



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO AMAZONAS - IFAM
PRÓ-REITORIA DE ENSINO
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA



MARCELO DA COSTA FREITAS

**ANÁLISE DO RENDIMENTO DE UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR
SEM O REAPROVEITAMENTO DE RETORNO DE CONDENSADO
ATRAVES DE UM PRÉ AQUECEDOR DE ÁGUA**

MANAUS
2019

MARCELO DA COSTA FREITAS

**ANÁLISE DO RENDIMENTO DE UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR
SEM O REAPROVEITAMENTO DE RETORNO DE CONDENSADO
ATRAVES DE UM PRÉ AQUECEDOR DE ÁGUA**

Monografia apresentada ao Instituto Federal de Educação e Tecnologia do Amazonas – IFAM, como requisito parcial para conclusão do curso de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. MSc. Carlos Machado Baptista Filho.

**MANAUS
2019**

Biblioteca do IFAM- Campus Manaus Centro

F866a Freitas, Marcelo da Costa.
Análise do rendimento de uma caldeira flamotubular sem o reaproveitamento de retorno de condensado através de um pré aquecedor de água / – Manaus, 2021.
37 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus Manaus Centro*, 2021.

Orientador: Prof. Me. Carlos Machado Baptista Filho.

1. Engenharia mecânica. 2. Gás natural. 3. Caldeira. I. Baptista Filho, Carlos Machado. (Orient.) II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas III. Título.

CDD 621

Elaborada por Márcia Auzier CRB 11/597



ATA Nº 74 / 2021 - DPI/CMC (11.01.03.01.16.12)

Nº do Protocolo: 23443.007781/2021-92

Manaus-AM, 13 de Maio de 2021

ATA DE DEFESA PÚBLICA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao sexto dia do mês de dezembro de dois mil e dezenove, às 19:15 horas na Sala aula do Laboratório de Usinagem, o acadêmico **MARCELO DA COSTA FREITAS**, apresentou o seu Trabalho de Conclusão de Curso para avaliação da Banca Examinadora presidida pelo Prof. MSc. Carlos José Baptista Machado (orientador - IFAM), composta pelos demais examinadores: Prof. Esp. Plácido Ferreira Lima (Membro 1 - IFAM) e Prof. Esp. Antônio Aurélio Pereira dos Santos (Membro 2 - IFAM). A sessão pública de defesa foi aberta pelo Presidente da Banca, que fez e apresentou a mesma e deu continuidade aos trabalhos, fazendo uma breve referência ao TCC que tem como título: Análise do rendimento de uma caldeira flamotubular sem o reaproveitamento de retorno de condensado através de um pré - aquecedor de água. Na sequência, o acadêmico teve até 30 minutos para a comunicação oral de seu trabalho, e cada integrante da Banca Examinadora fez suas arguições após a defesa do mesmo. Ouvidas as explicações do acadêmico, a Banca Examinadora, reunida em caráter sigiloso, para proceder à avaliação final, deliberou e decidiu pela **Aprovação com média (9,8)** do referido trabalho.

Foi dada ciência ao acadêmico que a versão final do trabalho deverá ser entregue até o prazo máximo de 30 dias, com as devidas alterações sugeridas pela banca.

Nada mais a tratar, a sessão foi encerrada às (20h 30 min), sendo lavrada a presente ata, que, uma vez aprovada, foi assinada por todos os membros da Banca Examinadora e pelo acadêmico.

Banca Examinadora:

Prof. Orientador /Presidente: Prof. MSc. Carlos José Baptista Machado (**Óbito**) Declaração de Óbito nº 302556591 Livro: C-408, Folha: 19

Prof. Membro 1: Prof. Esp. Plácido Ferreira Lima

Prof. Membro 2: Prof. Esp. Antônio Aurélio Pereira dos Santos

Acadêmico: MARCELO DA COSTA FREITAS

(Assinado digitalmente em 14/05/2021 12:23)
ANTÔNIO AURELIO PEREIRA DOS SANTOS
PROFESSOR ENS BÁSICO TECN TECNOLÓGICO
Matricula: 1039113

(Assinado digitalmente em 13/05/2021 20:23)
PLACIDO FERREIRA LIMA
PROFESSOR ENS BÁSICO TECN TECNOLÓGICO
Matricula: 981395

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sig.ifam.edu.br/documentos/> informando seu número: 74, ano: 2021, tipo: ATA, data de emissão: 13/05/2021 e o código de verificação: 16d88a6466

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me deu a vida e permanece sempre presente em meu caminho, aos meus queridos pais, grandes educadores, que desde cedo mostraram o valor da vida e o compromisso de vivê-la de forma intensa, com rigor e a sabedoria de um peregrino que sempre está em busca de novos caminhos.

A minha esposa Viviane e meus filhos Henrique e Giovana que no decorrer da faculdade, me incentivaram e colaboraram pacientemente e souberam compreender o meu envolvimento na elaboração desse trabalho.

Ao professor e orientador Carlos Machado Baptista Filho, pelo apoio e encorajamento contínuos na pesquisa, aos demais mestres da casa, pelos conhecimentos transmitidos, e ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia – IFAM, pelo apoio institucional e pelas facilidades oferecidas.

“Jesus disse: Eu Sou a ressurreição e a vida; quem crê em mim, ainda que esteja morto, viverá e todo àquele que vive e crê em Mim, não morrerá “. (João 11.2

SUMÁRIO

1. Introdução.....	12
2. Referencial Teórico	14
2.1 Caldeiras.....	14
2.2 Caldeiras Flamotubulares.....	15
2.3 Economizadores	17
3. Metodologia	19
3.1 Descrevendo a Pesquisa de Campo.....	19
3.2 Descrição do gerador de vapor e do produto final.....	20
3.3 Sistema de segurança	23
3.4 Sistema de alimentação de água das Caldeiras.....	24
3.5 Sistema de distribuição de vapor	24
3.6 Análise para implementação do trocador de calor.....	25
3.7 Determinação térmica do pré aquecedor de água	27
3.8 Pré aquecimento de água para caldeiras	30
3.9 Instrumentação utilizada	31
4. Metodologia do Trabalho.....	32
4.1 Procedimentos Metodológicos.....	32
4.2 Apresentação e Discussão dos Resultados.....	33
Considerações Finais	35
Referências Bibliográficas.....	36

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise, dimensionamento e instalação de um trocador de calor em uma caldeira flamotubular de três passes que opera com gás natural. Os gases de saída da caldeira a 200°C foram aproveitados para pré-aquecer a água de alimentação da caldeira disponível a 30°C. O método adotado para o dimensionamento do trocador de calor foi o da efetividade Número de Unidades de Transferência (NUT). Após a instalação do trocador de calor, também denominado de economizador, a água de alimentação entra na caldeira a 75 °C. Este ganho de temperatura permitiu amenizar as interrupções na geração do vapor no momento em que a água de reposição entra na caldeira mantendo a pressão de trabalho do vapor mais estável e melhorando a condição da geração de vapor. Isso tornou o equipamento mais eficiente, reduzindo os custos de produção do produto de isopor. O emprego do economizador gerou uma economia mensal de 20% no consumo de gás natural, ou seja, em torno de 1620 Nm³ por mês.

Palavras-chave: Caldeira. Trocador de calor. Economizador. Eficiência.

ABSTRACT

This paper presents the analysis, sizing and installation of a heat exchanger in a three-pass flamtubular boiler that operates with natural gas. The boiler outlet gases at 200°C were used to preheat the available boiler feed water to 30°C. The method adopted for the heat exchanger sizing was the effectiveness Number of Transfer Units (NUT). After installation of the heat exchanger, also called economizer, the feed water enters the boiler at 75 ° C. This temperature gain has made it possible to soften steam generation interruptions as replacement water enters the boiler, keeping steam working pressure more stable and improving the condition of steam generation. This made the equipment more efficient, reducing the production costs of the Styrofoam product. The economist's employment generated a monthly savings of 20% in natural gas consumption, or around 1620 Nm³ per month.

