

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA MECÂNICA
GABRIEL DE OLIVEIRA RANULPHO RAPHAEL**

**ECONOMIZADOR A BASE DE ENERGIA SOLAR PARA OTIMIZAR A
EFICIÊNCIA EM CALDEIRAS**

**Varginha
2018**

GABRIEL DE OLIVEIRA RANULPHO RAPHAEL

**ECONOMIZADOR A BASE DE ENERGIA SOLAR PARA OTIMIZAR A
EFICIÊNCIA EM CALDEIRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de bacharel, sob a orientação da Profa. Dra. Deborah Reis Alvarenga.

Varginha

2018

GABRIEL DE OLIVEIRA RANULPHO RAPHAEL

**ECONOMIZADOR A BASE DE ENERGIA SOLAR PARA OTIMIZAR A
EFICIÊNCIA EM CALDEIRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de bacharel, sob a orientação da Profa. Dra. Deborah Reis Alvarenga.

Aprovado / /

Prof.

Prof.

Prof.

OBS.:

Dedico este trabalho aos meus professores, meus colegas de classe, a minha orientadora, Profa. Dra. Deborah Reis Alvarenga e a todos aqueles que contribuíram para sua realização.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus colegas, professores, minha orientadora minha família por terem ajudado na construção deste trabalho, Profa. Dra. Deborah Reis Alvarenga e a empresa Steammaster pelo suporte na seleção da caldeira e fornecimento de dados.

RESUMO

Este trabalho analisa um estudo sobre coletores solares para um pré-aquecimento da água em uma caldeira. Os coletores solares foram com que a caldeira receba a água pré-aquecida, assim gerando economia no combustível e aumentando a eficiência da caldeira. Tal abordagem se faz necessária para otimizar o uso de caldeiras nas indústrias com energia renovável e gerando redução de custo. O objetivo deste estudo é realizar um comparativo em caldeiras com e sem a utilização de coletores solares e avaliar seus gastos e eficiência energética. Esta tarefa será obtida através da revisão bibliográfica e estudo de caso. Será feita a coleta de dados de eficiência de coletores solares. Após essa coleta de dados serão realizados cálculos dos gastos energéticos, eficiência e gastos de combustíveis da caldeira sem a utilização dos coletores solares e posteriormente com a utilização dos coletores solares. Os cálculos comprovam que a utilização dos economizadores aumentam em 5,43% a eficiência nas caldeiras e uma economia de combustível de 37,23 m³ de gás natural por hora, para a geração de vapor.

Palavras-chave: Caldeira. Eficiência. Coletores solares.

ABSTRACT

This paper discusses a study on solar collectors for a preheating of the water in a boiler. Solar collectors ensure that the boiler receives the preheated water, thus generating fuel savings and increasing boiler efficiency. Such an approach is necessary to optimize the use of boilers in the renewable energy industries and generating cost reduction. The objective of this study is to perform a comparative in boilers with and without the use of solar collectors and to evaluate their expenditures and energy efficiency. This task will be obtained through bibliographic review and case study. Solar collector efficiency data will be collected. After this data collection will be made calculations of energy expenditure, efficiency and fuel costs of the boiler without the use of solar collectors and later with the use of solar collectors. The calculations show that the use of the economizers increase the efficiency of boilers by 5.43% and a fuel saving of 37.23 m³ of natural gas per hour for the generation of steam.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - esquema de uma caldeira.	13
Figura 2 - Componentes de uma caldeira.	14
Figura 3 - esquema de uma caldeira fogo tubular.	15
Figura 4 - Esquema de uma caldeira fogo tubular a óleo.	16
Figura 5 - Esquema de uma caldeira água tubular para combustível sólido.	17
Figura 6 - Coletor solar max 2,00m ² vertical.	21
Figura 7 - Radiação solar média diária anual.	22
Figura 8 - Radiação solar no Brasil.	23
Figura 9 - Caldeira FOUR.	24
Figura 10 - Características da caldeira FOUR.	25

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 Geradores de vapor	11
2.1.1 Seleção de um gerador de vapor	11
2.1.2 Dados característicos e de performance.	11
2.2 Caldeiras.....	12
2.2.1 Caldeiras fogo tubulares	14
2.2.2 Caldeiras água tubulares.....	17
2.2.3 Calculo energético das Caldeiras	18
2.3 Poder calorífico dos combustíveis	19
2.4 Economizadores	20
2.5 Coletores Solares	20
2.5.1 coletor solar soletrol max 2,00m ² vertical	21
2.5.2 Manutenção do coletor	22
2.6 Radiações solares no estado de Minas Gerais.....	22
2.7 Radiações solares no Brasil.....	23
3 METODOLOGIA.....	24
4 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	25
4.1 Gastos energéticos da caldeira sem a utilização de coletores solares.....	25
4.2 Consumo de combustível na caldeira	26
4.3 Custo do investimento do sistema de coletor solar	27
4.4 Gastos energéticos da caldeira com a utilização do coletor solar.....	27
4.5 Consumo de combustível na caldeira	28
4.6 Custo do investimento e tempo de retorno.....	28
4.7 Melhoria na eficiência do sistema	29
5 CONCLUSÃO.....	30

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho analisa coletores solares para um pré-aquecimento da água em uma caldeira. Os coletores solares farão com que a caldeira receba a água pré-aquecida, assim gerando economia no combustível e aumentando a eficiência da caldeira. O uso de coletores solares em caldeiras, reduzirá os custos de modo significativo com os combustíveis e aumentará a eficiência da caldeira? Caldeiras são utilizadas para a produção de vapor onde a água entra na caldeira em temperatura ambiente, ou seja, aproximadamente 23,8°C. Caso a água de alimentação entre na caldeira com uma temperatura mais elevada, fará com que o processo de geração de vapor na caldeira consuma menor quantidade de combustível e fará com a eficiência do processo aumente.

Tal abordagem é devida ao fato de que coletores solares são utilizados para gerar energia em nosso dia a dia, porque não utilizar dentro da indústria para gerar uma redução de custo, otimizando o uso de caldeiras para indústrias, além de utilizar no processo uma energia renovável.

É importante salientar que as caldeiras apresentam alto consumo de combustível para realizar o aquecimento da água até a temperatura de vaporização. A utilização de painéis solares, farão com que a água de alimentação esteja a uma temperatura maior comparada com caldeiras que não utilizam os painéis. Sendo assim, é possível reduzir o consumo de combustível e consequentemente, aumentar a sua eficiência energética e com a redução da queima de combustível, haverá uma redução na quantidade de gás carbônico emitido para a atmosfera, onde é de grande contribuição desse trabalho para as indústrias que utilizam caldeiras.

O objetivo deste estudo é apresentar um estudo sobre o uso de coletores solares em caldeiras industriais, visando realizar um comparativo em caldeiras com e sem a utilização de coletores solares e avaliar seus gastos energéticos e sua eficiência.

Esta tarefa será conseguida através de estudo de caso e pesquisa bibliográfica. Serão feitos cálculos para realizar a comprovação de que com a utilização dos coletores solares teremos ganhos energéticos e de eficiência em uma caldeira e assim diminuindo a quantidade de combustível utilizado para a geração de vapor.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Geradores de vapor

Pera (1990) afirma que gerador de vapor é um trocador de calor complexo que produz vapor a partir de energia térmica (combustível), ar e fluido vaporizante, constituído por diversos equipamentos associados, para permitir a obtenção do maior rendimento térmico possível. Esta definição compreende todos os tipos de Geradores de vapor, sejam os que vaporizam a água, mercúrio ou fluidos de alta temperaturas (fluidos térmicos) como as mais simples unidades geradoras de vapor de água, comumente conhecidas por caldeiras de vapor.

2.1.1 Seleção de um gerador de vapor

Pera (1990), para selecionar um gerador de vapor deve se estabelecer qual o equipamento mais indicado que satisfaça a uma certa instalação industrial. A seleção leva em consideração os seguintes fatores:

- a) Disponibilidade energética;
- b) Características da energia;
- c) Pressão e temperatura do vapor;
- d) Variação da demanda do vapor;
- e) Eficiência térmica desejável;
- f) Custo de instalação, operação e manutenção;
- g) Espaço disponível;
- h) Amortização do investimento;

2.1.2 Dados característicos e de performance.

Pera (1990), é de responsabilidade do fornecedor, incluir nas especificações do seu produto, os dados que permitem caracterizá-lo e identifica-lo. Dados mais importantes são:

- a) Superfície de aquecimento, define-se, a área de tubulação ou placa metálica que mantém contato com a água, ou mistura água-vapor. A superfície é dada em m^2 ;
- b) Produção normal de vapor, é a quantidade de vapor que descarrega da válvula principal da saída de vapor da caldeira nas condições do regime normal de pressão e temperatura estipuladas pelo projeto;

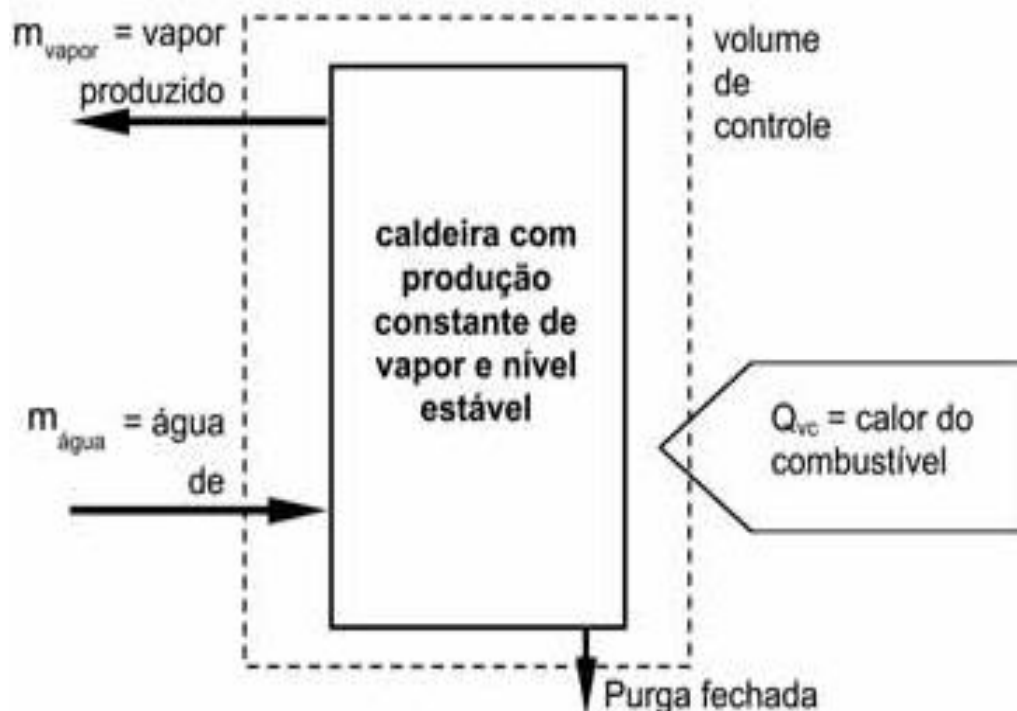
- c) Produção máxima contínua de vapor, é a máxima descarga da produção de vapor que pode realizar pelo mesmo gerador e em regime contínuo. Geralmente corresponde a 10% a mais da produção anterior;
- d) Produção de picos, é a maior descarga de vapor em estipulados curtos períodos, que é realizado pelo mesmo gerador. Esta produção se aplica mais em grandes geradores de vapor;
- e) Qualidade de vapor, indica se o vapor produzido será saturado, seco ou superaquecido;
- f) Temperatura do vapor, indica a temperatura do vapor saturado e superaquecido;
- g) Pressão de trabalho, é a pressão correta com que o vapor deve operar a caldeira;
- h) Pressão de construção, é a pressão que foi dimensionada para a construção da caldeira;
- i) Pressão de prova, é a pressão de teste hidráulico que é submetido a caldeira após a construção, que é realizado inspeções anuais e obrigatórios pelo ministério do trabalho;
- j) Eficiência térmica, é a fração de energia térmica que é liberada pelo combustível ao queimar na fornalha que pode ser absorvido pela água;

2.2 Caldeiras

De acordo com Pera (1990), a caldeira compreende as partes onde ocorre mudança de fase da água do estado líquido para o vapor. O tambor e as paredes de água são partes de uma caldeira. As paredes contêm diversos tubos dimensionados um ao lado do outro, revestindo as paredes da fornalha. A água circula livremente por diferentes densidades até ocorrer a formação do vapor que é acumulado na parte superior do tambor separador (Figura 1). O vapor é saturado e logo após é encaminhado ao superaquecedores. A regulação da pressão se dá por meio de pressostatos que são ligados ao sistema de combustão.

Segundo Pera (1990), uma caldeira de vapor é constituída de um vaso de pressão fechado e tubos, onde a água é introduzida, que pela ação externa do calor gradualmente vai gerando o vapor. Temos dois principais tipos de caldeiras, ambos contem corpo e tubos, que são montados sobre alvenaria ou envoltório e que envolve a fornalha e a própria caldeira. São eles a caldeira fogo tubulares e água tubulares.

Figura 1 - esquema de uma caldeira.

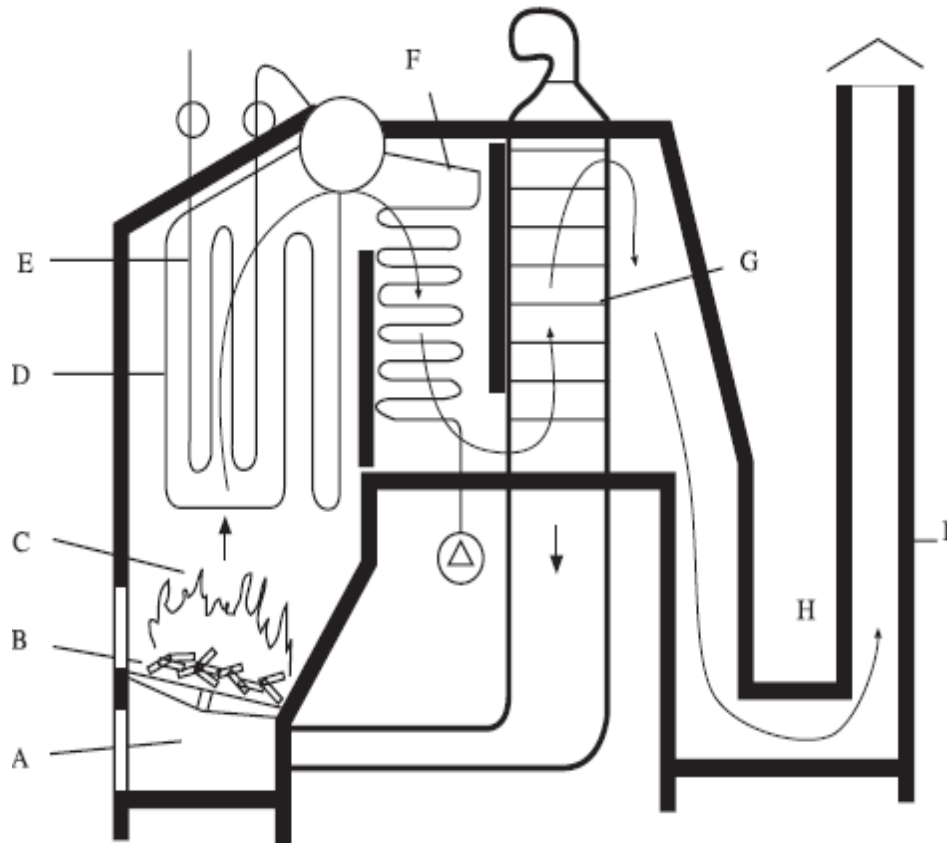


Autor: Nogueira e Rocha (2005).

Segundo Pera (1990), as caldeiras são divididas em dois tipos, fogo tubular e água tubular. As caldeiras fogo tubulares são constituídas de tubos, onde os gases da combustão percorrem toda a caldeira cedendo calor a água que é contida no corpo em que envolve toda a caldeira. A água tubular os gases da combustão percorrem toda a caldeira externamente aos tubos que estão cheio de água. Elementos clássicos de uma caldeira (figura 2):

- a) Cinzeiro: local onde é depositado os restos de combustíveis;
- b) Fornalha: local onde acontece a queima de combustível;
- d) Câmara de combustão: onde ocorre o consumo de combustível;
- e) Tubos evaporadores: tubos fechados contendo água;
- f) Superaquecedor: responsável pela elevação da temperatura do vapor saturado;
- g) Economizador: componente onde a temperatura da água sofre elevação;
- h) Pré-aquecedor de ar: componente onde se aquece o ar antes de introduzida na fornalha;
- i) Canais de gases trechos aonde a os gases circulam após a combustão;
- j) Chaminé: é a parte que garante a expulsão dos gases após a sua queima para atmosfera;

Figura 2 - Componentes de uma caldeira.



Fonte: Pera (1990).

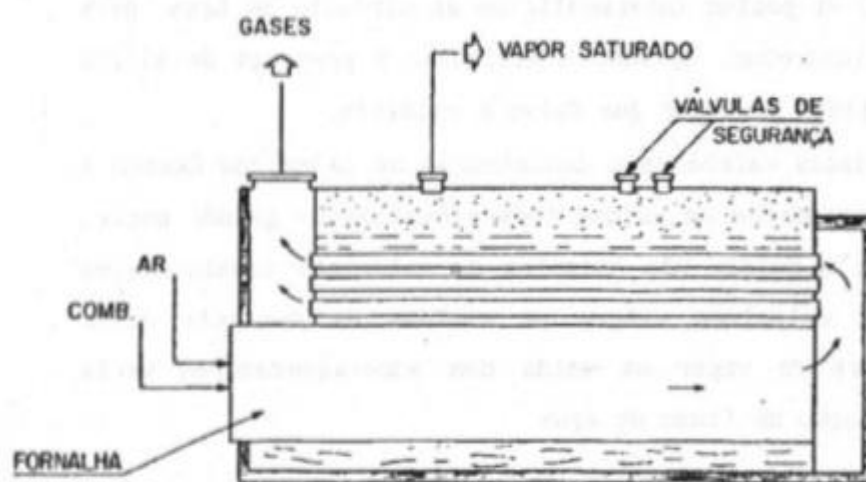
2.2.1 Caldeiras fogo tubulares

De acordo com Bizzo (2003), grande maioria desse tipo de caldeira é utilizado para pequenas capacidades de produção de vapor (até 10 T/h) e baixas pressões (até 10 bar). As caldeiras fogo tubulares constituem-se de um vaso de pressão cilíndrico horizontal, com dois tampos planos (os espelhos) onde estão fixados os tubos e a fornalha. Caldeiras modernas tem diversos passes de gases, a mais comum na fornalha são dois passes. A saída da fornalha é chamada câmara de reversão e pode ser revestida de refratários ou constituída de paredes metálicas molhadas. As fornalhas devem ser dimensionadas para que a combustão ocorra completamente em seu interior, para não ocorrer reversão de chama que pode atingir diretamente seus espelhos, o que diminui a vida útil da caldeira

Para Bazzo (1995), as caldeiras fogo tubulares são construídas para que a água circule ao redor de diversos tubos, montados entre espelhos, em forma de um único feixe tubular. Os gases da combustão circulam dentro dos tubos, em duas ou mais passagens, direcionados para a chaminé, onde serão lançados para o exterior. A figura 3 mostra uma caldeira fogo tubular de duas passagens. A primeira passagem ocorre na fornalha, onde ocorre a troca de calor por

radiação. A segunda passagem ocorre dentro dos tubos, onde a troca de calor é combinada por convecção e radiação gasosa. Os tubos são unidos aos espelhos por solda ou expansão de suas extremidades. O nível de água que circula na caldeira, deve estar sempre acima da tubulação. A água refrigera a superfície de aquecimento da caldeira. A construção da fornalha junto a base, ou no centro da caldeira, pode prevenir problemas como eventual falta de água, aumentando a margem de segurança contra superaquecimento e explosão da caldeira. Em termos gerais, as fogos tubulares tem menores gastos com manutenção. Mas o tratamento químico da água é uma questão importante. Durabilidade, eficiência e segurança estão relacionados com o tratamento químico correto da água de alimentação. Dispositivos de controle garantem o abastecimento de água por meio de uma bomba centrífuga, a vazão deverá ser sempre superior a capacidade de produção da caldeira.

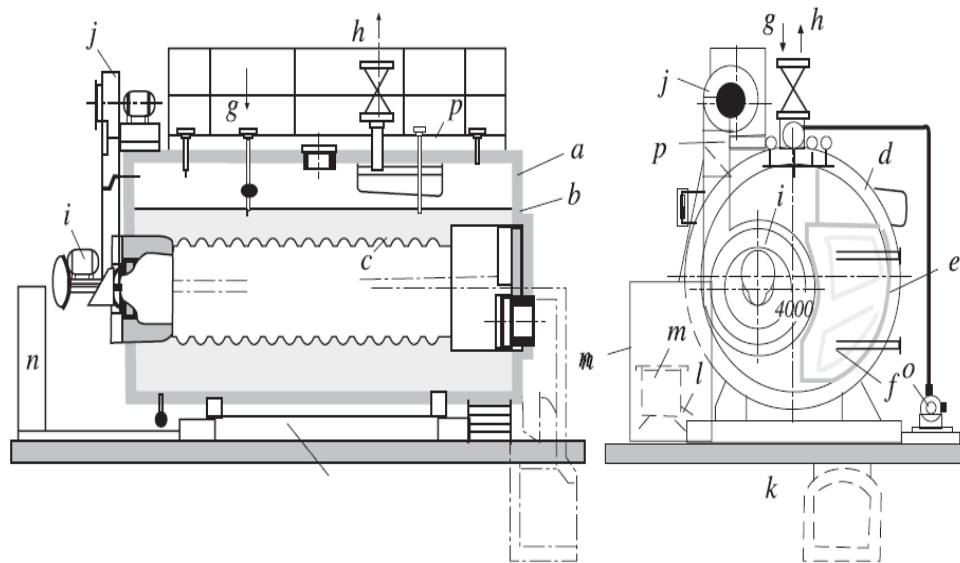
Figura 3 - esquema de uma caldeira fogo tubular.



Fonte: Bazzo (1995).

Nogueira e Rocha (2005), as caldeiras fogo tubulares também chamadas de tubo de fogo, foram os primeiros tipos de caldeiras construídas, os gases de combustão circulam no interior dos tubos em um ou mais passes, a água fica fora dos tubos. Mesmo com caldeiras mais modernas, a fogo tubular ainda é utilizada pela sua facilidade na construção. A Figura 4 apresenta um esquema da caldeira fogo tubular e mostra seus componentes (Nogueira e Rocha 2005).

Figura 4 - Esquema de uma caldeira fogo tubular a óleo.



Autor: Nogueira e Rocha (2005).

Onde:

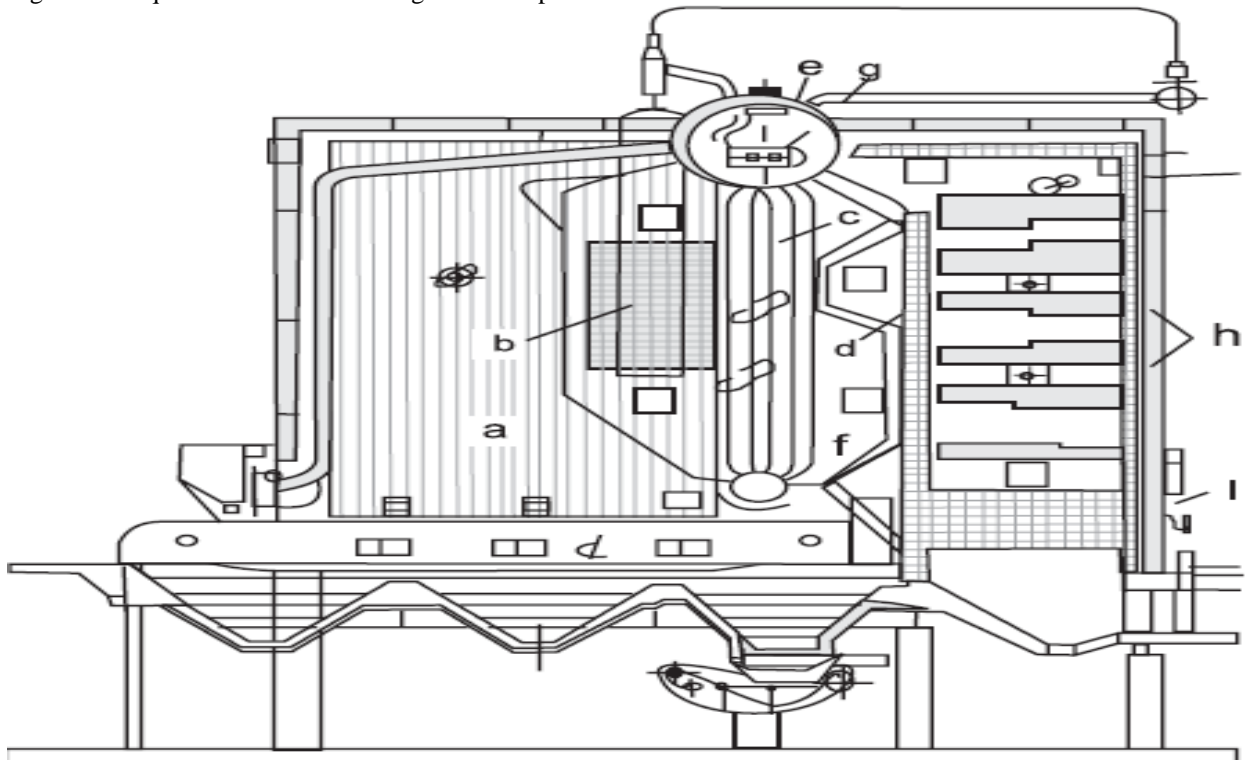
- a - Corpo da caldeira.
- b - Câmara de inversão
- c - Tubo de fogo
- d - Câmara de descarga
- e - Câmara anterior
- f - Ciclone
- g - Chapas de choque
- h - Tubo de descarga
- i - Queimador copo rotativo
- j - Ventoinha
- k - Quadro inferior
- l - Bombas de óleo
- m - Pré-aquecedor de óleo
- n - Painel de comando
- o - Bombas de alimentação
- p - Passarela

2.2.2 Caldeiras água tubulares

Bizzo (2003) As caldeiras água tubulares produzem vapor dentro de tubos, que ligam dois ou mais reservatórios cilíndricos horizontais. Temos o tubulão superior, onde se faz a separação da fase líquida e sólidos em suspensão, e o tubulão inferior, onde é feita a decantação dos sólidos em suspensão. Os tubos podem ser retos ou curvados. Mas pela maior complexidade de construção em relação as fogo tubulares, as água tubulares só são utilizadas quando para maiores capacidades de produção de vapor e pressão. O modo de transferência de calor no interior da caldeira será em duas secções, uma de radiação, onde a troca de calor se dá por radiação direta da chama aos tubos de água, e secção de convecção, onde a troca de calor se dá por convecção forçada. Esse tipo de caldeira não tem limite físico de capacidade, hoje encontramos caldeiras que produzem até 750 t/h de vapor com pressões de até 3450 atm.

Nogueira e Rocha (2005), com a caldeira água tubular foi possível maiores gerações de vapor e pressões elevadas a altas temperaturas. Possui uma secção transversal com dois tambores, um feixe tubular de água é o componente principal de absorção de calor, e no interior temos tubos que a água circula e por fora dos tubos os gases quentes atravessam pela alvenaria, chicanas internas da combustão. A Figura 5 apresenta os componentes da caldeira água tubular:

Figura 5 - Esquema de uma caldeira água tubular para combustível sólido.



Autor: Nogueira e Rocha (2005).

Onde:

- a) câmara de combustão;
- b) superaquecedor;
- c) feixe de tubos;
- d) tubos de queda;
- e) tambor superior;
- f) tambor inferior;
- g) acessórios do tubulão;
- h) economizador;
- i) pré-aquecedor de ar;

2.2.3 Calculo energético das Caldeiras

De acordo com Nogueira e Rocha (2005), o calor que é fornecido é de acordo com o ganho de entalpia (h) da água, dentro de um trocador de calor que é aquecido pelo vapor, o calor que é cedido é o mesmo da variação de entalpia do vapor de entrada com o de saída. Essa equação determina a eficiência da caldeira. A entalpia é uma propriedade termodinâmica dos fluidos, pois o resultado é uma combinação de três propriedades, que são, volume, pressão e energia interna.

A entalpia é basicamente a energia transportada, também associada a um fluido de trabalho. Sendo assim o calor transferido para o vapor é calculado da seguinte forma (Moran e Shapiro, 2009):

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_e - h_s) \quad (1)$$

Onde:

\dot{Q} = Taxa de transferência de calor [kW]

\dot{m} = vazão mássica $\left[\frac{kg}{s}\right]$

h_e, h_s = Entalpia na entrada e na saída da caldeira $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

Segundo Moran e Shapiro (2013), para diferenciar uma máquina térmica devemos calcular o calor que é recebido e transformado em trabalho, assim calculamos a eficiência de uma máquina térmica. A eficiência da máquina é a razão do trabalho efetuado (T), pelo calor da fonte quente (OQ). De acordo com o princípio de conversão de energia e substituindo o valor do trabalho por (Oq- Of). O calor quente (Qq) é a quantidade de calor absorvida e o calor frio (Qf) é a quantidade de calor cedida.

$$N = \left(1 - \frac{Q_f}{Q_q}\right) \times 100 \quad (2)$$

N = Eficiência em %

Qf = calor cedido kJ

Qq = calor absorvido kJ

2.3 Poder calorífico dos combustíveis

Nogueira e Rocha (2005), com a queima de combustível, libera-se energia, onde é calculada como poder calorífico. São definidos dois tipos de poder calorífico, superior, quando a água está na sua forma líquida e inferior, quando a água está na forma de vapor.

Quadro 01 - Poder calorífico inferior para alguns combustíveis.

QUANTIDADE	COMBUSTÍVEL L	PODER CALORIFICO
1 Kg	GLP	11.500 KCal
1 m ³	Gás Natural	9.400 KCal
1 m ³	Gás de Rua	4.200 KCal
1 Kg	Óleo Diesel	10.200 KCal
1 Kg	Carvão	5.000 KCal
1 Kg	Lenha	2.900 KCal
1 Kw	Energia Elétrica	860 KCal
1 Kg	Gasolina	9600 Kcal
1Kg	Alcool	6100 Kcal

Fonte: Nogueira e Rocha (2005).

2.4 Economizadores

Segundo Bazzo (1995), são trocadores de calor com a função de elevar a temperatura da água que alimenta a caldeira. Geralmente são instalados depois dos superaquecedores e antes dos aquecedores de ar. Em geral são construídos de aço carbono com tubos de 40 a 80 mm de diâmetro externo e trabalham com pressões inferiores a 30 bar. A utilização do economizador é aumentada o rendimento térmico da geradora de vapor, mas deverá ser avaliada sua aplicação, pois em casos técnicos a presença do gás SO_3 nos gases de combustão e possível formação de ácido sulfúrico sobre as superfícies frias do economizador. Em termos econômicos deverá analisar o custo benefício, de acordo com o capital de investimento e a energia que será reduzida com a introdução do economizador.

Segundo Pera (1990), quando se obtém um aumento da temperatura antes de introduzi-la na caldeira, resultará em um aumento de eficiência, pois o trabalho permanece mais estável.

2.5 Coletores Solares

Segundo Pereira (2006), o Brasil tem grande potencial para o aproveitamento de energia solar durante todo o ano, por ser um país que está em uma região intertropical. O uso da energia solar traz benefícios financeiros a longo prazo e benefícios ambientais, já que se trata de uma energia limpa, ou seja, renovável. O atlas brasileiro de energia solar tem como objetivo realizar um levantamento de informações e dados da disponibilidade de energia solar no território brasileiro, com experiência e dados extraídos a 10 anos de imagens de satélite geoestacionário.

De acordo com Salomão (2006), a quantidade de coletores solares vai variar de acordo com as condições climatológicas e sua instalação deverá ser realizada corretamente, caso contrário poderá influenciar na eficiência do equipamento. Entretanto realizar aumentos indefinidos da área do coletor não significa que aumentará infinitamente a temperatura do sistema.

Segundo Salomão (2006), todo coletor solar é um trocador de calor, o sol penetra no equipamento transferindo calor para água, essa água dentro do coletor está constantemente fazendo a retirada do calor absorvido pelo coletor. Desse modo a água também pode ser considerado um refrigerante do coletor solar. Para o coletor estar em perfeito funcionamento, ele nunca deveria esquentar demais, isso é sinal de que o coletor não está transferindo energia para água, já que a sua função é de apenas transferir o calor recebido para água contida no recipiente.

De acordo com Salomão (2006), o cuidado com a qualidade da água é de grande importância, pois uma água imprópria poderá ocasionar corrosão no reservatório térmico ou até mesmo nas tubulações de cobre, o que poderá danificar o equipamento. Uma água que é para uso de consumo humano não necessariamente é adequada para entrar em contato com certas ligas ou metais.

Segundo Salomão (2006), os coletores solares tem como principais componentes, as aletas, vidro e tubulação; as aletas são constituídas de alumínio ou de cobre e são responsáveis pela absorção da radiação solar, transmitindo para a tubulação a energia absorvida, onde entra em contato com água que será aquecida, os vidros são responsáveis por manter o calor dentro dos coletores, realizando uma boa vedação.

2.5.1 Coletor solar soletrol max 2,00m² vertical

De acordo com soletrol (2018), o coletor solar soletrol max 2,00m² vertical se destaca pelo seu design e modernidade, além de ser um produto de última tecnologia, desenvolvido com materiais nobres, como cobre e o alumínio. O coletor possui um sistema atenuante de congelamento por válvula ou por circulação (bombeamento), controladores digitais de temperatura, registro misturador solar (inserido nos conjuntos ou como acessórios avulso) e válvula de desnível negativo (bloqueadora de fluxo reverso). com custo de 857,67 reais por placa. Pode ser instalado em quaisquer locais, sempre observando o local com maior incidência solar, para que se tenha uma melhor eficiência do coletor.

Figura 6 - Coletor solar max 2,00m² vertical.



Fonte: Soletrol (2016).

2.5.2 Manutenção do coletor

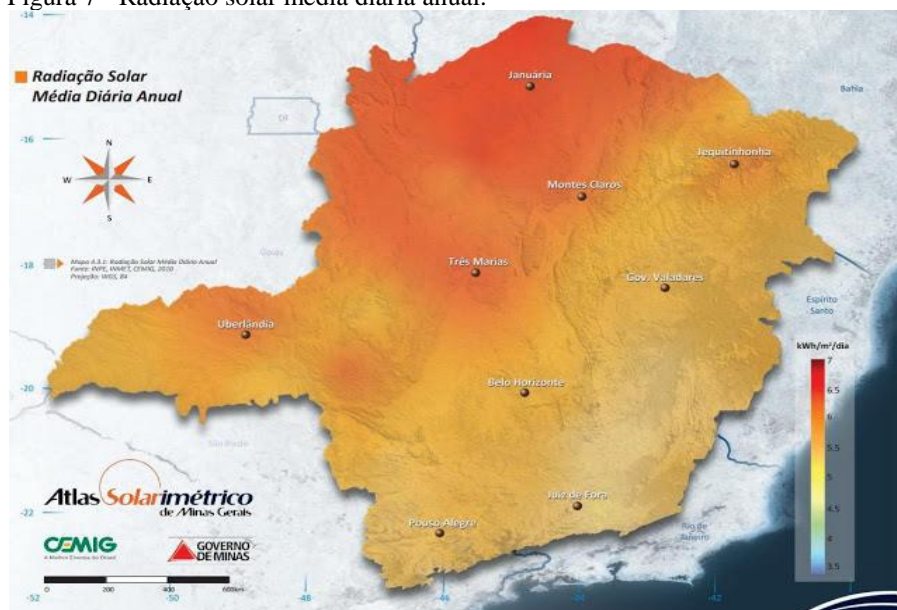
De acordo com Salomão (2006), o inverno é a estação mais crítica em termos de desempenho dos coletores, pois além dos de recebermos menor radiação solar, partículas solidas se formam na atmosfera, como por exemplo poeira, fuligem. O que acaba sendo depositado nos vidros do coletor solar, inibindo a ação da radiação no coletor. Por este motivo recomendasse que seja feito uma limpeza periódica nos coletores, sempre no período da manhã para evitar choques térmicos e que o vidro se rompa.

Segundo Salomão (2006), é recomendado realizar a drenagem de toda água do sistema para retirar as impurezas na parte inferior do coletor e do reservatório. Após o procedimento encha novamente o reservatório e confira se a água quente está retornando do coletor para o reservatório. Todo processo deverá estar na mesma temperatura, caso contrário, deverá abrir novamente o retorno de água quente e retirar a água por aproximadamente 2 minutos e observar se sairão bolhar de ar, enfim conecte novamente a união.

2.6 Radiações solares no estado de Minas Gerais

De acordo com a Cemig (2013), o estado de Minas Gerais tem uma boa radiação solar que varia de 4,5 a 6,5 kwh/m². Os valores máximos ocorrem no norte do estado e os mínimos na região sudeste, onde temos uma maior altitude.

Figura 7 - Radiação solar média diária anual.



Fonte: Cemig (2013).

2.7 Radiações solares no Brasil.

Segundo Pereira (2006), o litoral norte de Santa Catarina apresenta a menor radiação solar global do Brasil que é de 4,25 kWh/m² e a maior é no norte da Bahia de 6,5 kWh/m². Assim a radiação no Brasil varia de 4.200 a 6.700 kWh/m²/ano, superior a outros países que utilizam esse tipo de energia renovável, como Alemanha que tem de 900 a 1.250 kWh/m²/ano; França que tem de 900 a 1.650 kWh/m²/ano e Espanha que tem de 1.200 a 1.850 kWh/m²/ano. Considerando a figura (7) podemos analisar que os maiores índices de radiação solar estão nos estados; Bahia, Piauí, Paraíba, Rio Grande do Norte, Tocantins, Goiás, Minas Gerais e São Paulo.

Figura 8 - Radiação solar no Brasil.



Fonte: Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA).

3 METODOLOGIA

Para realizar esse trabalho foi feito uma pesquisa bibliográfica e um estudo de caso em uma caldeira fogo tubular, modelo FOUR, com a mais alta eficiência e baixas emissões e durabilidade extrema, capaz de uma produção de 10.000 Kg de vapor por hora e o combustível utilizado é gás natural que possui um poder calorífico de 9400 Kcal/m³ e gerando vapor saturado com uma temperatura de 182 °C, assim conseguimos determinar a quantidade de energia que está caldeira consome.

Com a utilização de um sistema de coletores solares para pré aquecer a água que terá entrada na caldeira, onde normalmente entraria com uma temperatura ambiente de 20°C, já com a utilização do sistema de coletores e de acordo com o fabricante, essa temperatura subirá para 55°C, fazendo com que a água ganhe energia e assim diminuindo a quantidade de combustível utilizado para geração de vapor.

Figura 9 - Caldeira FOUR.



Fonte: Steammaster.

Figura 10 - Características da caldeira FOUR.

	FOUR	UNIDADE
Modelo Steammaster	FOUR	
Produção de vapor	10.000	Kg/h
Pressão máxima de Operação (PMO)	10	Kgf/cm ² (g)
Pressão máxima de trabalho admissível (PMTA)	10,5	Kgf/cm ² (g)
Pressão de teste hidrostático	16	Kgf/cm ² (g)
Temperatura normal da água de alimentação	20	° C
Capacidade térmica (output)	6.437.418	Kcal/h
Carga térmica (input)	6.997.193	Kcal/h
Superfície de aquecimento da caldeira	278	m ²
Entalpia do vapor	664	Kcal/Kg
Combustível	Gás Natural	
PCI do combustível 1	9.065	Kcal/ Nm ³
Consumo Máximo a 100% (Para água temp. normal)	772	Nm ³ / h
Qualidade do vapor	Saturado	
Temperatura do Vapor	182	° C
Rendimento térmico	92%	

Autor: Steammaster.

4 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Com o estudo das caldeiras e dos economizadores solares, chegamos ao resultado de que com a utilização dos economizadores solares, alcançamos uma considerável redução de consumo de combustível nas caldeiras e um aumento de 5,43% na sua eficiência energética.

4.1 Gastos energéticos da caldeira sem a utilização de coletores solares

Todas caldeiras são consideradas trocadores de calor, para isto as caldeiras trabalham com uma pressão superior à da atmosfera. Deste modo aquecendo a água em seu interior devido as queimas dos combustíveis utilizados, o que se faz com que a água ganhe energia, assim alcançando o objetivo de gerar de vapor. O projeto de uma caldeira visa a máxima absorção de energia para ter a mais alta eficiência. O calor gerado pelas queimas dos combustíveis é transmitido para a água através de convecção, radiação e condução. Para nosso estudo utilizaremos a caldeira modelo FOUR com produção de vapor de 10.000 kg/h, o vapor terá uma saída da caldeira à 182 °C, para encontrarmos os gastos energéticos da caldeira, levaremos em consideração valores de entalpia da água de entrada e de saída da caldeira, de acordo com o fabricante a temperatura normal da água de alimentação será de 20 °C e temperatura de vapor de saída de 182 °C.

Para calcular a energia transferida pela caldeira para o fluido de trabalho será utilizado a equação (1):

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_s - h_e) \quad (1)$$

Onde:

\dot{Q} = Taxa de transferência de calor [kW]

\dot{m} = vazão mássica $\left[\frac{kg}{s}\right]$

h_e, h_s = Entalpia na entrada e na saída da caldeira $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

Entalpia da Água a 20°C (entrada): 20 kcal/kg;

Entalpia do Vapor a 182°C (saída): 664 kcal/kg;

Vazão mássica: 10.000 Kg/h.

Calculando:

$$\dot{Q} = 10.000 (664 - 20)$$

$$Q = 6.440.000 \text{ Kcal/h}$$

Considerando que a caldeira tenha um funcionamento de 24 horas por dia, em um dia de funcionamento a caldeira transfere 154.560.000 Kcal por dia, sendo assim em um mês transfere 4.636.800.000 Kcal por mês.

4.2 Consumo de combustível na caldeira

Considerando que a caldeira utilize gás natural como combustível com um custo médio de R\$ 2,80 reais por m³ e com um poder calorífico de 9400 Kcal/m³. Pode se calcular o consumo da caldeira:

$$\text{Consumo de combustível} = 6.440.000 / 9.400.$$

$$\text{Consumo de combustível} = 685,1 \text{ m}^3 \text{ de gás natural / hora.}$$

A caldeira apresenta um consumo de 685,1 m³ de gás natural por hora de trabalho.

Custo do consumo de gás: $685,1 \text{ m}^3/\text{hora} \times 2,80 \text{ reais} / \text{m}^3 = 1.918,29 \text{ reais/h}$.

Considerando que a caldeira tenha um funcionamento de 24 horas por dia, em um dia de funcionamento a caldeira tem um consumo de R\$ 46.038,96 reais por dia, sendo assim terá um gasto R\$ 1.381.168,8 reais por mês.

4.3 Custo do investimento do sistema de coletor solar

Foi realizado um orçamento para aquecer 10.000 litros de água de uma caldeira são necessários 10 reservatórios, cada com capacidade de 1.000 litros e para cada reservatório são necessários 50 Coletores Solar Soletrol Max 2,00 m² Vertical. Onde o sistema de coletores aumentará a temperatura da água de alimentação para 55 °C de acordo com fornecedor. Onde cada reservatório tem um custo de R\$ 3.588,22 reais e cada coletor o custo de R\$ 857,67 reais. Assim o valor total do investimento será de R\$ 78.765,7 reais.

4.4 Gastos energéticos da caldeira com a utilização do coletor solar

Utilizando o coletor a temperatura de alimentação aumenta para 55 °C o que é equivalente à um aumento na entalpia (h_e) para 55 Kcal/Kg. Utilizado a equação (1):

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_s - h_e)$$

(1)

Onde:

$\dot{Q} = \text{Taxa de transferência de calor [kW]}$

$\dot{m} = \text{vazão mássica } \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$

$h_e, h_s = \text{Entalpia na entrada e na saída da caldeira } \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$

Entalpia da Água a 20°C (entrada): 55 kcal/kg;

Entalpia do Vapor a 182°C (saída): 664 kcal/kg;

Vazão mássica: 10.000 Kg/h.

Calculando:

$$\dot{Q} = 10.000 (664 - 55)$$

$$Q = 6.090.000 \text{ Kcal/h}$$

Considerando que a caldeira tenha um funcionamento de 24 horas por dia, em um dia de funcionamento a caldeira transfere 146.160.000 Kcal por dia, sendo assim em um mês transfere 4.384.800.000 Kcal por mês.

4.5 Consumo de combustível na caldeira

Considerando que a caldeira utilize gás natural como combustível com um custo médio de R\$ 2,80 reais por m³ e com um poder calorífico de 9400 Kcal/m³. Pode se calcular o consumo da caldeira:

$$\text{Consumo de combustível} = 6.090.000 / 9.400.$$

$$\text{Consumo de combustível} = 647,87 \text{ m}^3 \text{ de gás natural / hora.}$$

A caldeira apresenta um consumo de 647,87 m³ de gás natural por hora de trabalho:

$$\text{Custo do consumo de gás: } 647,87 \text{ m}^3/\text{ hora} \times 2,80 \text{ reais / m}^3 = 1.814,04 \text{ reais/h.}$$

Considerando que a caldeira tenha um funcionamento de 24 horas por dia, em um dia de funcionamento a caldeira tem um consumo de R\$ 43.536,96 reais por dia, sendo assim terá um gasto de R\$ 1.306.108,8 reais por mês.

4.6 Custo do investimento e tempo de retorno

De acordo com os cálculos realizados teremos uma economia de combustível considerável, principalmente quando analisada a longo prazo. Com o custo do combustível da caldeira sem a utilização do coletor sendo subtraído pelo custo do combustível com a utilização do coletor teremos:

$$\text{Economia por hora: } 1.918,29 - 1814,04.$$

$$\text{Economia por hora: } 104,25 \text{ reais.}$$

Economia diária: 2.502,00 reais.

Economia Mensal: 75.060,00 reais.

Economia Anual: 900.720,00 reais.

De acordo com os cálculos realizados, o investimento do sistema de coletores solares, desprezando os gastos com instalação conseguimos ter o retorno do investimento em apenas 32 dias.

4.7 Melhoria na eficiência do sistema

Para realizar o cálculo da eficiência, foi utilizado a formula padrão da eficiência de sistemas com os gastos energéticos em ambos os casos, foi obtido valor em porcentagem.

Gasto energético da caldeira: 6.440.000 Kcal/h

Gasto energético da caldeira com utilização dos coletores = 6.090.000 Kcal/h

Aplicando assim a fórmula número (2):

$$N = \left(1 - \frac{6.090.000}{6.440.000}\right) \times 100 = 5,43 \% \quad (3)$$

Apresentando um aumento de 5,43 % na eficiência.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho propõe a utilização de coletores solares em uma caldeira que produz 10.000 Kg por hora de vapor apresentando um consumo de combustível de 685,1 m³ de gás natural por hora. Considerando que a caldeira ficara em funcionamento 24 horas por dia, gera um custo aproximado de R\$ 1.381.168,8 reais por mês. Com a utilização dos coletores solares, comprova se um aumento na eficiência de 5,43 % e gerando uma economia 75.060,00 reais por mês de combustível. Sendo necessário um investimento de R\$ 78.765,7 reais. Para utilização dos coletores, desprezando a instalação do equipamento. Obtendo o retorno do investimento gasto com o equipamento em 32 dias.

REFERÊNCIAS

- ATLAS SOLARIMÉTRICO DE MINAS GERAIS. Belo Horizonte: Cemig, 2013.
- ANDRADE, João Carvalho; MCQUAY, Mardson Queiroz. **Princípios de Combustão Aplicada**. 1. ed. São Paulo: Verus, 2007.
- BAZZO, Edson. **Geração de vapor**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 1995.
- BIZZO, Waldir. Geradores de vapor. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP4.pdf>>. Acesso em: 02 Jul. 2018.
- BORGNAKKE, Claus e SONNTAG, Richard. **Fundamentos da termodinâmica**. 8. ed. Michigan: Ann Arbor, 1997.
- MORAN, Michael e SHAPIRO, Howard. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- NOGUEIRA, Luiz Augusto e ROCHA, Carlos. **Eficiência Energética no Uso de Vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.
- PERA, Hildo. **Geradores de vapor**. 2. ed. São Paulo: Fama, 1990.
- PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; LUNA DE ABREU, Samuel; RUTHER, Ricardo. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1.ed. São José dos Campos: Swera, 2006.
- SALOMÃO DE ANDRADE, Alexandre. **100 Dicas Técnicas Aquecedores Solares de Água**. 1. ed. São Manuel: Fundação Universidade do Sol, 2005.
- SOLETROL, Coletor Solar Soletrol Max. Disponível em: <<http://www.soletrol.com.br/produtos/coletores-solares/aquecedor-solar-linha-max/>>. Acesso em: 15 Jul. 2018.
- Tiba, CHIGUERU. **Atlas solarimetrico do brasil**. 2. ed. Recife: Universidade da UFPE, 2000.