para geração de vapor na câmara de fermentação. O terceiro capítulo tem como objetivo demonstrar os resultados e discussões da pesquisa quanto a viabilidade do projeto. E no quarto capítulo será feita a conclusão do trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CALDEIRAS

A caldeira é um equipamento capaz de produzir vapor através do aquecimento da água, o vapor produzido alimenta equipamentos térmicos e armazena o vapor sob pressão. A utilização da caldeira iniciou no século XVIII, quando ainda se utilizava o carvão para gerar vapor. As primeiras caldeiras surgiram para resolver este problema, e atualmente há no mercado diversos tipos de caldeiras.

Segundo Bega (2003). Uma caldeira é composta por dois sistemas básicos separados. Um é o sistema vapor-água, também chamado de lado de água da caldeira, e o outro é o sistema combustível-ar-gás da combustão, chamado de lado de fogo da caldeira.

A utilização deste equipamento é adotada na indústria para a redução de custos com combustíveis, a exemplos indústria, fábrica de celulose, dentre outras. No setor de panificação a sua utilização está ligada principalmente na geração de vapor para a câmara de fermentação.

No século X, a máquina a vapor, como fornecedora de energia foi sendo substituída por turbinas a vapor, para a geração de energia elétrica, motores de combustão interna para transporte e por motores elétricos para uso industrial e doméstico.

Mesmo assim, o vapor ainda hoje tem extensa aplicação industrial, nas mais diversas formas, dependendo do tipo de indústria e da região onde está instalada. O vapor produzido em um gerador de vapor pode ser usado de diversas formas:

Indústrias de laticínios: na pasteurização, na esterilização de recipientes, na fabricação de creme de leite, no aquecimento de tanques de água, na produção de queijos, iogurtes e requeijões (fermentação).

Indústria de doces em geral: no aquecimento do tanque de glicose, no cozimento de massa em panelas sob pressão, em mesas para o preparo de massa, em estufas.

Indústria de vulcanização e recauchutagem: na vulcanização, nas prensas.

Indústria têxtil: utiliza vapor no aquecimento de grandes quantidades de água para alvejar e tingir tecidos, bem como para realizar a secagem em estufas. Indústria de petróleo e seus derivados: nos refeedores, nos trocadores de calor, nas torres de fracionamento e destilação, nos fornos, nos vasos de pressão, nos reatores e turbinas.

Indústria metalúrgica: nos banhos químicos, na secagem e pintura.

De acordo com Mendes Juanico (1995). A geração de energia elétrica através de vapor é obtida nas usinas termoeletricas e outros pólos industriais. Para isso, os equipamentos são compostos basicamente de um gerador de vapor superaquecido, uma turbina, um gerador elétrico e um condensador.

O vapor é também utilizado para a movimentação de equipamentos rotativos, na geração de trabalhos mecânicos. Nas indústrias onde é usado “óleo combustível pesado”, é necessário o aquecimento das tubulações e reservatórios de óleo, a fim de que ele possa fluir livremente e proporcionar uma boa combustão. Isso é feito por meio dos geradores de vapor.

Além desses usos industriais, os hospitais, as indústrias de refeições, os hotéis e similares utilizam o vapor em suas lavanderias e cozinhas e no aquecimento de ambientes.

2.1.1 Classificação das Caldeiras

As caldeiras podem ser classificadas de acordo com: classes de pressão, grau de automação, tipo de energia empregada, tipo de troca térmica.

De acordo com as classes de pressão, as caldeiras foram classificadas segundo a NR-13 em:

Categoria A: caldeira cuja pressão de operação é superior a 1960 kPa ($19,98\text{kgf/cm}^2$);

Categoria B: caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores. De acordo com o grau de automação, as caldeiras podem se classificar em: manuais, semiautomática e automática.

Categoria C: caldeiras com pressão de operação igual ou inferior a 588 kPa ($5,99\text{kgf/cm}^2$) e volume interno igual ou inferior a 100 litros. De acordo com o tipo de energia empregada, elas podem ser do tipo: combustível sólido, líquido, gasoso, caldeiras elétricas e caldeiras de recuperação. Existem outras maneiras particulares de classificação, a saber: quanto ao tipo de montagem, circulação de água, sistema de tiragem e tipo de sustentação.

2.2 TIPOS DE CALDEIRAS

A classificação mais usual de caldeiras de combustão divide-as em: fogotubulares e aquatubulares.

2.2.1 Aquatubular

Com a evolução dos processos industriais, aumentou muito a necessidade de caldeiras com maior rendimento, menos consumo, rápida geração e grandes quantidades de vapor. Baseados nos princípios da transferência de calor e na

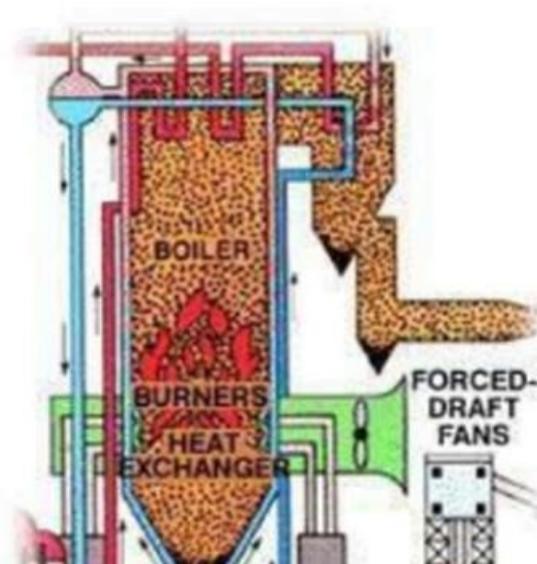
experiência com os tipos de caldeiras existentes, os fabricantes inverteram a forma de geração de calor: trocaram os tubos de fogo por tubos de água, o que aumentou muito a superfície de aquecimento, surgindo a caldeira aquatubular. (BEGA, 2003)

Nas caldeiras aquatubulares, as características mais importantes a serem observadas são: pressão de vapor e nível de tubulação superior.

Na figura a seguir, pode-se notar que a água é vaporizada nos tubos que constituem a parede mais interna, subindo ao tambor de vapor, dando lugar a nova quantidade de água fria que será vaporizada e assim sucessivamente.

Figura 1: Esquema de Caldeira Aquatubular

Esquema de Caldeira Aquatu



(Fonte: Adaptado de BEGA, 2003)

Conforme mostrado na figura acima, o aquecimento dos tubos de água é feito com o calor gerado pela combustão no queimador, este localizado do lado de fora dos tubos.

Nas caldeiras, geralmente, encontramos os seguintes componentes:

Câmara de

Combustão Tubos

Tubulão

Superaquecedor

Sopraadores de Fuligem

Pré-aquecedor de Ar

Economizador

Alvenaria (refratários)

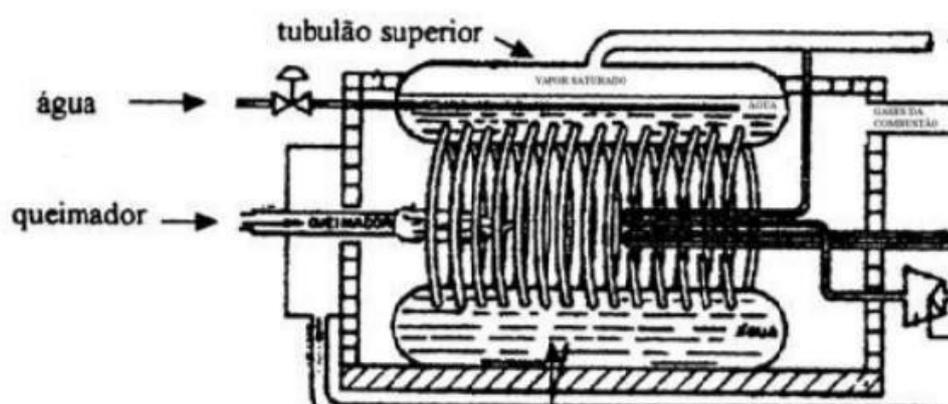
Queimadoras

Ventiladores

Chaminé

Válvulas de Segurança

Figura 2: Caldeira Típica .



(Fonte: Adaptada Mendes Juanico, 1995)

Segundo Mendes Juanico (1995) A câmara de combustão é a região onde se dá a queima do combustível, com produção dos gases de combustão que fornecem calor à água.

Os tubos servem para a circulação de vapor e água dentro da caldeira, a fim de permitir a troca de calor entre os gases quentes de combustão e a água ou vapor.

Os coletores são peças cilíndricas, às quais chegam e saem conjuntos de tubos, cuja finalidade, como o próprio nome indica, é coletar água ou vapor. O tubulão é um tambor horizontal, situado no ponto mais alto do corpo principal da caldeira, ao qual se acham conectados, através de tubos, os coletores, se encontram em níveis diferentes dentro da caldeira. (MENDES JUANICO, 1995).

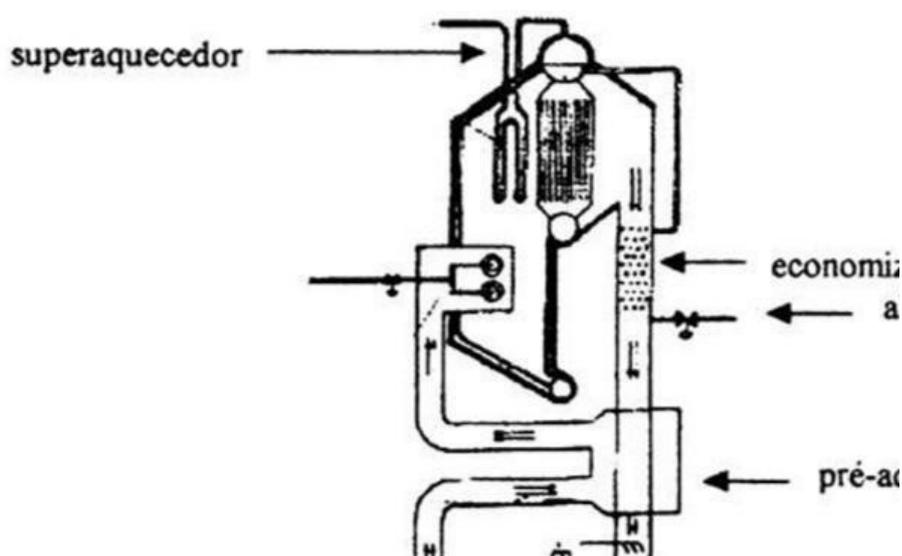
A água circula várias vezes através do conjunto tubulão-coletores descendo pelos tubos externos e retornando pelos internos. Essa circulação natural é provocada pela diferença de pressão exercida pelas colunas líquidas e pelas correntes de convecção formadas. A coluna externa contendo somente água é mais pesada do que a coluna interna contendo água + vapor, promovendo então a circulação.

A parte vaporizada vai se armazenando no tubulão, enquanto o líquido volta a circular. Além de acumular o vapor, o tubulão recebe também a água de alimentação, que vem do economizador.

O espaço acima do nível d'água no tubulão chama-se espaço de vapor. Para evitar o arraste de gotículas de líquido junto ao vapor, no espaço de vapor existem chicanas com a finalidade de separar o líquido arrastado.

O vapor saturado separado no tubulão passa a outro conjunto de serpentinas, o superaquecedor, onde é obtido o seu superaquecimento.

Figura 3: Superaquecedor.



(Fonte: Adaptada Mendes Juanico, 1995)

De acordo com Óscar Mota (1999). As serpentinas do superaquecedor têm suas extremidades ligadas a dois coletores o grau de superaquecimento para o qual as caldeiras são projetadas de vapor. O superaquecedor pode situar-se na zona de radiação ou convecção.

O pré-aquecedor de ar é utilizado para aproveitar parte do calor dos gases residuais de combustão e aquecer o ar de alimentação das chamas. No economizador, a água de alimentação passa por uma serpentina ou feixe tubular, a fim de aproveitar também o calor dos gases residuais da combustão, para depois ir, então, ao tubulão já pré-aquecido, o que representa uma economia de energia.

As paredes da caldeira são revestidas internamente de tijolos refratários, resistentes a altas temperaturas, que protegem as partes metálicas estruturais da caldeira contra deterioração por alta temperatura e produzem homogeneização da temperatura por reflexão do calor das chamas. Os maçaricos das caldeiras são semelhantes aos dos fornos. (ÓSCAR MOTA, 1999).

Os sopradores de fuligem são tubos providos de orifícios, inseridos transversalmente aos tubos das serpentinas, em diversos locais da caldeira. São ligados, externamente à caldeira, ao

sistema de vapor.

Durante a operação da caldeira, há deposição de fuligem nos tubos, o que dificulta a transferência de calor. De tempos em tempos, então, é injetado vapor através deste sistema com a finalidade de remover a fuligem. Para melhorar a atuação dos mesmos, os sopradores geralmente têm movimento de rotação, atuando assim em maior área.

Segundo Mendes Juanico (1999) Os ventiladores têm a finalidade de movimentar o ar de combustão até os queimadores na câmara de combustão e os gases da câmara de combustão até a chaminé.

Existem dois tipos funcionais de ventiladores: de tiragem forçada, que apanha o ar atmosférico e o envia através dos dutos da caldeira para os queimadores e o de tiragem induzida, instalado na saída da caldeira, que succiona os gases de combustão de dentro da câmara e os conduz à chaminé. A chaminé é a parte que conduz os gases de combustão à atmosfera (em altura suficientemente grande para que não venham a ser danosos ao meio ambiente). (JORGE MARTINS, 2005).

As válvulas de segurança são válvulas especiais, instaladas no tubulão, cuja finalidade é dar saída ao vapor no caso deste atingir uma pressão superior a um máximo admitido pelas condições de segurança operacional.

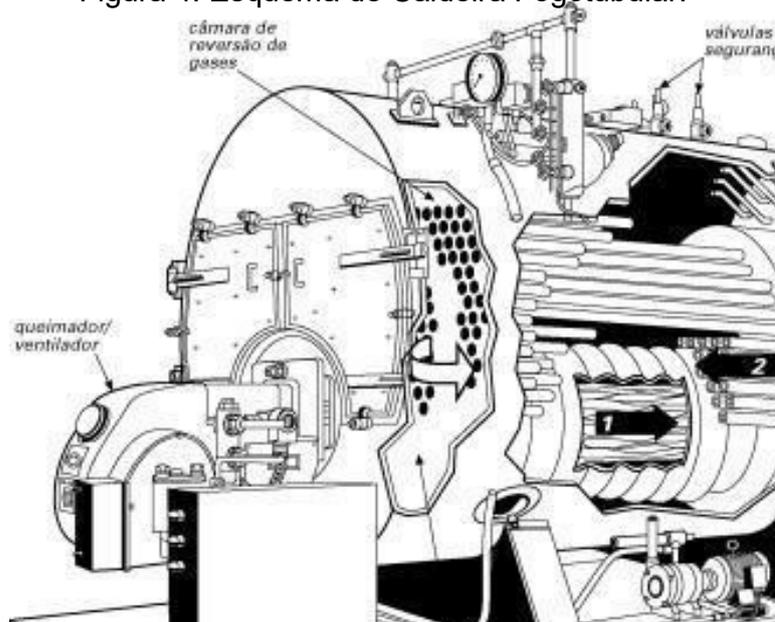
2.2.2 Fogotubular

As caldeiras fogotubulares são aquelas em que os gases provenientes da combustão (gases quentes) circulam no interior dos tubos e a água a ser aquecida ou vaporizada circula pelo lado de fora. Este tipo de caldeira é o de construção mais simples, e pode ser classificado quanto à distribuição dos tubos, que podem ser tubos verticais ou horizontais. (JORGE MARTINS, 2005).

Embora as caldeiras fogotubulares sejam simples, suas aplicações são restritas, pois necessita de pequenas e medias vazões de vapor e somente vapor saturado. Apesar das limitações esse tipo de caldeira é bastante utilizado.

A figura abaixo representa uma caldeira fogotubular típica.

Figura 4: Esquema de Caldeira Fogotubular.



(Fonte: Adaptado de BEGA, 2003)

Segundo Bega (2003). As caldeiras fogotubulares apresentam as seguintes partes principais: corpo, espelhos, feixe tubular ou tubos de fogo e caixa de fumaça.

O Corpo da Caldeira também chamado de casco ou carcaça, é construído a partir de chapas de aço carbono calandradas e soldadas. Seu diâmetro e comprimento estão relacionados à capacidade de produção de vapor. As pressões de trabalho são limitadas pelo diâmetro do corpo destas caldeiras.

Os Espelhos são chapas planas cortadas em forma circular, de modo que encaixem nas duas extremidades do corpo da caldeira e são fixadas através de soldagem. Sofrem um processo de furação, por onde os tubos de fumaça deverão passar. Os tubos são fixados por meio de soldagem.

O Feixe Tubular ou tubos de fogo, é composto de tubos que são responsáveis pela absorção do calor contido nos gases de exaustão usados para o aquecimento da água. Ligam o espelho frontal com o posterior, podendo ser de um dois ou três passes.

A Caixa de Fumaça é o local por onde os gases da combustão fazem a reversão do seu trajeto, passando novamente pelo interior da caldeira (pelos tubos de fogo).

2.2.2.1 Tipos de Caldeiras Fogotubulares

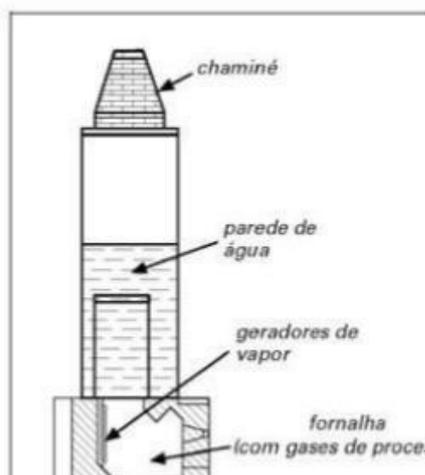
De acordo com Bega (2003) As caldeiras de tubos de fogo ou tubos de fumaça, fogotubulares, flamotubulares ou ainda gás-tubulares são aquelas em que os gases provenientes da combustão (gases quentes) circulam no interior dos tubos e a água a ser aquecida ou vaporizada

circula pelo lado de fora. Este tipo de caldeira é o de construção mais simples, e pode ser classificado quanto à distribuição dos tubos, que podem ser tubos verticais ou horizontais.

2.2.2.1.1 Caldeiras de Tubos Verticais:

Nas caldeiras de tubos verticais, os tubos são colocados verticalmente num corpo cilíndrico fechado nas extremidades por placas, chamadas espelhos. A fornalha interna fica no corpo cilíndrico logo abaixo do espelho inferior. Os gases de combustão sobem através dos tubos, aquecendo e vaporizando a água que está em volta deles. As fornalhas externas são utilizadas principalmente no aproveitamento da queima de combustíveis de baixo poder calorífico, tais como: serragem, palha, casca de café.

Figura 5: Caldeira Flamotubular Vertical

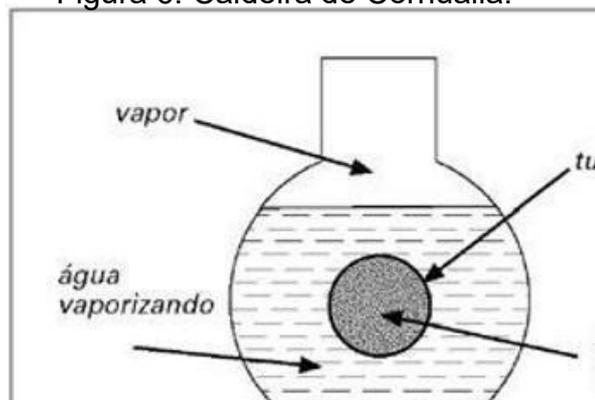


(Fonte: Adaptado de Mota, 1999)

2.2.2.1.2 Caldeiras de Cornuália:

A caldeira Cornuália, um dos primeiros modelos desenvolvidos, é constituída de um tubulão horizontal ligando a fornalha ao local de saída de gases. É de funcionamento simples, porém de rendimento muito baixo. Suas principais características são: pressão máxima de operação de 10 kgf/cm^2 , vaporização específica 12 a $14 \text{ kg de vapor/m}^2$ e máximo de 100m^2 de superfície.

Figura 6: Caldeira de Cornuália.

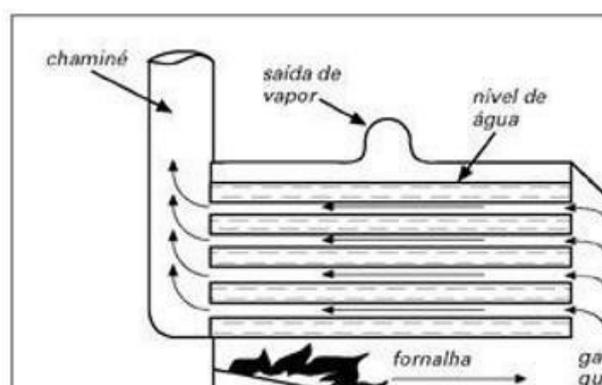


(Fonte: Adaptado de Mota, 1999)

2.2.2.1.3 Caldeiras Multitubulares de Fornalha Externa:

Em algumas caldeiras deste tipo, a fornalha é constituída pela própria alvenaria, situada abaixo do corpo cilíndrico. Os gases quentes provindos da combustão entram inicialmente em contato com a base inferior do cilindro, retornando pelos tubos de fogo. Na caldeira multitubular, a queima de combustível é efetuada em uma fornalha externa, geralmente construída em alvenaria instalada abaixo do corpo cilíndrico. Os gases quentes passam pelos tubos de fogo, e podem ser de um ou dois passes. A maior vantagem é poder queimar qualquer tipo de combustível.

Figura 7: Caldeira Multitubular.



(Fonte: Adaptado de Mota, 1999)

2.3 EQUIPAMENTOS ESSENCIAIS DAS CALDEIRAS

De acordo com Bega (2003). Estes equipamentos possuem uma vital importância no processo de recuperação, são eles que efetuam troca de calor e que realizam o controle de partículas, são chamados de superaquecedores, economizadores e precipitadores eletrostáticos.

2.3.1 Superaquecedores

No interior dos tambores das cadeiras o vapor formado permanece em equilíbrio com a fase líquida à temperatura de vaporização constituindo o chamado vapor saturado. Este vapor é extraído da caldeira, geralmente úmido, contendo 0,1 a 5% de água arrastada, dependendo da eficiência de separação dos dispositivos internos do tambor. Se a este vapor adiciona-se mais calor, mantendo-o à mesma pressão, elevamos a sua temperatura acima da temperatura de vaporização, tornando-o superaquecido.

2.3.2 Economizadores

Economizadores são aparelhos destinados a elevar a temperatura da água de alimentação, antes de introduzi-las no interior da caldeira, aproveitando o calor sensível ainda disponível nos gases de combustão, após sua passagem pelas últimas partes da própria caldeira.

2.3.3 Precipitadores Eletrostáticos

A precipitação eletrostática de partículas ocorre através de um eletrodo de descarga carregado negativamente, situado perto de outro positivo ligado a terra, chamado eletrodo coletor, de forma esférica ou de placa plana.

2.4 CONCEITOS DE TERMODINÂMICA

Da termodinâmica, ciência que estuda o calor e os processos que o envolvem, podemos estabelecer as seguintes definições, segundo Neto (1996):

Calor: É uma forma de energia térmica em trânsito, ou seja, está sempre se transferindo de um corpo com maior temperatura para um corpo de menor temperatura. O calor não pode ser armazenado; o que pode ser feito é apenas facilitar ou dificultar sua transferência.

Temperatura: É uma medida da energia cinética, isto é, da vibração das moléculas que compõem um certo corpo. Quanto maior é a vibração das moléculas, maior será a temperatura do corpo em questão. É justamente a diferença de temperatura entre dois corpos que promove a transferência de calor.

Ainda na definição, de acordo com Kern (1987):

Condução: É um método no qual o calor flui pelo contato direto, molécula a molécula, do corpo. Ocorre normalmente em corpos sólidos. Nas caldeiras, a condução ocorre no metal dos tubos e dispositivos de troca térmica, onde o calor flui da face de maior temperatura

(em contato com os gases quentes ou fornalha) para a de menor temperatura (por onde circula a água).

Vapor: é a água no estado gasoso, esta mudança de estado é proporcionada pelo efeito direto do calor e inverso da pressão. Ao fornecermos calor para a água, a mesma tem sua temperatura elevada até um certo limite e, a partir daí, começa a passar para a fase gasosa. Para que isto ocorra, as moléculas de água no líquido têm que vencer a força que a pressão exerce sobre elas, ou seja, quanto maior a pressão, mais força as moléculas tem que fazer. Esta energia é fornecida justamente pelo aquecimento e resulta no aumento da temperatura de vaporização do líquido. Quanto maior for a pressão, mais energia o vapor transportará pelas moléculas de água que o constitui. Ao se condensar, a mesma energia que as moléculas absorveram para passar para fase vapor é liberada para o meio, resultando aí na transferência de energia na forma de calor.

Segundo explica Bega (2003), existem basicamente dois tipos de vapor, sendo eles:

Vapor saturado: É um vapor “úmido”, contendo pequenas gotículas de água, sendo obtido da vaporização direta da mesma. Quando este tipo de vapor se condensa, cede calor latente. É usado para aquecimento direto ou indireto.

Vapor superaquecido: É obtido através do aquecimento conveniente do vapor saturado, resultando em um vapor seco. É usado para transferência de energia cinética, ou seja, para geração de trabalho mecânico (turbinas).

3 ESTUDO DA VIABILIDADE E ANALISE DOS EQUIPAMENTOS

A proposta do projeto é aproveitar o calor dos gases de exaustão de um forno industrial utilizando uma caldeira de recuperação que produzirá vapor por troca térmica para ser utilizado em uma câmara de fermentação. Este processo de geração de vapor visa a substituição pelo processo de geração de vapor já utilizado atualmente na indústria em questão, espera-se que a partir do momento que essa tecnologia possa ser difundida e eficientemente utilizada, que fique evidente a economia dos custos de operação, possibilitando produtos ou serviços mais competitivos. Ao final do estudo proposto pretende-se alcançar um resultado satisfatório para que o projeto de reaproveitamento de uma energia já existente nas chaminés da câmara de combustão do forno, possa reduzir as despesas de energia elétrica e mão de obra.

3.1 EQUIPAMENTOS DA FÁBRICA X

3.1.1 Forno e Queimador Industrial

Figura 8: Queimador e Chaminé.



(Fonte: Autor, 2017)

A figura 8 é a de um queimador industrial Weishaupt modelo G3/1-E, que funciona através da queima do gás GLP gerando calor para a realização do processo industrial de panificação. A mesma figura mostra a chaminé do forno, onde são descartados os resíduos de calor, e onde se pretende realizar implantação de uma caldeira de recuperação.

Na figura 9 está sendo demonstrado a realização da medição dos resíduos de calor liberados pela chaminé do forno, a temperatura registrada foi de 205 graus celsius. O calor residual dos gases de exaustão deste processo que se pretende reaproveitar como combustível para o funcionamento da caldeira de recuperação.

Figura 9: Medição da Temperatura na Chaminé.



(Fonte: Autor, 2017)

3.1.2 Câmara de Fermentação

Na figura 10 pode se observar a câmara de fermentação onde é realizado o processo de descanso de toda produção de pães, na câmara os produtos ficam armazenados durante o processo de fermentação tornando-a um dos pontos mais importante da panificação. Com a câmara, é possível controlar o tempo planejado para fermentação que pode ser tanto acelerado, retardado ou paralisado mediante as necessidades exigidas no preparo das massas. A câmara de fermentação possui uma área total de 42 m^2 . No método atual esta câmara consome uma média de 24 kw/hora com a geração de vapor suficiente para o trabalho, a instalação possui um total 24 resistores de 1 kw cada. A câmara funciona em um regime intermitentemente durante 5 dias na semana (segunda-sexta), e funciona por meio período nos finais de semana(sábado e domingo).

Figura 10: Câmara de Fermentação



(Fonte: Autor, 2017)

A figura 11 demonstra o interior da câmara de fermentação, nela é possível observar três painéis de geração de vapor que suprem atualmente a câmara e um reservatório (lado esquerdo da figura) que fornece água aos painéis.

já a parte externa da câmara de fermentação representada na figura 12 é possível observar também a parte externa dos geradores de vapor onde é controlada a entrada da água por boia de nível, os painéis por sua vez também ficam instalados na parte externa de modo a facilitar a manutenção. O problema identificado neste método atual de geração de vapor, além do alto consumo de energia, é a necessidade de uma manutenção constante.

Figura 11: Câmara de Fermentação – Interior.



(Fonte: Autor, 2017)

Figura 12: Câmara de Fermentação - Exterior



(Fonte: Autor, 2017)

Geradores de Vapor Os geradores de vapor utilizados na fábrica em questão são feitos por resistência submersa, a água usada para este fim tem uma dureza grande devido a minerais como cálcio e magnésio, este fator é potencialmente danoso nos processos industriais pois faz com que os resistores se calcifiquem impossibilitando a troca de calor e se queimem com facilidade. Ainda segundo Ruediger (2012), o combustível, que neste caso é a caso a energia elétrica, representa cerca de 80% do total do custo da geração de vapor. Na figura 13 está representado um dos geradores de vapor utilizado na câmara de fermentação, enquanto a figura 14 demonstra o exemplo de um resistor danificado.

Figura 13: Gerador de Vapor.



(Fonte: Autor, 2017)

Figura 14: Resistor Danificado do Gerador



(Fonte: Autor, 2017)

3.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE ENERGÉTICA

3.2.1 Consumo de energia da Câmara de fermentação

A análise do consumo gerado pela câmara de fermentação é um passo importante para o estudo de implantação do sistema.

Considerando os fatores já anteriormente abordados sobre o funcionamento da câmara pode-se calcular o consumo mensal de energia através dos seguintes cálculos.

Dados:

24 resistores de 1 kW - 24 kW total.

Funcionamento durante 5 dias (dias da semana) por 24 horas/cada - 22

dias/mês Funcionamento durante 2 dias (sábado e domingo) por 12

horas/cada - 8 dias/mês Valor kWh Horário Fora de Ponta (HFP) - R\$ 0,20

Valor kWh Horário de Ponta (HP) - R\$ 1,12 (17h às 20h)

Dias da Semana:

Consumo de energia horário fora de ponta (HFP):

21h por dia x 24 kW x 22 dias no mês = 11.088 kWh/mês x 0,20 = R\$

2.216,00 reais/mês. Consumo de energia horário de ponta (HP):

03h por dia x 24 kW x 22 dias no mês = 1.584 kWh/mês x 1,12 = R\$ 1.774,08 reais/mês.

Gasto mensal da câmara de fermentação (Dias da Semana): (HFP) 2.216,00 + (HP) 1.774,08 = R\$ 3.990,08 reais/mês

Finais de Semana (HFP):

$(12\text{h sábado} + 12\text{h domingo}) \times 24\text{ kW} \times 8\text{ dias no mês} = \text{R\$ } 4.608\text{ kWh/mês} \times 0,20 = \text{R\$ } 921,6\text{ reais/mês}$

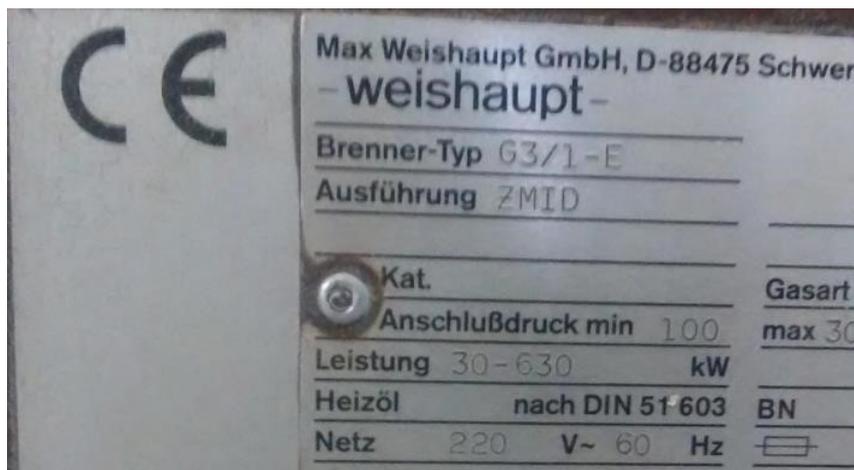
Consumo Total de Energia da Câmara de Fermentação: $3.990,08 + 921,6 = \text{R\$ } 4.911,68\text{ reais/mês}$

3.3 ANÁLISE DO QUEIMADOR DO FORNO

De acordo com a figura 15, pode-se analisar os dados do queimador utilizado na fábrica e obter as informações necessárias para justificar a viabilidade e a funcionalidade da caldeira.

Os dados principais descritos na placa do queimador, são: Tensão e frequência da rede de alimentação - 220v 60 Hz; e Potência do queimador de 30-630 kW.

Figura 15: Dados Técnicos do Queimador.



(Fonte: Autor, 2017)

3.3.1 Conversão de Dados e Cálculo de Geração

De acordo Ruediger (2012), a energia para gerar 1 kg de vapor saturado à pressão de 10 barg é de 664 kcal/kg, e considerando a energia contida no condensado de 80 kcal/kg, tem-se como valor final 584 kCal/kg.

Utilizando a potência do queimador como a fonte dos gases residuais da chaminé e considerando o queimador trabalhando com metade da sua potencia máxima e desprezando as perdas, tem-se:

$$315\text{ kW} \times 860\text{ kCal} = 270.900\text{ kCal}$$

$$270.900\text{ kCal} \div 584\text{ kCal/kg} = 463,86\text{ kg de vapor por hora.}$$

O valor de vapor encontrado de 463,86 kg/h poderá durante um dia de trabalho gerar 11,14 Ton/h, mesmo considerando uma perda de 50% deste valor durante todo o processo ainda assim seria suficiente para suprir a câmara de fermentação.

3.4 ANÁLISE DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO

A caldeira que melhor atende o projeto é a caldeira fogotubular em razão do seu baixo valor de investimento se comparado com as caldeiras aquatubulares, e da sua facilidade de manutenção. Além disso, a caldeira fogotubular possui bom rendimento quando utilizada para pressões reduzidas, porém, suficientes para a geração de vapor saturado para a câmara.

3.4.1 Orçamento da Caldeira

Dentre as empresas especializadas em comércio de caldeiras de recuperação foram cotados preços e modelos que atendessem a capacidade de geração de vapor estipulada, a caldeira fogotubular série VMB (fig.16 e 17) da Tec Tecnologia em Calor Ltda foi escolhida para o projeto. A caldeira com capacidade para 500 kg/h de vapor foi estimada no valor de R\$ 98.900,00, tendo os dados técnicos disponíveis na figura 18.

Figura 16: Caldeira Fogotubular série VMB.



(Fonte: Tec Tecnologia em Calor Ltda, 2017)

Figura 17: Esquema da Caldeira Fogotubular série VMB.



(Fonte: Tec Tecnologia em Calor Ltda, 2017)

Figura 18: Tabela Dados Técnicos

| TEC - VMB | | | 50 | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 |
|--------------------------------|---------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Evaporação (água a 20° C) | | | 50 | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 |
| Capacidade térmica (Kcal/h) | | | 32000 | 64000 | 96000 | 128000 | 192000 | 256000 |
| Consumo de combustível | Oléo diesel (L/h) | PCI 8.620 Kcal/l | 4,30 | 8,70 | 13,20 | 17,40 | 26,20 | 34,40 |
| | GLP (Kg/h) | PCI 11.000 Kcal/kg | 3,40 | 6,80 | 10,20 | 13,60 | 20,50 | 27,20 |
| | Gás natural (Nm³/h) | PCI 9.017 N/m³ | 4,10 | 8,30 | 12,50 | 16,70 | 25,00 | 33,60 |
| Dimensões (mm) | A | | 1600 | 1750 | 1900 | 2200 | 2400 | 2600 |
| | B | | 825 | 925 | 1025 | 1025 | 1125 | 1225 |
| | C | | 1600 | 1700 | 1800 | 2050 | 2150 | 2250 |
| | D | | 1350 | 1500 | 1650 | 1850 | 2050 | 2250 |
| | E | | 1900 | 2050 | 2200 | 2550 | 2750 | 2950 |
| Superfície de aquecimento (m²) | | | 2,1 | 4,1 | 6,3 | 8,2 | 12,5 | 16,8 |
| Peso cheio (Kg) | | | 1230,20 | 1641,24 | 2067,03 | 2254,98 | 2942,60 | 4230,40 |

(Fonte: Tec Tecnologia em Calor Ltda, 2017)

Segundo a Tec Tecnologia em Calor Ltda (2017), a caldeira fogotubular série VMB possui aplicação em indústrias alimentícias, têxteis, químicas, farmacêuticas, de papel/impressão, de cimento, de petróleo, de madeira, hospitais, hotéis, entre outros.

Capacidades: modelos disponíveis de 50 kg/h a 500 kg/h.

Vantagens:

Modelo vertical otimiza espaço.

Câmara de reversão refrigerada a água com tampa de inspeção integral.

Fácil acesso aos tubos, à fornalha e à câmara de reversão, facilitando a manutenção.

Segurança:

Painel de comando sinaliza possíveis falhas no

sistema Identificação de alta pressão de vapor

Identificação de baixa temperatura de óleo (quando utilizado como combustível).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DE PAYBACK FINANCEIRO

A partir o investimento de R\$ 98.900,00 para adquirir a caldeira de recuperação, foi calculado o payback financeiro projetado para 25 anos, tendo em vista os custos com a geração atual já anteriormente calculados e considerando um reajuste anual da tarifa de energia de 7,5% a.a.. Neste caso ainda foram desconsiderados as despesas de manutenção e operação de ambos os métodos de geração, tanto o atual, quanto o projetado neste trabalho.

O software utilizado para o cálculo e análise do payback foi o PV*SOL da Valentin Software GmbH. Na figura 19 foi possível observar que o investimento se amortiza em 2 anos e 2 meses, economizando no final de 25 anos um valor estimado de R\$ 2.659.283,97.

Figura 19: Cálculo de Retorno Financeiro

| | Ano 1 | Ano 2 | Ano 3 | Ano 4 |
|-----------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Investimentos | -R\$ 98.900,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| Economia de energia | R\$ 43.706,63 | R\$ 46.519,43 | R\$ 49.513,26 | R\$ 52.694,09 |
| Fluxo de caixa anual | -R\$ 55.193,37 | R\$ 46.519,43 | R\$ 49.513,26 | R\$ 52.694,09 |
| Fluxo de caixa acumulado | -R\$ 55.193,37 | -R\$ 8.673,94 | R\$ 40.839,32 | R\$ 93.533,41 |

| | Ano 6 | Ano 7 | Ano 8 | Ano 9 |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Investimentos | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| Economia de energia | R\$ 59.701,14 | R\$ 63.543,33 | R\$ 67.632,73 | R\$ 71.984,13 |
| Fluxo de caixa anual | R\$ 59.701,14 | R\$ 63.543,33 | R\$ 67.632,73 | R\$ 71.984,13 |
| Fluxo de caixa acumulado | R\$ 209.331,53 | R\$ 272.874,86 | R\$ 340.507,59 | R\$ 412.491,72 |

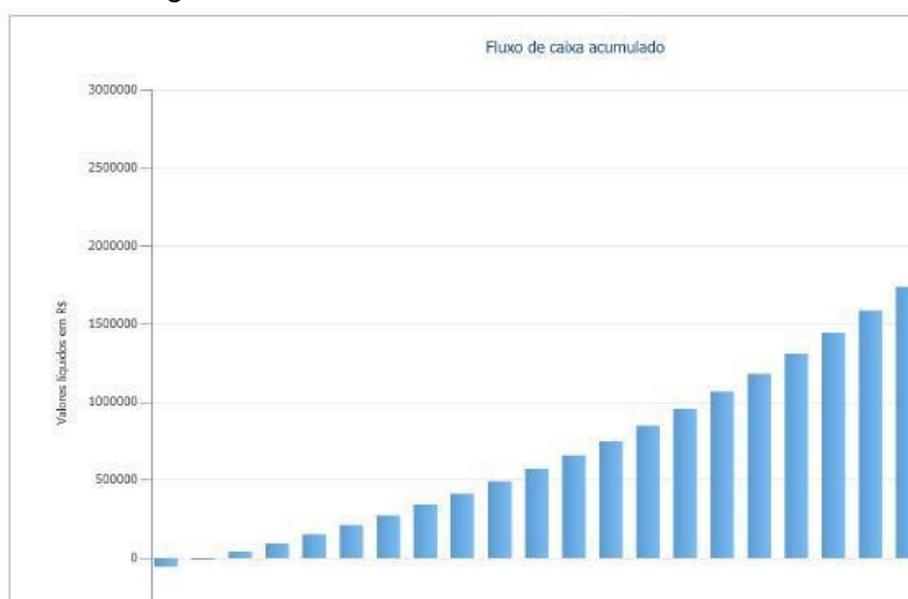
| | Ano 11 | Ano 12 | Ano 13 | Ano 14 |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Investimentos | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| Economia de energia | R\$ 81.548,94 | R\$ 86.797,12 | R\$ 92.383,09 | R\$ 98.324,49 |
| Fluxo de caixa anual | R\$ 81.548,94 | R\$ 86.797,12 | R\$ 92.383,09 | R\$ 98.324,49 |
| Fluxo de caixa acumulado | R\$ 570.659,94 | R\$ 657.457,06 | R\$ 749.840,14 | R\$ 848.164,63 |

