



ROGÉRIO CAETANO ALVES

**EFICIÊNCIA DAS CALDEIRAS PARA GERAÇÃO E
DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR NAS INDUSTRIAS**

Rondonópolis
2021

ROGÉRIO CAETANO ALVES

**EFICIÊNCIA DAS CALDEIRAS PARA GERAÇÃO E
DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR NAS INDUSTRIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Mecânica da UNIC, campus
de Rondonópolis.

Orientador: Eduardo Akamatsu

ROGÉRIO CAETANO ALVES

**EFICIÊNCIA DAS CALDEIRAS PARA GERAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO
DE VAPOR NAS INDUSTRIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Mecânica da UNIC, campus
de Rondonópolis.

BANCA EXAMINADORA

Prof(a). Titulação Nome do Professor(a)

Prof(a). Titulação Nome do Professor(a)

Prof(a). Titulação Nome do Professor(a)

Rondonópolis, de Junho de 2021.

Dedico este trabalho à minha família pelo apoio e carinho durante toda essa jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me abençoado em cada momento de dificuldade e agora ter consagrado essa vitória em minha vida. Aos meus pais por todo amor e carinho, aos meus familiares que sempre foram presentes, que torceram por essa conquista e sempre compreenderam todos os momentos que estive ausente.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia Mecânica da instituição de ensino UNIC que contribuíram de maneira significativa para que eu pudesse concluir o curso, e em especial meu tutor Eduardo Akamatsu por todo auxílio a mim prestado. Aos meus colegas pela companhia, amizade, troca de conhecimento no ensino, a agradável convivência durante essa longa caminhada, por dividirem comigo momentos únicos, todos foram fundamentais para a minha formação. Enfim, agradeço a todos aqueles que passaram por minha vida nesse percurso e de alguma forma contribuíram para a execução deste trabalho.

“A arte de escutar é como uma luz que dissipa a escuridão da ignorância.”

Dalai Lama

ALVES, Rogério Caetano. **Eficiência das caldeiras para geração e distribuição de vapor nas indústrias**. 2021. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – UNIC, Rondonópolis, 2021.

RESUMO

Em virtude ao que representa o aspecto de eficiência energética no país, é essencial se ressaltar estudos que evidenciam que na indústria se pode se deparar com processos ineficientes em termos energéticos. Diante desse fato, se delineou o seguinte problema de pesquisa, quais os procedimentos para elevar a eficiência em caldeiras industriais para a geração e a distribuição de vapor. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi entender os procedimentos adequados para o aumento da eficiência das caldeiras industriais para a geração e distribuição de vapor. A pesquisa se classificou como uma revisão de literatura dos objetivos propostos. O trabalho foi dividido em três partes: a primeira abrangeu em explicar o ciclo Rankine, eficiência energética e o conceito, características e tipos de caldeiras para indústrias; a segunda buscou abordar as características da combustão em caldeiras industriais e os equipamentos e dispositivos de controle e segurança para distribuição de vapor para geração de vapor; a última descrever os dispositivos e procedimentos para a eficiência das caldeiras industriais. O que definirá o quanto de recurso será perdido é a capacidade dos responsáveis pela indústria em visar melhorias em pontos específicos que assegurem a eficiência térmica em caldeiras. Sendo necessário averiguar a temperatura dos gases versus a eficiência térmica em caldeiras, não controlar o excesso de ar diminui a eficiência das caldeiras, especificar os combustíveis, pois são essenciais para maior eficiência, as perdas com convecção e radiação reduzem a eficiência

Palavras-chaves: Eficiência; Caldeiras industriais; Vapor.

ALVES, Rogério Caetano. **Efficiency of boilers for steam generation and distribution in the industries.** 2021. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – UNIC, Rondonópolis, 2021.

ABSTRACT

In view of what represents the aspect of energy efficiency in the country, it is essential to emphasize studies that show that in the industry one can come across processes that are inefficient in terms of energy. Given this fact, the following research problem was outlined, which are the procedures to increase the efficiency of industrial boilers for the generation and distribution of steam. Thus, the objective of the work was to understand the proper procedures for increasing the efficiency of industrial boilers for the generation and distribution of steam. The research was classified as a literature review of the proposed objectives. The work was divided into three parts: the first covered explaining the Rankine cycle, energy efficiency and the concept, characteristics and types of boilers for industries; the second sought to address the characteristics of combustion in industrial boilers and the control and safety equipment and devices for steam distribution for steam generation; the latter describe the devices and procedures for the efficiency of industrial boilers. What will define how much resource will be lost is the ability of those responsible for the industry to aim for improvements in specific points that ensure thermal efficiency in boilers. Since it is necessary to check the temperature of the gases versus the thermal efficiency in boilers, not controlling excess air decreases the efficiency of the boilers, specifying the fuels, as they are essential for greater efficiency, losses with convection and radiation reduce efficiency

Keywords: Efficiency; Industrial boilers; Steam.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ciclo de Rankine com a presença de forças dissipativas.....	13
Figura 2 - Esquema de uma caldeira flamatubular horizontal compacta (a) e vertical (b).....	16
Figura 3 – Caldeira aquatubular	17
Figura 4 - Exemplos de materiais utilizados como combustíveis industriais e seu estado físico	19
Figura 5 - Exemplo de controlador de nível de água e sistema de alimentação de água em caldeiras	23
Figura 6 - Geração de potência a vapor regenerativo em sistema aberto (a) e fechado (b)	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEA	Agência Internacional de Energia
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. CICLO RANKINE	13
2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	14
2.2 CONCEITO, CARACTERÍSTICAS E TIPOS DE CALDEIRAS PARA INDÚSTRIAS.....	15
3. CARACTERÍSTICAS DA COMBUSTÃO EM CALDEIRAS INDUSTRIAIS	19
3.1 COMBUSTÃO DE GASES E LÍQUIDOS.....	21
3.2 EQUIPAMENTOS E DISPOSITIVOS DE CONTROLE E SEGURANÇA PARA DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR PARA GERAÇÃO DE VAPOR	22
4. PROCEDIMENTOS PARA A EFICIