

EMPREGO DA ENERGIA HELIOTÉRMICA PARA O PRÉ-AQUECIMENTO DE ÁGUA PARA CALDEIRAS

LUCENA, A.S.¹; MATIAS, D.R.²; SANTOS, V.E.³; MARÇAL, R. C.⁴

^{1,2,3,4}Centro Universitário de Anápolis – UniEvangélica – Av. Universitária Km 3,5 – Cidade Universitária – Anápolis-GO – CEP: 75083-515

aquilasalgado@live.com¹; dayvitmatias@hotmail.com²; vinieudes@hotmail.com³; roctb_25@hotmail.com⁴

Resumo: A alta do consumo de energia e a utilização de combustíveis fósseis vêm gerando inúmeras discussões quanto a maneiras alternativas para redução de consumo e geração de energia de maneira sustentável, dentre elas pode-se destacar a energia solar. O uso de energia solar na indústria ainda é baixo se comparado ao consumo energético total, sendo que, os sistemas de energia solar podem contribuir com uma parte da energia total requerida pelas indústrias ou até supri-las por completo. O objetivo deste estudo é demonstrar através de uma análise de dados reais a viabilidade de um sistema de pré-aquecimento de água em caldeiras industriais, visando a redução no consumo de combustível da caldeira utilizando a energia heliotérmica. O sistema será composto por coletores solares que captarão a energia solar e transmitirão a mesma para a água de reposição da caldeira. O estudo será baseado nos dados pertinentes a uma caldeira com uma produção média de vapor de 6,5 ton/h, retorno de condensado de 4,553 m³/h com uma temperatura de 75°C e a temperatura da água de reposição a 25°C. Com isso, poderá ser definido parâmetros de aplicação, viabilidade e redução de custos produtivos, tornando uma excelente alternativa para a diminuição do consumo de combustível e podendo aumentar a eficiência da caldeira.

Palavras chave: coletor solar; caldeiras; combustíveis;

Abstrat: The high energy consumption and the use of fossil fuels has been generating countless discussions about alternatives for reducing consumption and generating sustainable energy, among which solar energy can be highlighted. The use of solar energy in industry is still low, compared to total energy consumption, and solar energy systems can contribute a part of the total energy required by industries or even completely supply them. The objective of this study is to demonstrate, through an analysis of real data, the viability of a system of preheating water in industrial boilers, aiming at a reduction of fuel consumption of the boiler using heliothermic energy. The system is composed of solar collectors that will capture the solar energy and transmit it to the boiler water. The study is based on data suitable for a boiler with an average steam output of 6,5 tonnes / h, condensate return of 4,553 m³ / h with a temperature of 75 ° C and a water temperature of 25 ° C. With this, it can be defined as a parameter of application, feasibility and reduction of productive costs, making it an excellent alternative to reduce fuel consumption and increase the efficiency of the boiler.

Keywords: solar collectors; boilers; fuels;

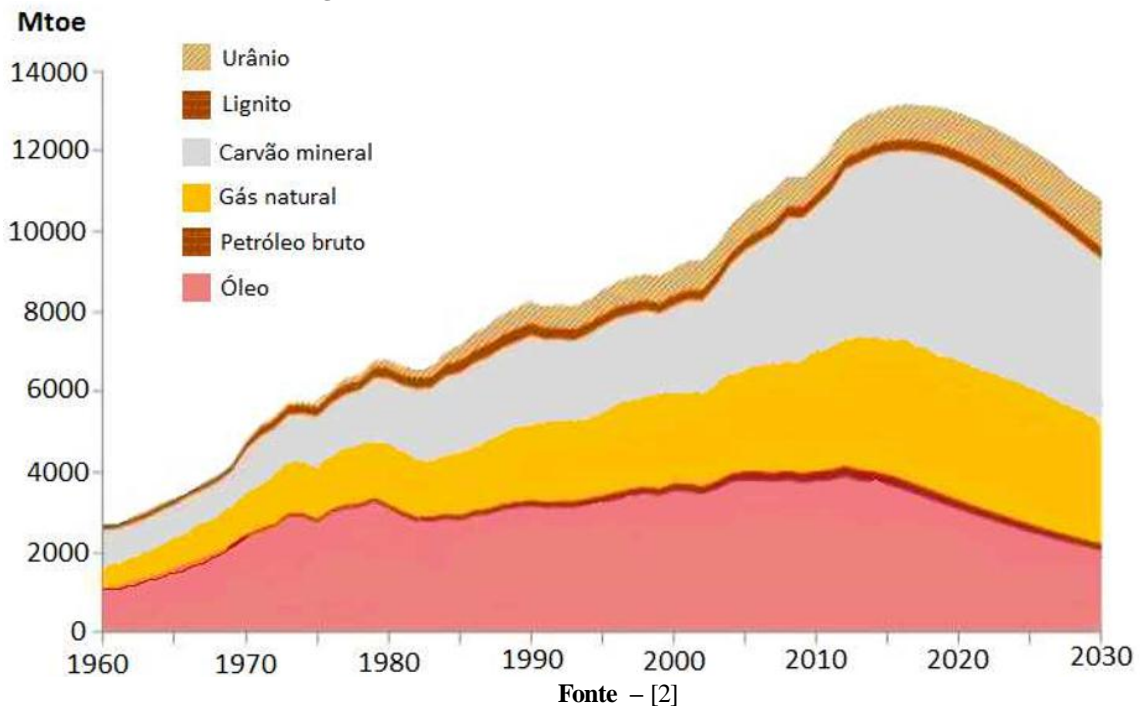
1. Introdução

O aumento considerável da demanda de energia nas últimas décadas por consequência do aumento da população mundial, fez com que as fontes de energias renováveis, se tornassem uma alternativa para substituir a utilização de fontes de energia não renováveis como: petróleo, carvão mineral e gás natural. Essas fontes de

energia estão disponíveis na natureza com certa abundância e com o passar dos anos elas foram sendo exploradas cada vez mais, mas por se tratarem de fontes de energia não renováveis, um dia elas chegarão ao fim[1].

Conforme pode ser visto na Figura 1, a partir de 2020 elas começarão a entrar em declínio na natureza, sendo assim, novas fontes de energia alternativas estão sendo implementadas para suprir as necessidades humanas e garantir um ambiente sustentável no planeta[1].

Figura 1 - Oferta mundial de combustíveis fósseis e urânio



A figura 1 representa a alta da utilização dos combustíveis fósseis desde a década de 60, é possível notar como ao longo dos anos o uso desses combustíveis aumentou com grandes proporções, analisando que até os dias atuais o ponto máximo de exploração foi atingido, e é possível projetar o declínio dessas fontes durante os próximos anos.[2]

Em todo o mundo, as grandes empresas trabalham com energias derivadas de várias fontes, dentre essas pode ser citado as termelétricas, energias essas conseguidas a partir da queima de combustíveis provenientes do petróleo, biomassas, gás natural, carvão entre outros[3].

A energia na qual é consumida pelo homem no mundo inteiro é gerada por aproximadamente 80% da queima dos combustíveis fósseis. A utilização em grande escala desses recursos não renováveis e poluentes é diretamente responsável pela emissão de gases tóxicos na atmosfera, ocasionando a alteração do clima mundial e acidificação de águas[4].

“A obtenção de eletricidade por meio de combustíveis fósseis é a principal fonte de óxidos de enxofre (SO_x,SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x, NO e NO₂), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), monóxido de carbono (CO) e particulados (entre eles o chumbo Pb) (Goldemberg, 2003)”[4].

A geração de energia por meio desses compostos se mostra como um desafio para o desenvolvimento sustentável do planeta para assim, diminuir a dependência dos combustíveis fósseis e utilizar apenas fontes de energias renováveis[5].

Nas usinas térmicas, a biomassa faz parte das várias fontes renováveis nas quais se compõe no grupo de fontes em expansão, utilizando resíduos de madeira e principalmente o bagaço da cana de açúcar. Esse último, tem se mostrado com um grande potencial de geração de energia elétrica nos estados de Goiás, São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Mato Grosso do Sul, estando assim próximos aos grandes centros consumidores de energia[3].

A biomassa é um tipo de combustível com grande aplicação. Este combustível derivado de matérias de origem vegetal ou animal se mostra como uma das principais fontes de energia doméstica nos países em desenvolvimento, principalmente nas regiões rurais onde se faz o uso da biomassa na forma de carvão, madeira, esterco de animais e resíduos agrícolas[6].

Outro local que merece destaque por utilizar a biomassa são as usinas de cana-de-açúcar que utilizam o bagaço da cana como fonte de energia para as caldeiras. Essas usinas tendem a trabalhar com a biomassa, devido ao menor custo de utilização, além da vantagem de ser um combustível renovável. Já os combustíveis derivados do petróleo emitem uma quantidade maior de poluentes, mas apresentam maior facilidade para manuseio e armazenamento[7].

A legislação define padrões de emissões de poluentes e, é nesse momento que uma análise deve ser levada em consideração, a fim de definir qual o melhor combustível a ser aplicado em determinada situação. O importante é que a utilização desses combustíveis esteja dentro dos padrões da legislação referentes a níveis de emissão de poluentes [8].

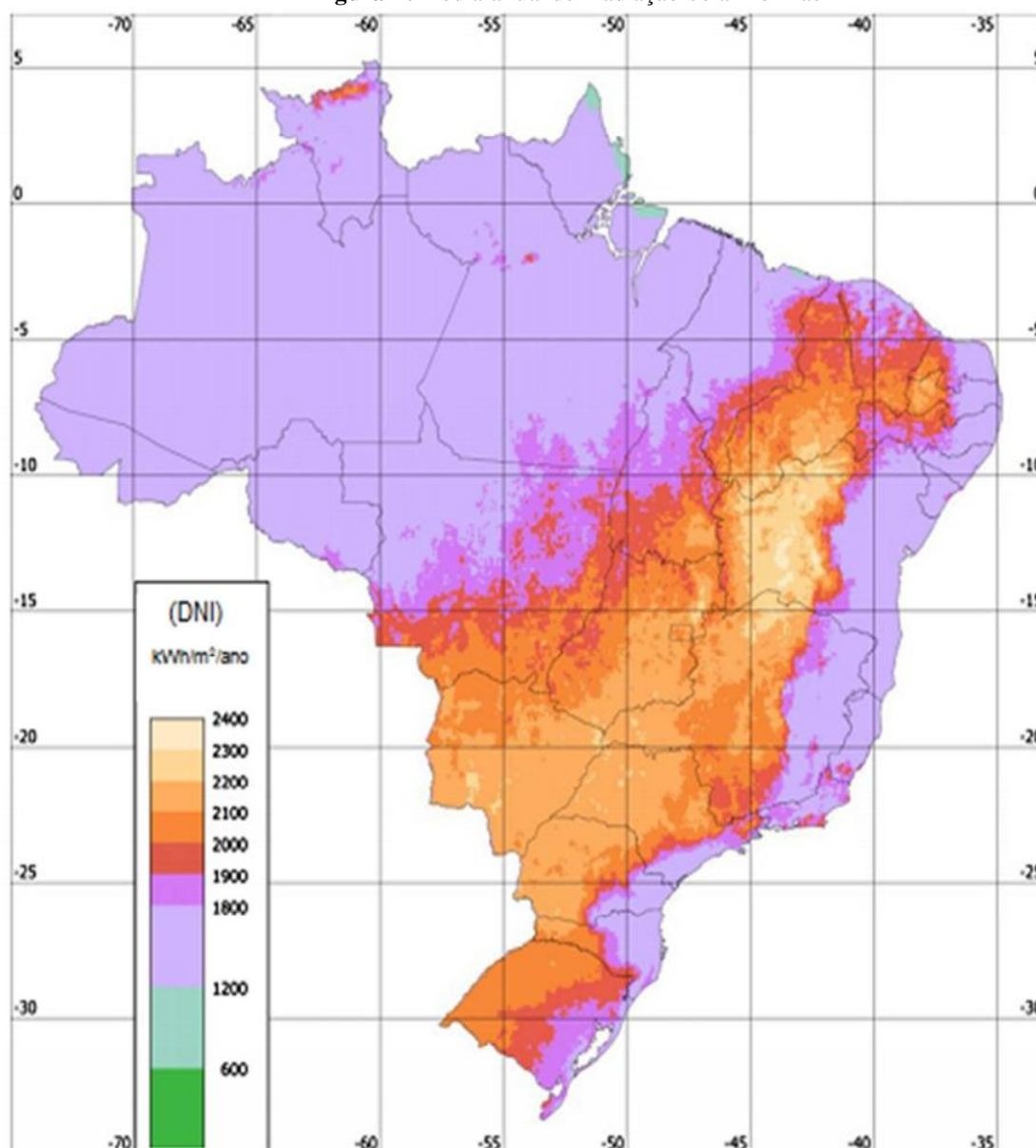
O avanço da tecnologia traz consigo novas possibilidades para o desenvolvimento sustentável favorecendo assim, o surgimento de novas alternativas para geração de energia de maneiras sustentáveis [9].

Dentre as energias alternativas que estão presentes no Brasil, a energia heliotérmica se apresenta de uma forma pouco representativa, porém há uma expectativa para o crescimento da mesma com o passar dos anos. As centrais de geração de energia heliotérmica ainda não estão inclusas ao Plano Decenal de Expansão de Energia, porém deve ser ressaltado as vantagens dessa tecnologia devido a possibilidade do armazenamento térmico de energia, o que a torna bem vista para substituição ou complementação da energia fotovoltaica, visto que a mesma não é capaz de gerar energia no período noturno[3].

Apesar do Brasil contar com várias áreas favoráveis para o desenvolvimento dessa energia devido ao alto índice de irradiação solar, conforme pode ser notado na Figura 2, a utilização da geração de energia por meio de hidrelétricas se torna mais vantajoso devido aos custos relacionados a geração por meio das energias termosolares, o que no início acabou desestimulando o investimento nessa área. Porém nos últimos anos vem sendo implementadas no país programas de incentivo além de financiamento para o desenvolvimento de projetos nessas áreas[10].

O princípio de funcionamento da energia heliotérmica consiste em transformar a radiação solar em energia elétrica. Essa energia tem grande potencial no Brasil, conforme ilustra a Figura 2, que representa a média anual de irradiação solar no território brasileiro. As faixas no mapa com tonalidade entre vermelho e amarelo representam os locais de maior incidência e conseqüentemente maior potencial, já as faixas com tonalidade lilás a verde representam os locais com menor incidência solar[5].

Figura 2. Média anual de irradiação solar no Brasil



Fonte - [5]

A energia heliotérmica também é conhecida por *Concentrating Solar Power* (CSP), que é um processo no qual acumula calor originado pelos raios solares. Para que este processo ocorra, é utilizado uma superfície refletora para refletir os raios solares e concentrá-los em um único ponto de captação, armazenando assim o calor para geração de energia mecânica e por fim energia elétrica. O calor que é captado aquece o fluido térmico, para assim ter a geração de vapor. A partir desse momento, a usina heliotérmica irá ter seu funcionamento similar a uma termoelétrica, pois o vapor gerado será utilizado para transmitir movimento para uma turbina que por fim, produzirá energia elétrica[11].

1.1 Coletores Solares

Coletores solares são basicamente componentes que possuem a capacidade de transformar a radiação solar em energia térmica transmitindo-a para um fluido, seja ele líquido ou gasoso[12].

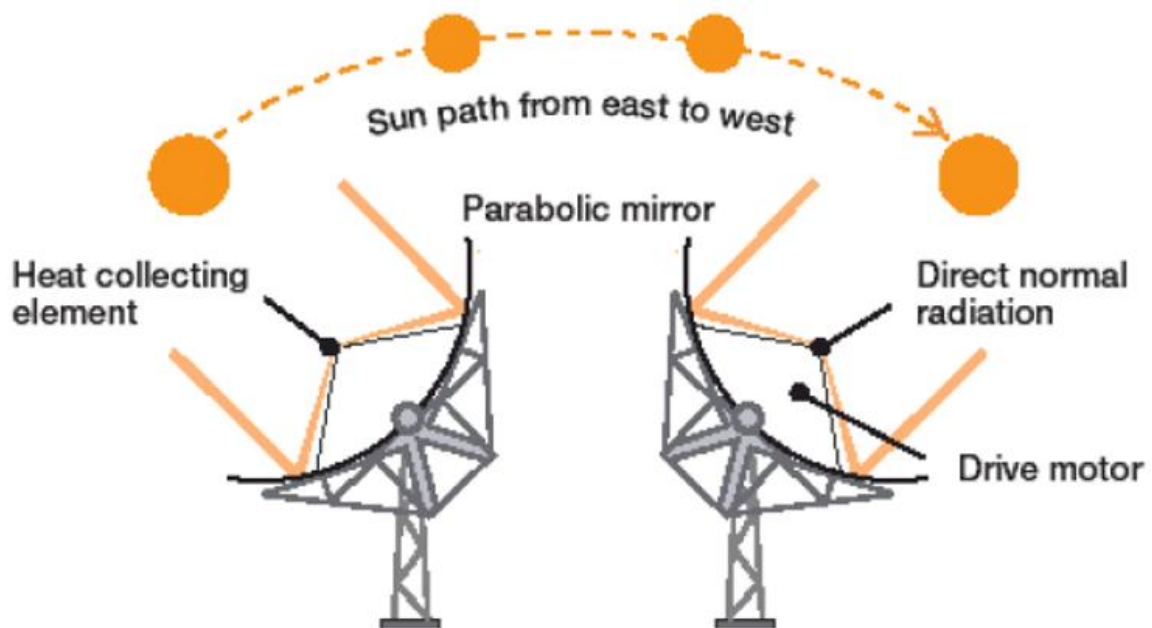
Eles são divididos em concentradores e não concentradores. Os não concentradores são mais aplicados em instalações de baixa temperatura, visto que a sua área de interceptação e absorção da radiação são as mesmas. Já os concentradores são mais indicados em casos de temperaturas mais elevadas, em que a sua área refletora é direcionada para um determinado ponto onde está o fluido que deve ser aquecido[12].

Dentre essas classificações citadas, eles também se subdividem em rastreadores e estacionários. Os estacionários, como o nome já sugere, são fixos em um local o tempo inteiro e tem como desvantagem não aproveitarem o período de insolação por completo, sendo menos eficiente que os coletores rastreadores, que tem a capacidade de se movimentar e acompanhar o sol durante todo o período podendo se mover em até dois eixos[12].