Keywords: Boiler. Heat exchanger. Economizer. Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Passagem dos gases pelos tubos da caldeira	15
Figura 2 - Esquema de uma caldeira flamotubular, fornalha interna	15
Figura 3 - Mostra um economizador instalado em uma caldeira.....	17
Figura 4 - Caldeira Flamotubular Daeyeol	21
Figura 5 - Monitoramento da caldeira pelo CLP.....	22
Figura 6 - Tanque de armazenamento de água	24
Figura 7 - Local da instalação (Saída dos gases de combustão).....	25
Figura 8 - Trocador de Calor (Pre aquecedor de agua).....	26
Figura 9 - Mostra do desenho do trocador de calor	29
Figura 10-Mostra um pre aquecedor de agua instalado	31
Figura 11- Mostra grafico de consume antes da instalação do pré aquecedor.....	33
Figura 12 -Mostra grafico de consume após a instalação do pré aquecedor.....	33

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Mostrados os dados técnicos informados pelo fabricante da caldeira.....	21
--	----

1. INTRODUÇÃO

Devido a uma experiência de mais de dez anos na área da indústria principalmente no setor de utilidades, sempre tivemos interesse em ações direcionadas a um ganho de eficiência nas Caldeiras Flamotubulares sem o aproveitamento de condensado, visto que sem esse reaproveitamento a Caldeira tende a utilizar mais combustível em sua queima proporcionando menor eficiência em referência a uma Caldeira que utiliza o retorno de vapor condensado, o aumento da eficiência por métodos de pré aquecedores de água tende a suprir essa deficiência.

Considerando essa análise se formamos a Pergunta-problema que norteará essa pesquisa: como a análise do estudo dos pré aquecedores de água podem contribuir para o ganho de eficiência de Caldeiras Flamotubulares sem reaproveitamento de água de condensado.

Os sistemas de geração de vapor em sua grande maioria aproveitam o retorno de condensado, para alimentação em Caldeiras, pois devido a água de retorno possuir temperatura em torno de 70°C, facilita sua evaporação e conseqüentemente ganha eficiência tanto em manter a pressão constante quanto em usar pouco combustível para geração de vapor, porém diante de um sistema de geração de vapor, onde não se podia aproveitar a água de retorno de condensado, pelo fato da mesma esta contaminada em contato com a matéria prima do isopor.

Diante desse cenário, a água de alimentação entrava na Caldeira a temperatura ambiente de 30°C, que na grande maioria das vezes ocasiona quedas de pressão interna e alto consumo de combustível, em decorrência dessa situação se fez necessário a instalação de um pré-aquecedor de água utilizando o calor sensível dos gases da saída da combustão, pois com o aumento da temperatura da água na entrada da caldeira se verificara algum benefício ao processo e conseqüentemente obteremos vantagens, sobretudo no aumento de temperatura da água na entrada da caldeira, onde essa temperaturas próximas a de vaporização amenizara os efeitos, e o regime de pressão de trabalho tende a ser mais estável, sendo possível ter um aumento na eficiência do sistema.

Acreditando em suprir essa necessidade foi pensado que utilizando o calor sensível desperdiçado pela saída dos gases de combustão em um pré aquecedor de água, para aumento de temperatura na água de alimentação em caldeiras que não aproveitam retorno de condensado, podem contribuir para o ganho de rendimento, facilitando e aumentando uso

energético de forma eficiente, contribuindo integralmente para o ganho de eficiência com recursos que estão sendo desperdiçados.

Assim como objetivo geral para esse trabalho apresentamos: investigar a importância do pré aquecedor de água para ganho de eficiência de Caldeira Flamotubular que funcionam sem a utilização de retorno de condensado em sua água de alimentação.

Desse objetivo decorrem quatro outros específicos: a) Identificar fatores que podem contribuir para o ganho de eficiência em Caldeira Flamotubular que funcionam sem a utilização de retorno de condensado em sua água de alimentação; b) Avaliar o uso do pré aquecedor de água como um processo de ganho de eficiência na geração de vapor em Caldeiras Flamotubulares; c) Comparar como o pré aquecedor de água apresentam ou não o aumento de rendimento depois de serem instalados, contribuindo para aumento da temperatura da água e conseqüentemente facilitando sua evaporação em Caldeiras Flamotubulares; d) Apresentar os rendimentos do ganho de eficiência térmica em Caldeiras Flamotubulares com a instalação do pré aquecedor de água.

Com o intuito de alcançar os objetivos propostos, este TCC foi elaborado em quatro capítulos, sendo iniciado com uma Introdução, onde eu pude destacar uma abordagem inicial da minha pesquisa, procurando sempre enfatizar o lado científico da pesquisa.

No segundo capítulo o Referencial Teórico vem contribuir para um plano de sustentação argumentativo sobre o tema a ser abordado, dando embasamento e servindo como comparação em relação aos resultados a serem obtidos a partir do trabalho em desenvolvimento.

A Metodologia trouxe os tipos de pesquisa que eu utilizei, no qual de destacaram a bibliográfica, investigativa e comparativa, ainda nesse capítulo procurei descrever uma abordagem superficial do produto final, dando importância maior no gerador de vapor com os seus sistemas interligados para seu funcionamento, incluindo a análise para a instalação do pré aquecedor de água.

No último capítulo descrevo sobre a Metodologia do Trabalho, onde faço uma abordagem sobre os procedimentos metodológicos quanto as adaptações que foram feitas no gerador de vapor e as discussões dos resultados obtidos depois da implantação do pré aquecedor de água na saída dos gases de combustão de uma caldeira flamotubular.

2. REFERENCIAL TEÓRICO.

Neste capítulo apresentamos o referencial teórico no qual aborda os fenômenos físicos, mecânicos e de ganho de eficiência térmica em Caldeiras Flamotubulares.

2.1 CALDEIRAS.

As caldeiras de vapor são equipamentos construídos para utilizar a energia química liberada na queima do combustível promovendo assim a mudança do estado líquido da água para o estado vaporizado, no qual este se encontra a uma pressão maior que a pressão atmosférica. (Lora; Nascimento, 2004)

Em um conceito amplo podemos conceituar Caldeira ou Gerador de vapor como equipamentos que se destinam a gerar vapor através de uma troca térmica entre o combustível e a água, sendo que isto é feito por este equipamento construído com chapas e tubos, cuja finalidade é fazer com que água se aqueça e passe do estado líquido para o gasoso, aproveitando o calor liberado pelo combustível que faz com as partes metálicas da mesma se aqueça e transfira calor a água produzindo o vapor.

Leite e Militão (2008) descrevem que a caldeira ou gerador de vapor é um equipamento que se destina a gerar vapor através de uma troca térmica entre o combustível e a água, sendo que isto é feito por este equipamento construído com chapas e tubos cuja finalidade é fazer com que água se aqueça e passe do estado líquido para o gasoso, aproveitando o calor liberado pela queima de combustível que faz com que as partes metálicas se aqueçam e transfiram altos níveis de calor à água produzindo o vapor.

As usinas brasileiras e o álcool deram certo porque utilizam o próprio bagaço de cana para gerar energia da usina e hoje as usinas estão aproveitando este combustível que é a sobra da fabricação do açúcar e o álcool para gerar energia elétrica, sendo uns dos produtos comercializados pelas mesmas.

As caldeiras são classificadas em caldeiras flamotubulares ou fogotubular, aquatubular ou mista (Flamotubulares e aquatubulares), e as especificações, PMTP: Pressão Máxima de Trabalho Permitida e PMTA: Pressão Máxima de Trabalho Admissível, são fatores essenciais para se instalar e atender as necessidades de cada processo.

2.2 CALDEIRAS FLAMOTUBULARES.

As caldeiras Fumotubulares ou flamotubulares se caracterizam pela circulação interna dos gases de combustão, ou seja, os tubos conduzem os gases por todo o interior da caldeira. São construídas para operar com pressões limitadas, pois as partes internas submetidas á pressão são relativamente grandes, inviabilizando o emprego de chapas de maiores espessuras.

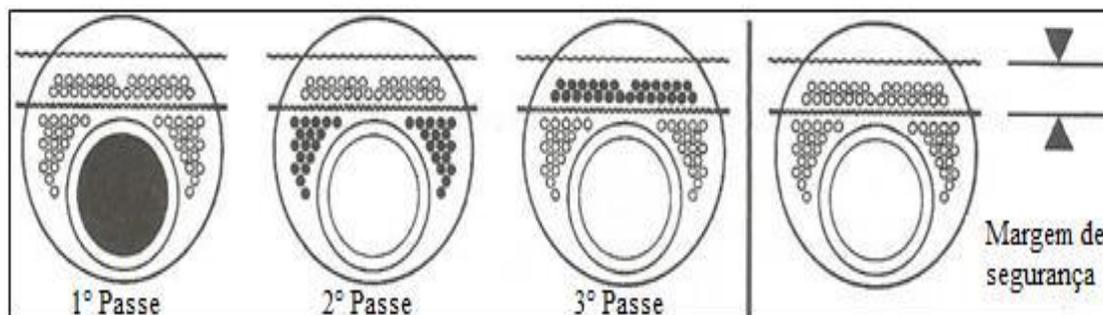
Conforme Bazzo (1995), as caldeiras flamotubulares são também conhecidas por fumotubulares e são construídas por inúmeros tubos montados entre dois espelhos formando um corpo cilíndrico, onde os gases quentes gerados pela queima do combustível passam pelo interior dos tubos ficando a superfície externa desses tubos envolvida pela água em ebulição.

Existem caldeiras fumotubulares verticais, porem, atualmente, as caldeiras horizontais são muito mais comuns, podendo ser fabricadas com fornalhas lisas e corrugadas, com 1,2 ou 3 passes, com traseira seca ou molhada. Nas caldeiras fumotubulares que operam com combustíveis líquidos ou gasosos, o queimador é instalado na parte frontal da fornalha, nessa predomina a troca de calor por radiação luminosa e nas partes posteriores da caldeira (caixas de reversão e tubos) a troca de calor se processa essencialmente por radiação gasosa e convecção.

A fornalha e os tubos ficam circundados de água e são ancorados nos espelhos (discos externos) por solda ou por mandrilagem. Os espelhos são ancorados por solda ao tubulão externo. Esses estão submetidos á pressão interna do vapor, e os tubos e fornalhas estão submetidos á pressão externa. As caldeiras fumotubulares, em razão de seu aspecto construtivo, são limitadas em produção e pressão, que em geral não ultrapassam valores de 15 ton/h de produção de vapor e 18 bar de pressão de trabalho.

Na figura1 é mostrado que os gases antes de chegarem a chaminé podem ter duas ou mais passagens pelo interior da caldeira, sendo a primeira no tubo único que é chamado de fornalha, onde deve ocorre a total combustão para não haver a reversão da chama e atingir diretamente os espelhos da caldeira , logo a troca de calor neste ponto se da por radiação, já nas demais passagens onde os tubos são de menor diâmetro a troca de calor se da por ação combinada de convecção e radiação gasosa.

Figura 1 – Passagem dos gases pelos tubos da caldeira

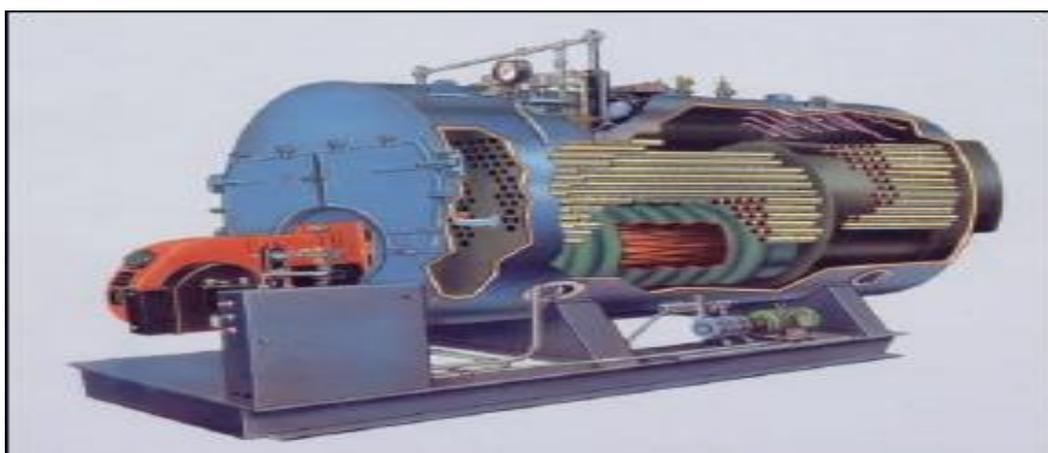


Fonte: Adaptado de Macintyre (1997)

Os tubos são montados entre os espelhos e unidos pelo sistema de mandrilagem ou solda e reforçados por estais, este conjunto é fixado ao corpo cilíndrico externo da caldeira através de solda formando então um grande vaso de pressão.

Ainda segundo Bazzo (1995), o maior o número de passagens pelos tubos permite melhor aproveitamento da energia disponível nos gases de combustão, sendo que o diâmetro das fornalhas pode variar de 400 a 1300 mm, já o diâmetro dos tubos menores que também são conhecidos por tubos de fogo varia de 30 a 100 mm conforme o projeto da caldeira, ficando com diâmetro máximo do corpo externo na faixa de 2800 mm.

Figura 2- Esquema de uma caldeira flamotubular, fornalha interna



Fonte: Martinelli, (1998).

Este tipo de caldeira geralmente fica limitado com pressões, vazões e temperaturas na faixa de 2,5 MPa , 30 ton/h de vapor e 350 oC, respectivamente. Devido a estes valores não serem muito altos se comparados com outros tipos de caldeira, não apresentam muitos problemas, desde que operados de forma correta e água bem tratada. Os problemas por

explosão neste tipo de caldeira era comum antigamente e quase todos devidos a falhas humanas de manutenção, operação e inspeção.

Entretanto, devido à legislação de segurança industrial que exigiu cada vez mais tecnologia de inspeção, manutenção, treinamento de operadores e dispositivos eletrônicos de segurança, os acidentes desta proporção foram diminuindo a cada ano, (BRAGA, 2009).

2.3 ECONOMIZADOR (Aquecedores de água).

O termo “economizador” surgiu desde o começo pela característica de reduzir o custo de operação ou economizar combustível através da recuperação extra da energia dos gases de combustão (SOSA ARNAO, 2007).

Os economizadores se destinam a aquecer a água de alimentação antes de ser introduzida no interior da caldeira, o pré aquecimento é feito através da troca de calor com os gases de combustão saindo da caldeira. O aproveitamento do calor sensível dos gases de combustão traz um aumento de eficiência térmica do equipamento.

A função do economizador é aproveitar a calor gerado pelos gases de combustão que acabaram de deixar a fornalha, passando por um trocador de calor para aquecer a água de alimentação da caldeira (BUECKER, 2002).

Portanto os economizadores são trocadores de calor gás-líquido, devido ao baixo coeficiente de troca de calor por convecção no lado dos gases, geralmente os economizadores são compostos por tubos aletados em seu interior. Em relação á sua instalação, devem estar localizados após a última superfície de convecção do gerador de vapor, no qual, na saída dos gases de combustão.

Podem ser fabricados integralmente à caldeira, ou podem ser adicionados na parte exterior da mesma, logo após a saída dos gases, os economizadores são praticamente usados em médias e grandes instalações, seu custo adicional comparado com o ganho de rendimento térmico viabiliza a utilização em caldeiras.

Os economizadores em caldeiras funcionam como um dispositivo de recuperação de calor, garantindo que este calor não vá não utilizado. Em vez disso, o calor é aproveitado para pré-aquecer a água, essencialmente, de modo que menos calor é necessário para deixar a água numa temperatura suficientemente alta na elaboração de vapor. Pode-se pensar em um economizador da caldeira como um aquecedor de água de alimentação, que garante que a

água utilizada para alimentar a caldeira possa fazer mais vapor é seja tão quente a ponto de a caldeira não ter de gastar tanta energia

Conforme Chiarantano e Santana (2008), a cada aumento de temperatura na faixa de 3 a 4 °C da água de alimentação da caldeira representa um aumento de 1% na sua eficiência, pois os gases gerados na combustão possuem um considerável conteúdo de energia. A justificativa do investimento depende necessariamente da temperatura em que os gases saem da caldeira e da temperatura da água de alimentação.

Mudanças de temperatura causadas pelo uso de refrigerador de água de alimentação podem criar desgaste na caldeira ao longo do tempo. Quando a água de alimentação é aquecida, o diferencial de temperatura é menos extremo, colocando menos pressão na caldeira e dando-lhe uma vida útil mais longa. Um sistema grande de caldeira pode ser caro de consertar ou substituir, por isso, o economizador de caldeira industrial contribui para a economia global sobre o sistema de aquecimento.

Figura 3- Economizador instalado em uma caldeira junto à saída dos gases de combustão. A água, após passar pela bomba, circula pelo economizador antes de entrar na caldeira.



Fonte: Arauterm (2015).

3.0. METODOLOGIA

O método científico pode ser definido como um conjunto de etapas e instrumentos pelo qual o pesquisador científico, direciona seu projeto de trabalho com critérios de caráter científico para alcançar dados que suportam ou não sua teoria inicial (CIRIBELLI, 2003). Desta forma, ele, o pesquisador, tem toda a liberdade de definir quais os melhores instrumentos vai utilizar para cada tipo de pesquisa a fim de obter resultados confiáveis e com possibilidades de serem generalizados para outros casos.

3.1. DESCREVENDO A PESQUISA DE CAMPO.

A possibilidade da instalação de um trocador de calor na saída dos gases de combustão, para aumento da temperatura da água de alimentação de Caldeira Flamotubular sem o reaproveitamento de retorno de água de condensado, foi percebida a partir da observação da queda na pressão interna da caldeira que sempre que é alimentada com água em temperatura ambiente de osmose a 30°C.

Outro ponto observado durante a produção foi à interrupção no processo de geração de vapor no momento em que entra água fria para repor o nível. Com esta interrupção e o consumo de vapor se mantendo, a pressão é reduzida e conseqüentemente a temperatura, afetando diretamente o processo produtivo pela limitação da velocidade da máquina.

Foi também observado que havia uma grande diferença de temperatura entre a saída dos gases de combustão e a entrada de água na caldeira, e no interesse de aumentar a eficiência da Caldeira Flamotubular pelo aumento da temperatura da água aproveitando a saída dos gases de combustão se fez necessário a instalação de um aquecedor de água na saída dos gases de combustão. Após esse estudo a água de alimentação que sai da bomba, foi interligada a esse aquecedor de água para aumento de temperatura antes de entrar na Caldeira.

Os gases da combustão saem pela chaminé a aproximadamente 200 °C estão sendo desperdiçadas para a atmosfera. Tendo também como um fator que favorece a instalação do trocador de calor, o reservatório já possui isolamento térmico e fica localizado próximo à base de saída da chaminé.

De acordo com Bazzo (1995), a análise do rendimento energético de uma caldeira é realizada a partir de informações experimentais coletadas com instrumentos posicionados nos efluentes de interesse.

Este trabalho apresentará a análise de um pré aquecedor de água de um trocador de calor em uma caldeira flamotubular de três passes que opera com gás natural. Os gases de saída da caldeira a 195°C foram aproveitados para pré-aquecer a água de alimentação da caldeira disponível a 30°C. Após a instalação do trocador de calor, também denominado de economizador, a água de alimentação entra na caldeira a 70 °C.

3.2. DESCRIÇÃO DO GERADOR DE VAPOR E DO PRODUTO FINAL.

Na industrial de fabricação de isopor o uso da Caldeira Flamotubular é fundamental, pois é a partir da injeção do vapor juntamente com a matéria prima do isopor (EPS), que se conceitua como um poliestireno expandido que pode apresentar uma variedade de formas e aplicações. Apresenta-se como uma espuma moldada, constituída por um aglomerado de grânulos.

O EPS é um polímero celular rígido, que pode apresentar numa variedade de formas e aplicações. Apresenta-se como uma espuma moldada, constituída por um aglomerado de grânulos (Resol Engenharia Ltda).

O isopor é uma espuma formada a partir de derivados de petróleo, é o poliestireno expandido. Na sua antiga fabricação entrava o gás CFC, acusado de ser nocivo para a camada de ozônio. Porém atualmente usa-se outro gás para expandir o poliestireno. Nas instalações dos produtores de isopor, a matéria prima é sujeita a um processo de transformação física, não alterando as suas propriedades químicas. Esta transformação processa-se em três etapas:

a) A pré-expansão

A expansão do poliestireno (PS) expansível é efetuada numa primeira fase num pré-expansor, a partir de aquecimento pelo contato com vapor de água. O agente expansor incha o PS para um volume cerca de 50 vezes maior que o original. Daí resulta um granulado de partículas de isopor constituídas por pequenas células fechadas, que é armazenado para estabilização.

b) O armazenamento intermediário

O armazenamento é necessário para permitir a posterior transformação do isopor. Durante esta fase de estabilização, o granulado de isopor arrefece o que cria uma depressão no

interior das células. Ao longo deste processo o espaço dentro das células é preenchido pelo ar circundante.

c) A moldagem

O granulado estabilizado é introduzido em moldes e novamente exposto a vapor de água, o que provoca a soldadura do mesmo; assim obtém-se um material expandido, que é rijo e contém uma grande quantidade de ar.

Para fabricar placas para a Construção Civil produzem-se blocos de isopor em grandes moldes paralelepípedicos, para fabricar moldados em isopor, o granulado é insuflado para dentro de moldes com a conformação das peças pretendidas. A escolha do tipo de matéria prima e a regulação do processo de fabricação permitem a obtenção de uma ampla gama de tipos de isopor, com diversas densidades, cujas características se adaptam às aplicações previstas.

Existem três Caldeiras na fabrica e são usadas alternadamente para geração do vapor, são do tipo flamotubular da marca Daeyeol, com capacidade de geração de vapor de 4000 kg/h cada uma, é utilizado como combustível o gás natural. O modo de ignição e operação das caldeiras são de forma automática e controlada por um controlador lógico programável (CLP). Sua modulação de chama pode ser ou não controlada de forma manual pelo operador. Assim como as descargas de fundo (purga), que também operam nos modos manual ou automático. A figura 4, mostra a caldeira da empresa.

Figura 4 - Caldeira Flamotubular Daeyeol



Fonte: Figura capturada pelo autor (2019).

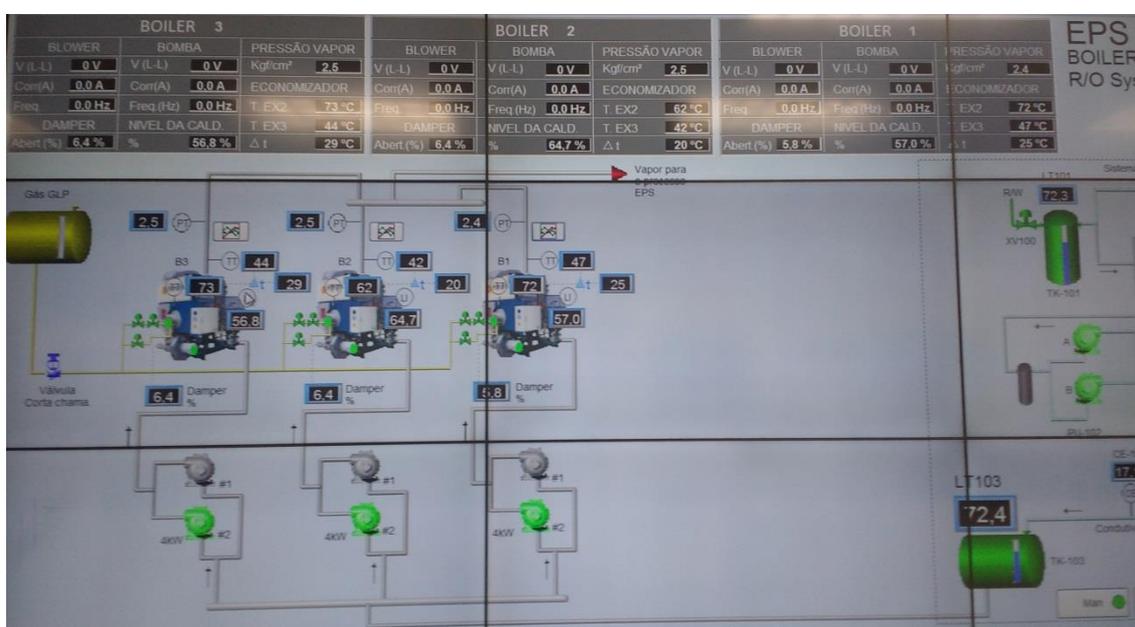
Tabela 1 - Dados Técnicos Informados pelo Fabricante da Caldeira.

FABRICANTE	DAEYEOL. BOILER
PRODUÇÃO DE VAPOR	4000 Kg/h
PMTA	10.0 bar
CONSUMO DE GÁS	116,1 Kg/h
SUPERFÍCIE DE VAPORIZAÇÃO	56 m ²
CÓDIGO DE PROJETO	ASME Seção VIII-Div-1. Ed.2010
CAPACIDADE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	3.757.000 Kcal/h
PRESSÃO DE TESTE HIDROSTÁTICO	15.0 bar
NÚMERO DE SÉRIE	2012.075.01
DATA DE FABRICAÇÃO	05/2012
VAZÃO DO VENTILADOR	70 m ³ /min

Fonte: Criado pelo Autor a partir dos dados encontrados na placa de identificadora (2019)

O equipamento foi adquirido e instalado em 2012, juntamente com outros equipamentos, inclusive as injetoras, onde são moldados o isopor. Desde então a caldeira é operada e monitorada a distância por um operador treinado e qualificado conforme norma NR 13, paralelo a isto tem-se um Software de monitoramento denominado CLP, no qual são visualizados em tempo real os valores de pressão, nível de água e temperatura da Caldeira, conforme figura 5.

Figura 5 - Monitoramento da caldeira pelo CLP



Fonte: Figura capturada pelo autor (2019).

3.3. SISTEMA DE SEGURANÇA.

Apesar de a caldeira ter sido especificada para uma pressão admissível de trabalho de 0,7 MPa (7,0 bar), categoria “B”, conforme norma NR 13, está ajustada para operar a uma pressão máxima de trabalho de 1,5 MPa (15,0 bar).

A caldeira opera com duas válvulas de segurança marca Aalborg, modelo LC, diâmetro 2”, com vazão de 7350 kg/h e ajustadas para abrir a uma pressão de 1 MPa.

Como a caldeira é monitorada à distância e não possui um operador permanente junto a ela, além do sistema supervisorio na figura 3.3, também há sensores individuais para cada tipo de falha que possa ocorrer. Seus sinais são transmitidos eletronicamente e monitorados por meio de interfaces audiovisuais ao operador no interior da fábrica. Os tipos de falhas, ilustradas na figura 5, podem ser:

- a) vazamento de gás;
- b) falta d'água na caldeira;
- c) nível de água baixo no reservatório de entrada da caldeira;
- d) falha nas bombas de alimentação;
- e) falha por ignição no queimador;
- f) pressão baixa e alta de gás na entrada do queimador; e
- g) pressão baixa ou alta do ar na entrada do queimador.

3.4. SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA DAS CALDEIRAS.

O modo de reposição de água na caldeira ocorre somente por meio de água de osmose, no qual se define como um processo físico em que a água se movimenta entre dois meios com concentrações diferentes de soluto, separados por uma membrana semipermeável (permite somente a passagem das moléculas de água), com temperatura ambiente em torno de 30°C, pois devido ao contato do vapor com a matéria prima do isopor na injeção, fica inviável a reutilização da água de retorno de condensado. Antes de chegar na Caldeira a água é armazenada em um tanque de 2500 litros e uma bomba própria com vazão 4 m³/h.

Independente do nível de água na caldeira, a bomba é acionada em função do nível do tanque, que bombeia esta água ao pre aquecedor onde ganha certa temperatura e somente depois entra diretamente no interior da caldeira a uma temperatura em torno de 70 °C.

Como a Caldeira não aproveita a água de retorno de condensado o consumo se torna alto, e conseqüentemente a observação e o controle se tornam vital para a operação do gerador de vapor. A figura 3.4 mostra o tanque instalado no interior da fábrica junto a Caldeira.

Figura 6 – Tanque de armazenamento de água



Fonte: Figura capturada pelo autor (2019).

3.5. SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR.

De forma geral a distribuição de vapor é feita através de tubulações soldadas ou flangeadas, que buscam obter uma vedação perfeita para se trabalhar em um sistema pressurizado. As tubulações costumam ser compostas por tubos sem costura, uma vez que estes apresentam uma chance muito menor de ter pequenos furos que podem condenar uma tubulação para distribuição de vapor.

É possível classificar um tubo como um conduto fechado, oco, geralmente circular destinado ao transporte de fluidos. Já uma tubulação pode ser classificada como sendo o conjunto de tubos, conexões, válvulas e acessórios formando uma linha para a condução de fluidos (ZATTONI, 2008)..

A empresa possui uma rede de distribuição de vapor possui algumas derivações em função da pressão necessária em cada ponto ou equipamento. Muitas destas ramificações são controladas a partir de válvulas redutoras de pressão do tipo mecânica, e outras possuem válvula tipo proporcionais, controladas eletronicamente pelo operador da máquina em função da pressão necessária para obter uma boa qualidade do isopor.

3.6. ANÁLISE PARA IMPLEMENTAÇÃO DO TROCADOR DE CALOR.

A possibilidade da instalação de um trocador de calor na saída dos gases de combustão foi percebida a partir da observação da queda na pressão interna da caldeira sempre que é alimentada com água do reservatório a 35°C. Outro ponto observado durante a produção foi à interrupção no processo de geração de vapor no momento em que entra água fria para repor o

nível. Com esta interrupção e o consumo de vapor se mantendo, a pressão é reduzida e consequentemente a temperatura, afetando diretamente o processo produtivo pela limitação da velocidade da máquina.

Foi também observado que havia uma grande diferença de temperatura entre os gases da chaminé e a entrada de água na caldeira. Os gases da combustão saem pela chaminé a aproximadamente 200 °C e esta temperatura estão sendo desperdiçadas para a atmosfera.

Tendo também como um fator que favorece a instalação do trocador de calor, a bomba de alimentação de água fica localizado logo abaixo da saída dos gases de combustão conforme figura 7.

Figura 7 - Local da instalação (Saída dos gases de combustão)



Fonte: Figura capturada pelo autor (2019).

Faz-se também necessária a instalação de uma bomba para circulação da água e um sistema de monitoramento das temperaturas desta água e dos gases. Como a empresa possui uma equipe de manutenção qualificada e capacitada, foi proposto fabricar internamente o trocador de calor, reduzindo assim custos de fabricação e instalação do projeto.

Figura 8 – Trocador de Calor (Pre aquecedor de agua)



Fonte: Figura capturada pelo autor (2019).

Na figura 8 é representado o trocador de calor de forma mais ampla e com os bocais de adaptação de entrada e saída de água com redução para se adequar à forma e ao diâmetro da saída dos gases de combustão.

3.7. DETERMINAÇÃO TÉRMICA DO PRÉ AQUECEDOR DE ÁGUA

Como uma das opções de aproveitamento térmico dos gases de exaustão, propomos que a água fria que é inserida no tanque de armazenamento seja pré-aquecida por estes gases. Para realizar o estudo sobre o potencial de aproveitamento térmico, deve-se saber quanto de água pretende-se aquecer. O valor de vazão de água utilizado é o da água de reposição da caldeira, equivalente a 2,7 kg/s. A temperatura dos gases considerada, conforme explicado anteriormente, foi de 210 °C.

Para o cálculo do calor específico utilizamos as propriedades termodinâmicas dos gases presentes na referência Borgnakke; Sonntag (2009). Retiramos da referência o valor de calor específico de cada componente para uma temperatura média de 440 K. Após a obtenção dos valores de calor específico para cada componente, fizemos uma média ponderada dos mesmos, com base na composição mássica dos gases de exaustão.

O valor obtido para o calor específico foi de 1,09 kJ/(kg.K). A temperatura da água fria será estimada em 25 °C, pois entendemos que esta seria uma temperatura que representaria bem uma média anual. A partir do momento em que os dados de temperatura, vazão e calor específico da água fria e dos gases de exaustão foram obtidos, pôde-se iniciar o processo de

estudo para conhecimento do potencial de aproveitamento térmico. Sabe-se que em um trocador de calor ideal, sem perdas para o ambiente externo, as seguintes equações são válidas:

$$q = \dot{m}_q * c_{p,q} * (T_{q,e} - T_{q,s})$$

$$q = \dot{m}_f * c_{p,f} * (T_{f,s} - T_{f,e})$$

onde q é a taxa de transferência de calor, \dot{m}_q é a vazão mássica do fluido quente, \dot{m}_f é a vazão mássica do fluido frio, $c_{p,q}$ é o calor específico do fluido quente, $c_{p,f}$ é o calor específico do fluido frio, $T_{q,e}$ é a temperatura de entrada do fluido quente, $T_{q,s}$ é a temperatura de saída do fluido quente, $T_{f,e}$ é a temperatura de entrada do fluido frio e $T_{f,s}$ é a temperatura de saída do fluido frio.