| | Ano 16 | Ano 17 | Ano 18 | Ano 19 |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Investimentos | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| Economia de energia | R\$ 111.391,90 | R\$ 118.560,69 | R\$ 126.190,86 | R\$ 134.311,25 |
| Fluxo de caixa anual | R\$ 111.391,90 | R\$ 118.560,69 | R\$ 126.190,86 | R\$ 134.311,25 |
| Fluxo de caixa acumulado | R\$ 1.064.217,14 | R\$ 1.182.777,83 | R\$ 1.308.968,69 | R\$ 1.443.280,14 |

| | Ano 21 | Ano 22 | Ano 23 | Ano 24 |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Investimentos | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| Economia de energia | R\$ 152.156,01 | R\$ 161.948,23 | R\$ 172.370,64 | R\$ 183.464,03 |
| Fluxo de caixa anual | R\$ 152.156,01 | R\$ 161.948,23 | R\$ 172.370,64 | R\$ 183.464,03 |
| Fluxo de caixa acumulado | R\$ 2.196.473,58 | R\$ 2.358.421,81 | R\$ 2.530.792,45 | R\$ 2.714.256,48 |

(Fonte: Autor, 2017)

Figura 20: Gráfico de Retorno Financeiro.



(Fonte: Autor, 2017)

O gráfico da figura 20 mostra os resultados que poderão ser adquiridos com a implantação da caldeira de recuperação ao longo dos anos.

4.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A CALDEIRA

É fundamental para a viabilidade do projeto ao longo do tempo, que se tome precauções quanto a manutenção e operação da caldeira.

No que diz respeito a água utilizada atualmente na fábrica, por ser "dura", ao se tratar de geradores de vapor e caldeiras industriais principalmente não é a recomendada. A água a ser utilizada é a água "mole" uma vez que cálcio e magnésio, se ficarem grudados nas tubulações, causam incrustações causando problemas como diminuição de eficiência na evaporação, aumento da temperatura, possibilidade do rompimento do tubo e, eventualmente, até mesmo levar à explosão.

O que se espera para um correto funcionamento do projeto da caldeira de recuperação, é também a utilização de tecnologias para identificar e tratar a dureza da água utilizada neste processo.

5 CONCLUSÃO

Confirma-se através do presente estudo que os objetivos propostos foram alcançados, e que a implantação da caldeira de recuperação é viável e mostra um retorno em curto prazo.

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo sobre o desenvolvimento da viabilidade da implantação de uma caldeira de recuperação que, segundo os autores pesquisados, têm um grande potencial para ser referência no processo de implementação de caldeira. Conforme os objetivos estabelecidos, conclui-se que o trabalho possibilitou o desenvolvimento de uma proposta positiva e econômica, trazendo como resultado um bom custo/benefício tanto operacional, quanto de manutenção, diante do processo de geração elétrico atual.

Através da análise técnica e dos métodos apresentados foi possível obter um resultado satisfatório para o projeto, e concluir que a caldeira de recuperação de fato é uma proposta eficiente para a redução dos custos com energia elétrica na câmara de fermentação. Ou seja, os resultados encontrados neste estudo demonstram a importância de se considerar a implantação de caldeiras de recuperação nas industriais e dos seus benefícios em relação a alguns processos desnecessariamente dispendiosos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ag Solve Monitoramento Ambiental. Água dura e seus riscos. Publicado em 08/08/2012. Disponível em: <www.agsolve.com.br/noticias/agua-dura-e-seus-riscos>. Acesso em 02 de Novembro de 2017

BALESTIERI, J.A.P. Planejamento de centrais de cogeração: uma abordagem multi objetiva. Campinas, 1994. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- UNICAMP, 1994.

BEGA, Egidio Alberto. Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeira. 3.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

KERN, D.Q. Processos de transmissão de calor. Rio de Janeiro: Guanabara. koogan, 1987.

MARTINELLI, Luiz Carlos Jr. Geradores de Vapor. Ijuí, 2003.

MARTINS, Jorge. Motores de Combustão Interna. Publindústria, 2005.

MENDES, Juanico. Geradores de Vapor, 1995.

MOTA, Óscar. Apontamentos de Maquinas Térmicas, 1999.

NETO, F. T.; TURCIO, W. H. L. Caldeira de Recuperação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Depto. De Engenharia Mecânica. São Paulo, 1996.

PERA, Hildo. Geradores de vapor: um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia. 2.ed. ampl São Paulo: Fama, 1990.

RUEDIGER, Rodrigo. Uso racional do vapor na indústria. Bermo Condução e Controle de flúidos. Disponível em: <fiesc.com.br/sites/default/files/medias/energiaberme.pdf>. Acesso em 02 de Novembro de 2017

SOSA, I. R. H. Sistema Multi Agente para Controle Inteligente da Caldeira de Recuperação. Tese de Mestrado da Universidade de São Paulo, 2007.

Tec Tecnologia em Calor Ltda. Disponível em: <www.teccalor.com.br>. Acesso em 03 de novembro de 2017.