O coletor que se move no eixo leste-oeste tem como vantagem não se mover tanto durante o dia e de aproveitar por completo a insolação do meio dia, porém ao amanhecer e ao entardecer ele perde eficiência devido os raios solares abrangerem mais a superfície coletora. Já o coletor que tem como movimentação o eixo norte-sul é ao contrário, durante o amanhecer e o entardecer é que tem seu maior rendimento e no período do meio dia seu menor rendimento[12].

A escolha do tipo de rastreamento se dará por conta da demanda necessária, se é necessário mais energia durante uma estação do ano ou durante as horas do dia, visto que o rendimento de um coletor norte-sul é um pouco maior durante o período de um ano se comparado à um coletor leste-oeste, porém seu rendimento no inverno é menor. Na Figura 3 está representando um sistema de rastreamento solar com sentido leste-oeste[12].

Figura 3. Representação de coletor solar com rastreamento leste-oeste



Fonte - [12]

1.2 Caldeiras

As primeiras caldeiras surgiram no século 17, Newcomen desenvolveu um equipamento no qual tinha a finalidade de bombear água. Esse fato se dava por que o equipamento usava o vapor para transmitir movimento, a sua caldeira era apenas um reservatório esférico no qual obtinha um aquecimento diretamente no seu fundo, a qual também ficou conhecida como caldeira de Haycock[13].

No final do século 18 para o início do século 19, ocorreu os primeiros modelos de caldeiras com tubos de água, John Stevens foi quem construiu o primeiro barco movido a vapor. Em 1880, Alan Stirling foi o desenvolvedor de uma caldeira com tubos curvados, onde seu conceito básico ainda hoje é utilizado nas aplicações industriais, como em grandes equipamentos[13].

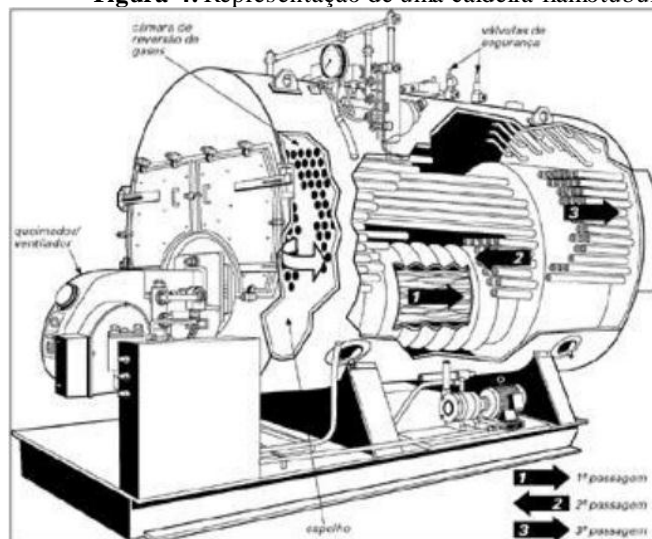
Atualmente existem vários tipos de caldeiras, porém são classificadas basicamente em dois modelos, sendo eles flamotubulares e aquatubulares[13].

Caldeiras flamotubulares representa a maioria das caldeiras, sendo uma derivação das caldeiras antigas que geralmente são utilizadas para pequenas produções de vapor, tendo limites de cerca de 40t/h e pressão máxima de 16 Kgf/ cm². Os gases circulam por dentro dos tubos que, conseqüentemente, vaporizam a água que está por fora dos tubos. Esse processo inteiro acontece numa estrutura cilíndrica na qual é chamada de casco[13].

As caldeiras aquatubulares se tem devido a necessidade de uma maior produção de vapor e pressão para operação. O processo desse tipo de caldeira é inverso ao processo que ocorre nas caldeiras flamotubulares, ou seja, a água fica localizada dentro dos tubos, que posteriormente virá a se vaporizar, e os gases ficam de fora dos tubos[13].

A Figura 4 representa uma caldeira flamotubular. O seu corpo pode ser chamado de casco ou carcaça e a sua construção é feita através de chapas de aço carbono calandradas e soldadas. O seu tamanho é relacionado com sua capacidade de produção de vapor e suas pressões de operação são limitadas de acordo com o diâmetro do corpo. Seus tubos são fixados através de madrilamento e soldagem, o feixe tubular é composto por tubos que absorvem calor dos gases de exaustão usados a fim do aquecimento da água[13].

Figura 4. Representação de uma caldeira flamotubular



Fonte - [14]

A implementação de um sistema inteligente e que faça um bom aproveitamento dos componentes do processo, pode gerar ganhos significativos e uma ampla intensificação de rendimento do equipamento, consequentemente com um maior aproveitamento dos ciclos. Levando-se em conta que o fluido já entra no sistema com uma temperatura elevada, o processo ganhará em eficiência, e assim trará uma economia e rentabilidade ao processo[15].

Quando a água é bombeada em sua temperatura ambiente para a caldeira, o consumo de combustível aumentará, pois será necessário mais calor para que a água atinja a temperatura de evaporação e assim gerar o vapor. Com o sistema de pré-aquecimento esse consumo diminuirá, fazendo com que a água que está entrando na caldeira esteja disponível ainda no estado líquido a uma temperatura próxima da ideal para a geração de vapor utilizando uma energia limpa como o principal meio para pré-aquecimento da água[16].

As caldeiras industriais utilizam diversos combustíveis, sendo que o óleo BPF se destaca sendo o mais utilizado, seguido pela lenha ou cavaco de madeira. Esses combustíveis geralmente são utilizados em caldeiras de grande e pequeno porte [10].

2. Metodologia

A metodologia adotada parte da coleta de dados através de uma coletânea de artigos sobre coletores solares, energia heliotérmica e de uma caldeira industrial de uma indústria farmacêutica situada na cidade de Anápolis – Goiás que não autorizou a divulgação de seu nome, mas colaborou com o fornecimento dos dados do equipamento, que possui uma produção de vapor de 6,5 ton/h, retorno de condensado de 4,553 m³/h com uma temperatura de 75°C e a temperatura da água de reposição a 25°C.

A partir desses dados, serão realizados cálculos para dimensionamento de um sistema de coletores solares que sejam suficientes para elevar a temperatura da água de reposição da caldeira para assim, diminuir o consumo de combustível do equipamento.

Por fim, com esses dados em mãos, serão comparados os gastos com a construção do pré-aquecedor solar, com a redução de custos no consumo de combustível da caldeira e o aumento na eficiência do mesmo.

Espera-se que com o aumento da temperatura de água de reposição, a caldeira ganhe positivamente na sua produção de vapor e diminua o seu consumo de combustível.

3. Dados Iniciais

A caldeira possui uma produção de 6,5ton/h de vapor e retorno de condensado de 4,553 m³/h a 75°C. O sistema de tratamento de água possui uma vazão de 1,447m³/h a 25°C e será essa a água aquecida até o mais próximo possível do ponto de ebulição.

Hoje a água entra na caldeira à uma vazão de 1,667m³/h a 63,5°C devido o retorno de condensado se misturar com a água em temperatura ambiente, tendo um consumo de 354.58 kg/h de combustível.

4. Resultados Preliminares

Primeiramente deve-se saber o ponto de ebulição da água levando em consideração a pressão atmosférica da cidade de Anápolis, pois ela influenciará no ponto de ebulição da água. Pode-se encontrar o ponto de ebulição da água através da expressão 1:[17]

$$P = 1 \cdot e^{-4878 \left(\frac{1}{(T+273)} - \frac{1}{373} \right)} \Rightarrow T = 96.5^\circ\text{C} \quad (1)$$

Em que:

- P = pressão atmosférica na cidade de Anápolis (0,884 atm)
- T = temperatura de ebulição da água em Anápolis

Será levado em consideração que Anápolis possui uma irradiação solar média de 600w/h e que o sistema funcionará somente seis horas do dia, entre as 10h e as 16h devido à maior índice de irradiação e por conta do pré-aquecedor não contar com sistema de rastreamento solar.

O coletor seguirá uma medida pré-estabelecida pelo tamanho da superfície refletora, que será uma chapa de acrílico espelhado, devido ao seu custo benefício, de 3m x 2m. Essa placa será curvada para melhorar a concentração dos raios solares no absorvedor e para auxiliar na diminuição das perdas de temperatura que ocorrem no mesmo.

Através da expressão 2 será calculado a curvatura [17].

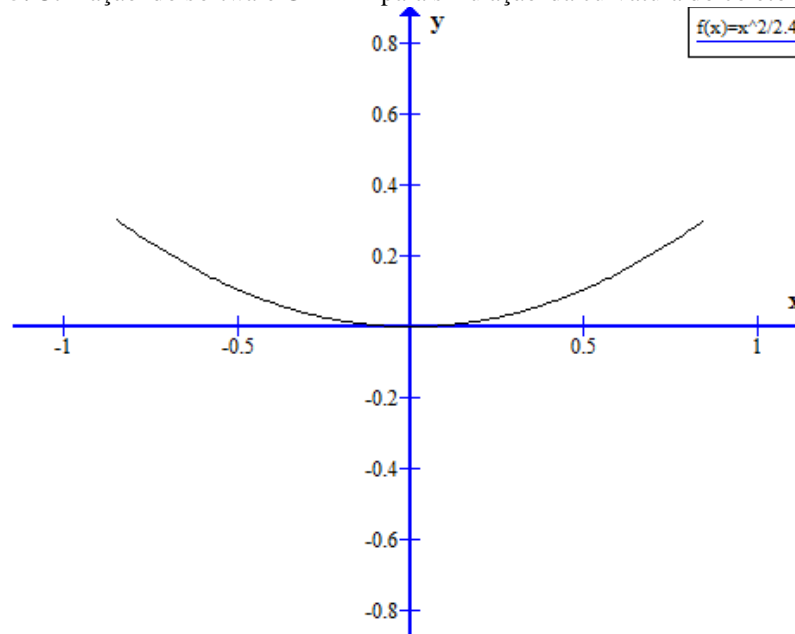
$$y = \frac{x^2}{4f} \quad (2)$$

f = altura do ponto focal (m)

O ponto focal será de 0,5 m por apresentar maior aproveitamento dos raios refletidos pela superfície refletora

Com o auxílio do software GRAPH, como demonstrado na figura 5, pode ser simulado a curvatura da calha com a expressão 2, resultando assim numa área de 5,4m² da superfície refletora.

Figura 5. Utilização do software GRAPH para simulação da curvatura do coletor de calha



Fonte - próprio autor

Sabendo as dimensões da superfície refletora, deve-se calcular a potência absorvida pelo absorvedor utilizando a expressão 3:[17]

$$P_{\text{abs}} = I_d \cdot A_u \cdot \rho \cdot K_{rd} \cdot \alpha_t = 1717,93 \text{ W/h} \quad (3)$$

Em que:

- P_{abs} = Potência absorvida
- I_d = Irradiação solar direta (600 w/m²)
- A_u = Área útil do concentrador (3,64m²)

- ρ = Refletividade do receptor (0,92%)
- K_{rd} = Fração da radiação que chega ao tubo absorvedor (0,95%)
- α_t = Absortividade do absorvedor(0,9%)

Em seguida deve-se calcular a potência perdida pelo absorvedor, serão levadas em consideração apenas as perdas por convecção e radiação conforme a expressão 4:[17]

$$P_{perdida} = h \cdot A_i \cdot (T_{abs} - T_{viz}) + \varepsilon \cdot A_i \cdot \sigma \cdot (T_{abs}^4 - T_{viz}^4) = 191 \text{ W} \quad (4)$$

Em que:

- $P_{perdida}$ = Potência perdida por convecção e radiação (w)
- h = Coeficiente de transferência convectiva (25,27)
- A_i = Área do absorvedor iluminada pela radiação refletida (0,088 m²)
- T_{abs} = Temperatura do tubo absorvedor (369 K)
- T_{viz} = Temperatura ambiente (298 K)
- ε = Emissividade do tubo absorvedor (0,07)
- σ = Constante de Stefan-Boltzmann (5,67E⁻⁸)

Sabendo a potência perdida pelo sistema, deve-se calcular a potência útil do absorvedor utilizando a expressão 5:[17]

$$P_u = P_{abs} - P_{perdida} = 1523,93 \text{ W} \quad (5)$$

A eficiência óptica será calculada através da expressão 6:[17]

$$N_0 = p \cdot K_{rd} \cdot A_t = 79\% \quad (6)$$

Sabendo todas as informações acima, deve-se calcular o rendimento térmico com a expressão 7:[17]

$$N_t = \frac{P_u}{P_{abs}} = 89\% \quad (7)$$

A eficiência do pré-aquecedor se dará através da expressão 8:[17]

$$N_g = N_t \times N_0 = 70\% \quad (8)$$

Utilizando a expressão 9 pode-se calcular a quantidade de calor necessário para elevar a temperatura da água até 96,5°C e assim descobrir a quantidade de coletores necessários para aquecer 1447 L de água[17]:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t = 103.460,5 \text{ kcal} \therefore 20.054,09 \text{ W} \quad (9)$$

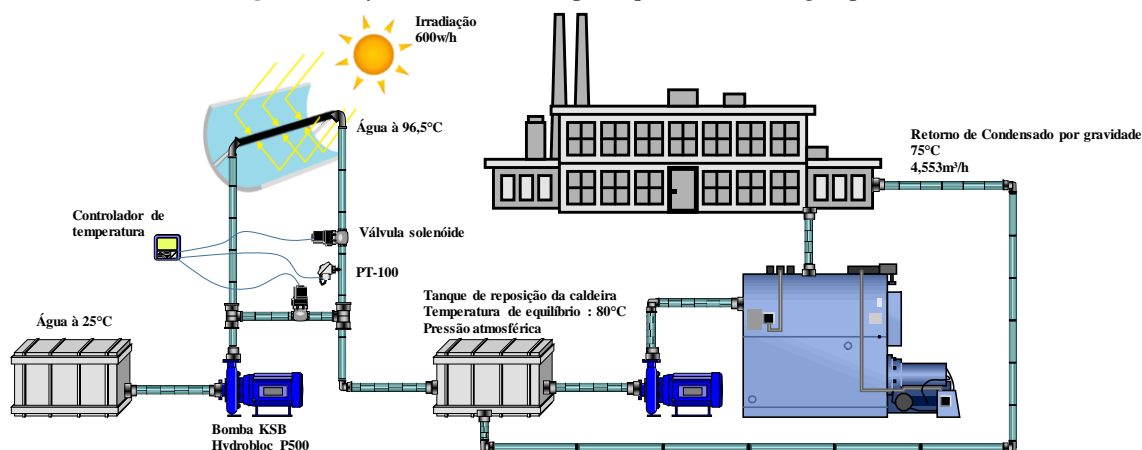
Em que:

- Q = Quantidade de calor (kcal)
- m = Quantidade de água de reposição do tratamento (1447 kg)
- c = Calor específico da água (1cal/g)
- Δt = Variação de temperatura (96,5 °C – 25°C)

Sabendo a quantidade de calor necessária em W/h pode-se descobrir que serão necessários 13 coletores iguais ao dimensionado para suprir às necessidades do sistema.

Como medida controle, o sistema pré-aquecedor contará com duas eletroválvulas comandadas por um controlador de temperatura conectado à um sensor de temperatura PT-100 para garantir que a água não ultrapasse a temperatura de 96,5°C antes de entrar no tanque de reposição, conforme ilustra a figura 06.

Figura 6. Layout do sistema de pré-aquecimento de água para caldeiras



Fonte - próprio autor

4.1 Gastos com a construção do projeto

Para construir o projeto seguindo o layout apresentado na figura 5, se faz necessário a aquisição dos materiais listados na figura 7. As partes listadas vão desde a parte estrutural da calha como tubos de aço carbono, até a parte de controle de temperatura, como válvulas e sensor PT-100. Os preços listados são referentes à cotação realizada em outubro de 2017.

Figura 7. Lista de materiais para construção do pré-aquecedor

LISTA DE MATERIAIS					
QTD		DESCRIÇÃO	VALOR(UND.)	VALOR FINAL	
1	und.	BOMBA KSB HIDROBLOC P500	R\$ 350,00	R\$ 350,00	
45	m	TUBO DE COBRE Ø28mm	R\$ 35,36	R\$ 1.591,20	
132	m	TUBO DE AÇO CARBONO 20mmX20mm	R\$ 9,50	R\$ 1.254,00	
17	und.	LUVA DE COBRE Ø28mm	R\$ 4,88	R\$ 82,96	
14	und.	CHAPA DE ACRÍLICO ESPELHADO 3mX2m	R\$ 160,00	R\$ 2.240,00	
1	und.	SENSOR DE TEMPERATURA PT100	R\$ 750,00	R\$ 750,00	
2	und.	ELETROVÁLVULA NA/NF	R\$ 150,00	R\$ 300,00	
1	und.	CONTROLADOR DE TEMPERATURA	R\$ 100,00	R\$ 100,00	
4	m	MANGUEIRA C/ ISOLAMENTO TÉRMICO Ø28mm	R\$ 100,00	R\$ 400,00	
TOTAL				R\$ 7.068,16	

Fonte - próprio autor

5. Dados termodinâmicos

Segundo a tabela de propriedades termodinâmicas da água líquida comprimida pode-se encontrar uma entalpia de 63,99 kcal, pressão de 25 bar, temperatura de 63,5°C e vazão mássica de 6.500 kg/h. No ponto 2 tem se uma entalpia de 80,64 kcal, pressão de 7 bar, temperatura de 200°C e a vazão mássica de 6.500 kg/h conforme ilustrado na figura 8 [18].

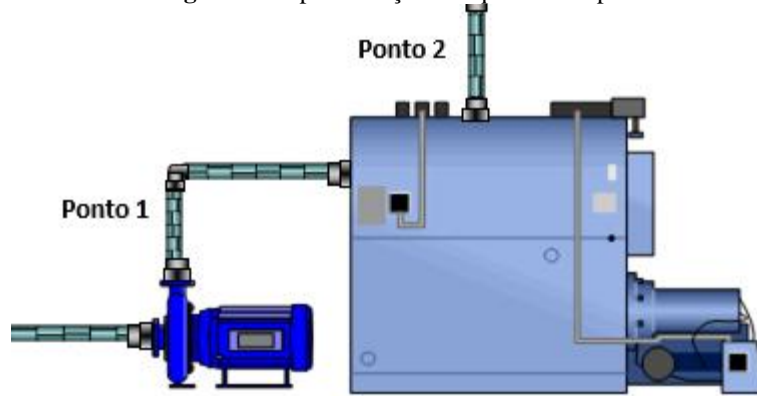
O calor total é uma quantidade de energia transferida da queima do combustível, onde a água que entra em estado líquido é passada para o estado de vapor sobre aquecido, é dado através da expressão termodinâmica 10, em que o calor total pode ser relacionado com a quantidade de combustível queimado para a passagem da água líquida para gasosa[18].

$$Q^{\circ} = m^{\circ} \cdot (\Delta H) \quad (10)$$

Em que:

- Q° = Quantidade de calor
- m° = Vazão Mássica
- ΔH = Variação de Entalpia

Figura 8. Representação dos pontos do processo



Fonte - próprio autor

A figura 9 ilustra as condições atuais da caldeira sem a utilização do pré-aquecedor, enquanto a figura 10 ilustra as condições da caldeira com a utilização do pré-aquecedor.

Figura 9. Tabela de condições atuais

Estado de operação atual da caldeira					
Ponto 1	Temperatura	Pressão	Vazão mássica	Entalpia	Estado
	63,5°C	25 bar	6.500 kg/h	63,99 kcal	Água líquida comprimida
Ponto 2	Temperatura	Pressão	Vazão mássica	Entalpia	Estado
	200°C	7 bar	6.500 kg/h	679,46 kcal	Vapor sobre aquecido
Calor total					4.000.555 kcal/h

Fonte – Próprio autor

Figura 10. Tabela de condições com o emprego do pré-aquecedor

Estado de operação da caldeira com o emprego do pré-aquecedor solar					
Ponto 1	Temperatura	Pressão	Vazão mássica	Entalpia	Estado
	80,25°C	25 bar	6.500 kg/h	80,64 kcal	Água líquida comprimida
Ponto 2	Temperatura	Pressão	Vazão mássica	Entalpia	Estado
	200°C	7 bar	6.500 kg/h	679,46 kcal	Vapor sobre aquecido
Calor total					3.892.330 kcal/h

Fonte – Próprio autor

A tabela a cima ilustra dados referentes a cálculos realizados, onde os mesmos estão relacionados com o consumo de combustível atual e consumo com a aplicação do pré-aquecedor solar, e a sua respectiva economia, onde os dados obtidos se mostram positivos perante a aplicação do sistema.

6. Consumo de Combustível

Para avaliar o consumo anual de combustível é muito importante levar em consideração as proporções estimadas para a relação estequiométrica do processo. A grande maioria dos combustíveis derivados do petróleo trabalham em média na ordem de 13,5kg de vapor por kg de combustível[19].

Para que a viabilidade do pré-aquecedor seja mensurada, é necessário saber qual o consumo de combustível dessa caldeira, de forma a orientar e basear os dados obtidos com a inclusão do sistema, para isso deve-se levar em consideração alguns dados de produção do equipamento.

Utilizando a expressão 10 calcula-se o calor total para a transformação da água líquida em vapor.

$$Q^\circ(\text{Kcal/h}) = m^\circ \cdot (\Delta h) = 4.000.555 \text{ Kcal/h}$$

Sabendo o calor total utiliza-se a expressão 11 para calcular a quantidade de combustível consumido por hora.

$$\frac{Q^\circ}{PCI} \cdot n = 354,58 \text{ Kg/h} \quad (11)$$

Em que:

- PCI = Poder Calorífico Inferior (9590 Kcal)
- n = Rendimento médio da Caldeira Flamotubular (85%)

Portanto o consumo de combustível da caldeira em condições atuais é de 354,58 Kg/h.

7. Resultados

A aplicação do coletor traz variações no processo quando comparado às condições atuais de produção da caldeira. O sistema eleva a temperatura da água e traz novas variáveis ao ciclo em questão, podemos observar na figura 11 o diferencial de consumo quando os valores são comparados:

$$Q^\circ (\text{kcal/h}) = m^\circ \cdot (\Delta h) = 3.892.330 \text{ Kcal/h}$$

$$\frac{Q^\circ}{PCI} \cdot 0,85 = 334,98 \text{ Kg/h}$$

Os dados adquiridos mostram uma boa redução do consumo de combustível no processo da caldeira, considerando todas as condições empregadas fica evidente a eficiência do sistema, com as informações e dados corretos, podendo reduzir consideravelmente o consumo de combustíveis no processo fabril, como ilustrado na figura a baixo. O valor do combustível utilizado para o cálculo da economia foi utilizado R\$ 2,36 por kg de óleo BPF referente à cotação de outubro de 2017.

Figura 11. Tabela de condições com o emprego do pré-aquecedor

Consumo atual de combustível	Consumo futuro de combustível	Redução de consumo combustível	Economia por hora	Economia diária	Economia mensal	Economia anual
354,58 kg/h	334,98 kg/h	19,59 kg/h	46,23 R\$	227,38 R\$	7.211,88 R\$	86.542,56 R\$

Fonte – Próprio autor

8. Considerações finais

Com base nos estudos e cálculos realizados para o dimensionamento do pré-aquecedor solar para água de reposição da caldeira, obtivemos resultados que se

mostraram favoráveis para sua aplicação, um projeto relativamente simples, mas que pode trazer ganhos significativos e principalmente com baixo investimento. Os resultados mostraram as diferenças de temperatura e o quanto é viável o pré-aquecimento da água de entrada da caldeira. O fato de a água já entrar em uma temperatura elevada consequentemente substitui uma quantidade parcial de óleo BPF que seria queimada no circuito, portanto o combustível restante do processo seria responsável apenas por fazer com que a água atinja a temperatura de ebulição.

Um sistema de pré-aquecimento solar reflete uma nova visão das indústrias, trazem um olhar inovador aliado à consciência quanto ao meio ambiente. A caldeira trabalha em forma de um círculo, de maneira que o retorno do condensado conciliado com água de entrada em temperaturas maiores pode reduzir a demanda de combustível usado diariamente. Uma redução de consumo de 19,59kg/h representa economia aproximada de R\$100.000,00 por ano, considerando o baixo investimento em materiais (na cotação atual) o payback do projeto é de aproximadamente um mês.