Como os valores de temperatura de entrada dos fluidos frio e quente, vazões mássicas e calores específicos já eram conhecidos, foi possível obter as temperaturas de saída dos fluidos e a taxa de transferência de calor a partir do conhecimento da efetividade do trocador de calor. A equação define a efetividade de um trocador de calor:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\text{máximo}}}$$

onde, $q_{\text{máximo}}$ é a taxa de transferência de calor máxima teórica. O $q_{\text{máximo}}$ é calculado pela equação : $q_{\text{máximo}} = C_{\text{mínimo}} * (T_{q,e} - T_{f,e})$ onde, $C_{\text{mínimo}}$ é a capacidade calorífica mínima no trocador de calor, $T_{q,e}$ é a temperatura de entrada do fluido quente e $T_{f,e}$ é a temperatura de entrada do fluido frio. A capacidade calorífica é calculada pela equação 9. $C = \dot{m} * c_p$

Para se ter uma estimativa da efetividade, precisamos ter o conhecimento de que tipo de trocador de calor será utilizado. Neste caso escolheu-se o trocador de calor com escoamento cruzado, onde o fluido quente é misturado, e o fluido frio está dentro de tubos (não misturado).

A equação, obtida na referência Bergman et al. (2011) para o cálculo da efetividade em um trocador de calor com escoamento cruzado, onde o fluido com maior capacidade térmica está misturado e o fluido com menor capacidade térmica está em escoamento não misturado é mostrada abaixo:

$$\varepsilon = \frac{1}{C_r} * \{1 - \exp[-C_r * (1 - \exp(-NTU))]\},$$

onde Cr é a razão entre as capacidades térmicas mínimas e máximas e NTU (Número de unidades térmicas) é dado pela equação abaixo: $NTU = U.A.C_{min}$, onde U é o coeficiente global de transferência de calor e A é a área de troca térmica.

Devido à característica exponencial da equação, ela atinge um valor praticamente constante para a efetividade a partir de um valor de NTU próximo a 5. De tal maneira, neste trabalho para a obtenção das propriedades do trocador de calor que operasse com eficiência máxima, foi assumido que NTU é igual a 5. O valor obtido para a efetividade máxima foi de 0,758.

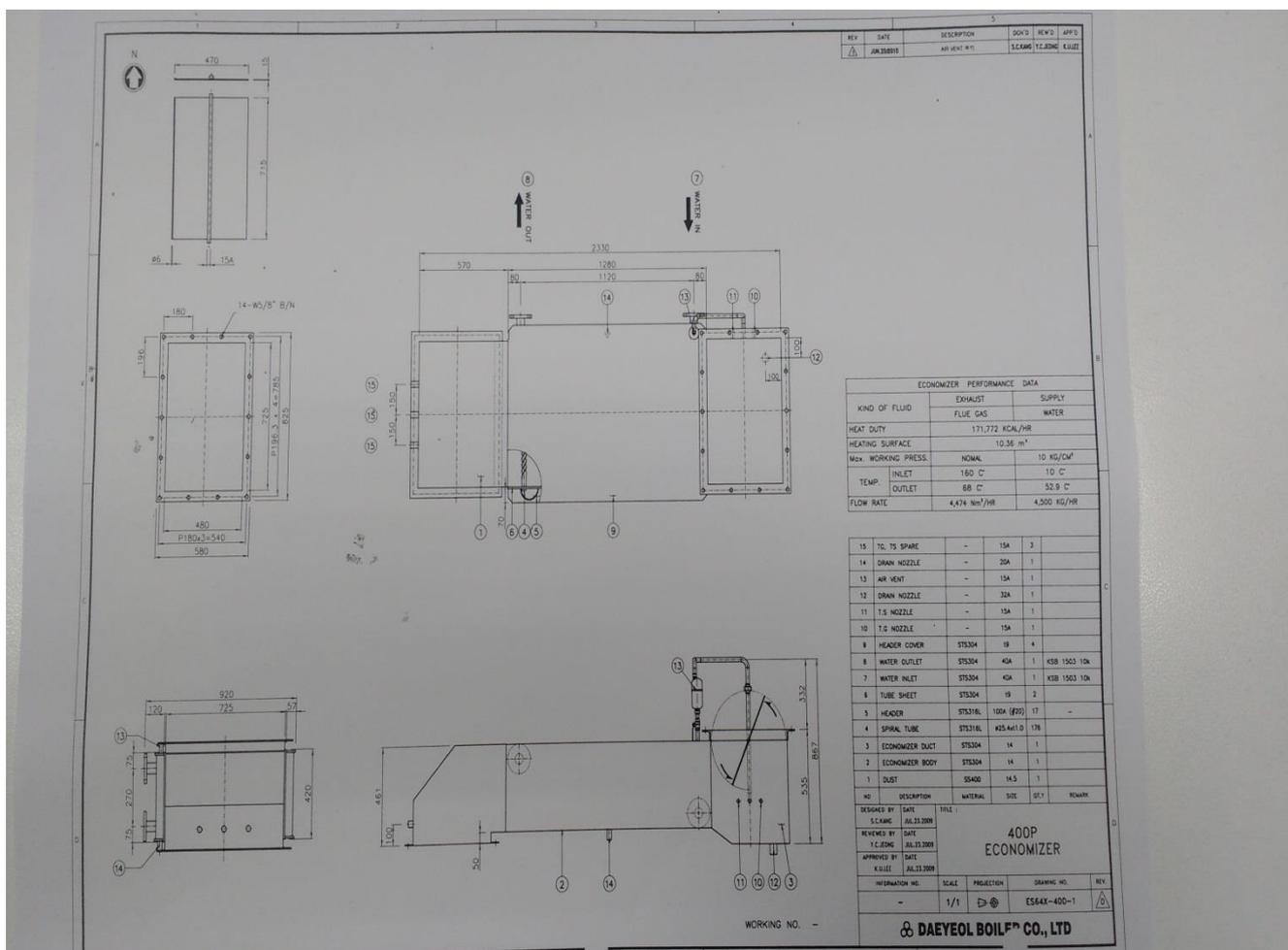
O coeficiente global de transferência de calor pode ser obtido a partir das características do trocador de calor. Esta etapa foge do escopo do presente trabalho, portanto, para fins de estimativa da área necessária para troca de calor foi utilizado um valor de U encontrado na referência de Kakaç e Liu (2002).

Ainda para os autores Kakaç e Liu (2002) apresentam que os valores de U relacionados à trocas de calor entre água e gases são em média $250 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, portanto este valor foi utilizado para estimar a área de troca térmica necessária. O valor de NTU pode ser alterado para se obter diferentes temperaturas de saída, e conseqüentemente diferentes valores de taxa de transferência de calor e de área de troca térmica.

De acordo com Nogueira et al. (2005) o limite inferior de temperatura dos gases de exaustão para caldeiras que queimam gás natural é de $120 \text{ }^\circ\text{C}$, para carvões e óleos com baixos teores de enxofre $150 \text{ }^\circ\text{C}$ e $180 \text{ }^\circ\text{C}$ para óleos combustíveis com elevados teores de enxofre. Assim sendo de modo a evitar a corrosão, utilizou-se a temperatura mínima de saída dos gases de exaustão após o trocador de calor como $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Todavia, se o trocador operar com sua efetividade máxima, a temperatura na saída será menor do que $150 \text{ }^\circ\text{C}$, de forma que este trocador não pode operar com a efetividade máxima.

Figura 9 - Trocador de calor com seus respectivos diâmetros dos dutos de entrada e saída em mm.



Fonte: Figura capturada pelo autor (2019).

3.8. PRÉ AQUECIMENTO DE ÁGUA PARA CALDEIRAS.

Utilizando o valor de efetividade máxima, obtido com um NTU de 5, pode-se obter as variáveis que faltam para resolver os cálculos. Seguindo a metodologia descrita na se, pode-se recuperar uma potência térmica de 1,6 MW, com temperatura de saída dos gases de exaustão de 128 °C e de saída da água de 164 °C. O valor de UA para realizar essa troca térmica foi de 56 kW/K.