Algumas melhorias podem ser pontuadas, como a inclusão de um rastreador solar ou estudos mais detalhados do clima da região onde os coletores serão instalados, é claro essas melhorias podem elevar os custos para produção, entretanto seria possível maiores ganhos no processo.

9. Referências bibliográficas

- [1]MULLER, Jair Carlos. **Estudo geométrico de um refletor fresnel linear para produção de energia térmica.** 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/6031/Jair%20Carlos%20Muller_.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 03 abr. 2017
- [2]ZITTEL, Werner. **Fossil and Nuclear Fuels – the Supply Outlook.** 2013. Disponível em: <http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/2014/02/EWG-update2013_short_18_03_2013.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2017
- [3]Ministério de Minas e Energia. **Plano Decenal De Expansão De Energia.** 2015. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/PDEE/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202024.pdf>>. Acesso em: 04 abr. 2017
- [4]INATOMI, Thais Aya Hassan; UDAETA, Miguel Edgar Morales. **Análise dos impactos ambientais na produção de energia dentro do planejamento integrado de recursos.** 2014. Disponível em: <http://seeds.usp.br/portal/uploads/INATOMI_TAHI_I MPACTOS_AMBIENTAIS.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2017.
- [5]PENAFIEL, Rafael Andrés Soria. **Cenários de geração de eletricidade a partir de geradores heliotérmicos no brasil: a influência do armazenamento de calor e da hibridização.**2011.Disponível em:<<http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/soria.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2017.
- [6]ARBEX, Marcos Abdo; CANÇADO, José Eduardo Delfini; PEREIRA, Luiz Alberto Amador; BRAGA, Alféio Luís Ferreira; SALDIVA, Paulo Hilário Do Nascimento. **Queima da biomassa e efeitos sobre a saúde.** vol.30 no.2 São Paulo Mar./Apr. 2004, Disponível em <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-37132004000200015>>. Acesso em: 17 mai. 2017.
- [7]ARRUDA, Mateus Zart de. **Análise de Combustíveis de Caldeiras.** Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo,09 dez. 2004. Disponível em: < <http://usuarios.upf.br/~engeamb/TCCs/2009-2/MATEUS%20ZART%20DE%20ARRUDA.pdf>>. Acesso em: 17 mai. 2017.
- [8]CAETANO, Laércio; JUNIOR, Luis Antonio Duarte. **Estudo Comparativo da Queima de Óleo B.P.F. e de Lenha em Caldeiras – Estudo de Caso.** Instituto Politécnico, Nova Friburgo August 30th- September 3rd, 2004, Disponível em http://eventos.abcm.org.br/xi_creem/resumos/TE/CRE04-TE01.pdf >. Acesso em: 17 mai. 2017.
- [9]CELUPPI, Rafael; REVELLO, Jaime Humberto Palacio; SCAPINELLO, Jaqueline; ANDRADE, Felipe Galon; MAGRO, Jacir Dal. **Uso de energia solar no pré-aquecimento de água em caldeiras para agroindústrias.** Eng. Agríc., Jaboticabal, v.34, n.3, p.451-460, maio/jun. 2014. Disponível em: < <http://submission.scieo.br/index.php/eagri/article/view/116234>>. Acesso em: 17 mai. 2017.
- [10] PEREIRA, Elisabeth M.D.; CHARBEL, Andrea; AROREIR, Isabela; MESQUITA Lúcio C. S. **Mapeamento Básico Das Precondições Gerais Para Tecnologias Heliotérmicas No Brasil.** 2014. Disponível em:<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/system/files/papers/2014_pereira_mapeamento_basico_das_precondicoes_1.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2017.
- [11] Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. **O que é energia térmica?** Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/o-que-e-energia-heliotermica>>. Acesso em: 13 mai. 2017.
- [12]MALAGUETA, Diego C. **Geração Heliotérmica Princípios e Tecnologias.** 2012. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_heliotermica_2012.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2017.

- [13]BIZZO, Waldir A. cap. 4 – GERADORES DE VAPOR. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP4.pdf>>. Acesso em 17 mai. 2017.
- [14]LEITE, Nilson Ribeiro; MILITÃO, Renato de Abreu. **Tipos e Aplicação De Caldeiras**. Disciplina de fabricação e montagem de caldeiras e trocadores de calor, Escola Politécnica – Depto. Enga. Mecânica, São Paulo, ago/set. 2008. Disponível em [http: < https://lcsime.files.wordpress.com/2012/09/caldeiras_prominp.pdf](http://https://lcsime.files.wordpress.com/2012/09/caldeiras_prominp.pdf)>. Acesso em: 17 mai. 2017.
- [15]OLIVEIRA, Thiago Souza de; SOARES, Wanderley Pedro Rodrigues. **Caldeiras de Recuperação**. Disciplina de fabricação e montagem de caldeiras e trocadores de calor, Escola Politécnica – Depto. Enga. Mecânica, São Paulo, ago/set. 2008. Disponível em [http: < https://lcsime.files.wordpress.com/2012/09/caldeiras_prominp.pdf](http://https://lcsime.files.wordpress.com/2012/09/caldeiras_prominp.pdf)>. Acesso em: 17 mai. 2017.
- [16]TONIAZZO, F, GHIZZI, M, C. **O Emprego Do Coletor Solar De Funil Como Sistema De Pré Aquecimento De Água Em Caldeiras Industriais (Pesquisa Ação)**. Pato Branco, p.20-26, 2011. Disponível em: < <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/243>> Acesso em: 04 abr. 2017.
- [17]SOUZA FILHO, José Ribeiro. **Projeto, construção e levantamento de desempenho de um concentrador solar cilindro parabólico com mecanismo automático de rastreamento solar**. 2008. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15531/1/JOSERSF.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2017.
- [18]MORAN, Michael J. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**, São Paulo: Santana de Parnaíba, 2013.
- [19]Eficiência Energética no Uso de Vapor. Tabela 4.3 – Relações ar/combustível estequiométricas em base úmida. Disponível em: <<https://static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/LivroVapor.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2017.