Como citado na seção anterior, não se deve operar com temperaturas de gases de exaustão abaixo de 150 °C, portanto percebe-se que a operação na máxima efetividade é

inviável. Utilizando como referência o valor de U igual a $250 \text{ W/m}^2\text{K}$, conforme disponível na referência Kakaç e Liu (2002), foi possível estimar a área de troca térmica necessária.

Calculou-se que a área do trocador de calor com máxima efetividade deveria ser igual a 226 m^2 . Esse valor é relativamente alto para um trocador de calor de recuperação, visto que a caldeira inteira apresenta uma área de troca de mesma ordem de grandeza. Para obter o valor de $150 \text{ }^\circ\text{C}$ na saída dos gases de exaustão, o trocador de calor deverá operar com uma efetividade de 0,55.

Os valores obtidos neste caso são para a taxa de transferência de calor, a temperatura de saída da água líquida de $70 \text{ }^\circ\text{C}$. O valor de área de troca térmica para essa efetividade foi de 49 m^2

3.9. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA.

Para obter os valores de temperatura e consumo de água para dimensionamento do trocador foram utilizados os materiais descritos a seguir: a vazão média do consumo de água do reservatório de entrada da caldeira foi obtida por meio de um hidrômetro marca Lao, diâmetro 2", instalado na sua entrada; a temperatura da água no reservatório foi obtida por meio de um indicador digital marca Inova, que é interligado a um sensor do tipo termo resistência PT-100/K, com faixa de medição de 20 a $170 \text{ }^\circ\text{C}$; -a temperatura de saída dos gases foi obtida com um termômetro analógico escala de medição 0 a $500 \text{ }^\circ\text{C}$, diâmetro 150 mm , marca Iope.

A fim de evitar a obstrução do fluxo dos gases, e de manter uma área interna do duto de saída dos gases de combustão livre sem alterar o fluxo dos gases, que poderia gerar uma contrapressão maior na fornalha e ao queimador, foi calculada a área ocupada pelos tubos aletados no interior da saída dos gases. A área do duto da chaminé antes da instalação do trocador de calor era de $0,38 \text{ m}^2$. Com a alteração da geometria do duto no local da instalação do trocador de calor ficou agora com uma área livre de $0,46 \text{ m}^2$.

4. METODOLOGIA DO TRABALHO.

4.1. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.

A mudança ocorreu basicamente em interligar a tubulação que sai da bomba de alimentação diretamente no pré aquecedor de água instalado da saída dos gases de combustão, somente após esse ganho de temperatura da água devido a entrada e saída do pré aquecedor é que a água entra na Caldeira, proporcionando menos combustível em sua evaporação.

Devido a essa adequação houve grande interesse na análise de um pré aquecedor de água de um trocador de calor em uma caldeira flamotubular de três passes que opera com gás natural, onde os gases de saída da caldeira a 200°C foram aproveitados para pré-aquecer a água de alimentação da caldeira disponível a 30°C. Após a instalação do trocador de calor, também denominado de economizador, a água de alimentação passou a entrar na caldeira a 75°C.

Rodrigues (2002) citado por Silva (2013) indica que:

[...] quanto maior for à temperatura de entrada da água na caldeira, menor será a quantidade de combustível gasto para atingir a vaporização; e relata que cada aumento na temperatura de 5 a 6 °C na água obtém-se uma redução de 1% no consumo de combustível. (RODRIGUES, 2012 apud SILVA, 2013, P.7)

Este ganho de temperatura permitirá aumento de eficiência na geração do vapor no momento em que a água de reposição entra na caldeira mantendo a pressão de trabalho do vapor mais estável e melhorando a condição da geração de vapor. Isso faz com que a Caldeira se torne mais eficiente, reduzindo os custos de produção de certo produto da empresa (isopor).

Figura 10 - Pré aquecedor de água instalado na saída dos gases de combustão.



Fonte: Figura capturada pelo autor (2019).

4.2 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

Com a instalação do trocador de calor na saída dos gases de combustão, foi obtida uma razoável elevação da temperatura da água que entra na caldeira. Temperatura que antes entrava próxima dos 30 °C agora conseguiu-se uma temperatura de 70 °C.

Para o dimensionamento do trocador de calor foi estabelecida uma variação de temperatura da água (ΔT) entre a entrada e saída de 40 °C, com uma vazão de água 1 m³/h, e para os gases da chaminé uma variação de temperatura de 50 °C entre a entrada e saída dos gases do trocador.

Estes valores somente puderam ser observados na condição inicial de partida do equipamento em Junho 2019, quando a temperatura da água no reservatório estava em 30 °C e a diferença de temperatura entre os dois fluidos era maior. Foi possível também perceber uma queda de temperatura maior nos gases da chaminé, ou seja, de 44 °C, ficando bem próxima dos valores estabelecidos para o dimensionamento do trocador que foi de 50 °C.

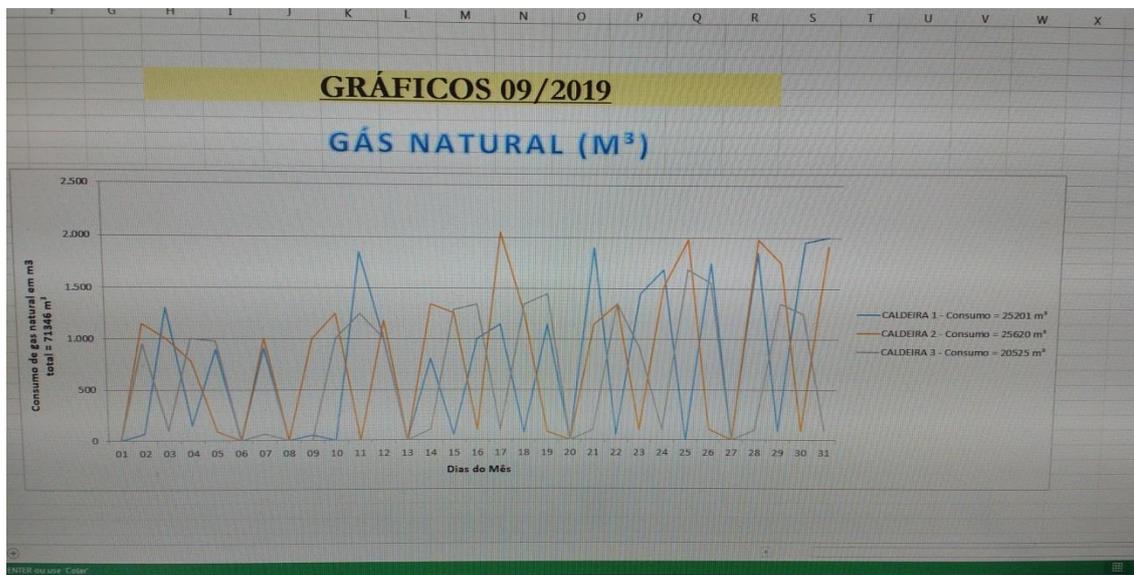
O fato de não atingir o valor atribuído no projeto os gases da chaminé de 50 °C pode ser pelo fato do passo entre os tubos aletados ser grande, diminuindo o contato entre os gases quentes e a superfície aletada dos tubos.

Porém, à medida que a temperatura da água foi aumentando no reservatório também foi necessário ajustar sua vazão, através do inversor de frequência que controla a velocidade da bomba, para que não elevasse muito a temperatura da água no reservatório.

Com relação a economia de consumo de gas natural, fica evidente que antes da instalação do trocador as caldeiras consumiam um valor aproximado de quase 73000 m³ de gas natural, pois com a entrada de agua fria o consumo era sempre alto, pois para que a caldeira não perdesse o rendimento a geradora de vapor trabalhava sempre na capacidade alta, como se pode observar que no mês de Setembro as caldeiras consumiram 71346 m³ de gas natural, como pode ser visto na figuras 11 e 12.

Outra condição observada é que mesmo com a caldeira parada por dois dias consecutivos, caso comum nos finais de semana quando produção não esta em condição normal, a água no reservatório sofre uma pequena queda, mas se mantém na maioria das vezes próxima dos 60 °C, o que contribui para partida de máquina, diminuindo o tempo de pressurização da caldeira.

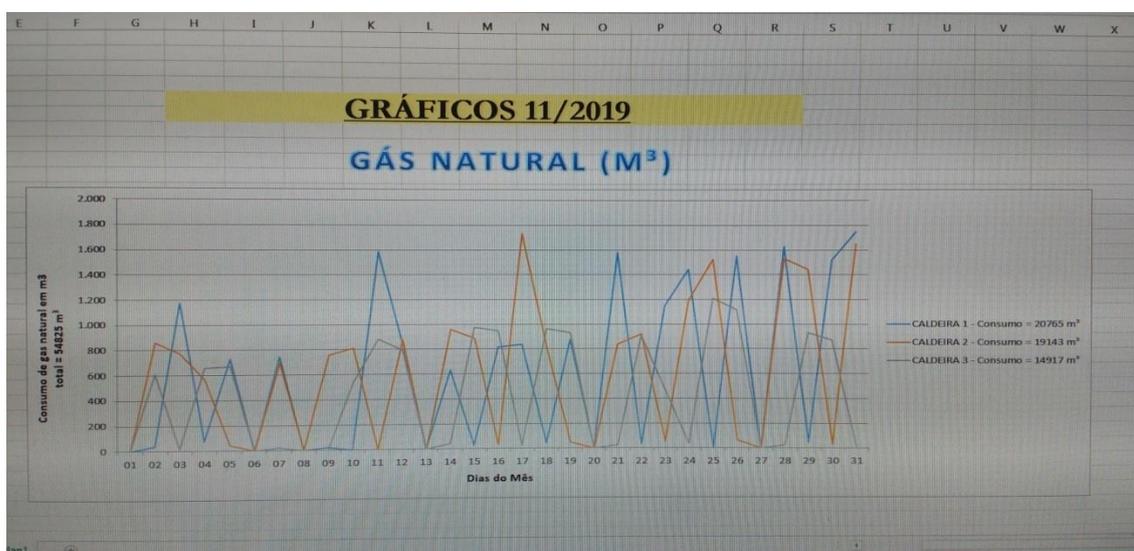
Figura 11 - Mostra um o gráfico de consumo das três Caldeiras no mês de Setembro, antes da instalação do pré aquecedor de água



Fonte: O autor (2019). Fonte: Figura capturada pelo autor (2019).

Após a instalação do trocador de calor, verificou-se uma constante faixa de trabalho, diminuindo as percas de pressão e conseqüentemente um baixo consumo de gas natural, pois com a agua entrando a 70° C, conseqüentemente a caldeira gasta menos combustível na geração de vapor, fazendo com que ocorresse uma diminuição de mais de 23% de economia de gas natural, vindo a gastar somente 54825 m³.

Figura 12 - Mostra um o gráfico de consumo das três Caldeiras no mês de Novembro, após a instalação do pré aquecedor de água



Fonte: Figura capturada pelo autor (2019)

Considerações Finais

Neste trabalho foi apresentada uma análise, dimensionamento e desenvolvimento para instalação de um trocador de calor junto à saída de gases de combustão de caldeiras a gás natural.

Um dos princípios básicos para que a caldeira opere de forma mais estável na geração do vapor, é o aumento da temperatura da água de reposição. A instalação de um trocador de calor, também denominado de economizador, é uma das melhores formas e de baixo custo para o pré-aquecimento, pois o sistema se tornaria inviável com aquecimento por energia elétrica, devido ao custo mensal que seria gasto com energia elétrica para elevação da temperatura da água.

Apesar de ter um custo inicial para fabricação e instalação o economizador, após a instalação não gera mais nenhum custo mensal e ainda contribui para redução do consumo de gás natural, diminuindo assim também os custos de produção de isopor.

Para melhorar tal condição foi diminuído o fluxo de água que passa pelo economizador, lembrando que o fluxo pode variar, mas deve ser contínuo para não danificar o aletamento dos tubos.

Para finalizar, o trocador de calor operou de forma satisfatória atendendo à necessidade de elevar a temperatura da água no reservatório de entrada da caldeira aos 70 °C. Como trabalho futuro sugere-se o estudo mais detalhado para viabilizar um sistema de pré-aquecimento do ar na entrada na fornalha.

Referências Bibliográficas

- ARAUTERM, Site. Disponível em < [http://www.arauterm.com.br/ php/ index .php?link = produtos &sub=acessorios&cat=2](http://www.arauterm.com.br/php/index.php?link=produtos&sub=acessorios&cat=2)> acessado em: 10 out. 2019.
- BAZZO, E. Geração de Vapor. 2.ed. Florianópolis: UFSC, 1995. 216 p. (Série Didática).
- BUECKER, B. Basics of Boiler and HRSG Design. Oklahoma: Penn Well Corporation, 2002
- CHIARANTANO, C.; SANTANA, F. F.; Economizadores e superaquecedores de caldeiras. PROMINP- Engenheiro de suprimento. Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica 2008. Disponível em: <<https://lcsime.files.wordpress.com//caldeirasprominp.pdf>> Acessado em: 16 out. 2019..
- CIRIBELLI, Marilda Corrêa. Como elaborar uma dissertação de Mestrado através da pesquisa científica. Marilda Ciribelli Corrêa, Rio de Janeiro: 7 Letras, 2003.
- INCROPERA, F. P.; et al. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 644 p.
- KAKAÇ, Sadik; LIU, Hongtan. Heat Exchangers: Selection, Ratings, and Thermal Design. 2. ed. Boca Raton: Crc Press, 2002. 501 p.
- LEITE, Nilson R.; MILITÃO, Renato de A. Tipos e aplicações de caldeiras. Fabricação e Montagem de Caldeiras e Trocadores de Calor. Escola Politécnica –Deptº de Engenharia Mecânica EPUSP-PROMIMP, 2008. Disponível em <[http:// lcsime files. Word press. Caldeiras _prominp.pdf](http://lcsime.files.wordpress.com/caldeiras_prominp.pdf)>. Acesso em 16 nov. 2019.
- LORA, Electro Eduardo Silva; NASCIMENTO, Marco Antônio Rosa do (Coord.). Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. 1 v. Fonte: < [https://www.mundovestibular.com.br/estudos/quimica/isoporpoliestirenoexpandido eps](https://www.mundovestibular.com.br/estudos/quimica/isoporpoliestirenoexpandidoeps)>. Acesso em 20 set. 2019
- MACINTYRE, A.J. Equipamentos industriais e de processo. Rio de Janeiro: LTC, 1997. 277p.
- MARTINELLI, L. C. Jr. Geradores de vapor. 1998. Panambi. 141 p. Disponível em: < <http://www.saudeetrabalho.com.br/download/gera-vapor.pdf>> Acessado em: 15 set. 2019.
- Norma Regulamentadora NR-13: Caldeiras e Vasos de Pressão. Disponível em: <[http://portal.mte.gov.br/data/files/ FF8080812BE914E6012BEF26958 17E 43/nr_13.p df](http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812BE914E6012BEF2695817E43/nr_13.pdf)>. Acesso em 18 set. 2019.
- NOGUEIRA, L.A.H.; et al. Eficiência energética no uso do vapor manual prático. Eletrobrás, 2005. 96 p. Disponível em: <[http://pt.slideshare.net/l cmartinelli1/eficiencia-energetica-no-uso-do-vapor](http://pt.slideshare.net/lcmartinelli1/eficiencia-energetica-no-uso-do-vapor)> Acessado em: 02 out. 2019.
- RESOL ENGENHARIA LTDA. Disponível em <http://www.resol.com.br>.. Acesso em 22 set. 2019.
- SILVA, A. C. C. Conservação e gerenciamento de energia em sistemas de vapor. 2013. 196f. Dissertação (Graduação em Engenharia de alimentos)- Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campos Mourão, 2013.
- SOSA ARNO, J. H. Caldeiras aquatubulares de bagaço – Estudo do sistema de recuperação de energia. 2007. 224 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Comissão de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Campinas, 2007. Disponível em: <[http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document /?code =000438174 &fd=y](http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000438174&fd=y)>. Acessado em: 17 abr. 2019.
- ZATTONI, Celio Carlos. 2008. Materiais para tubulação. São Paulo : FATEC-SP, 2008.

ANEXOS



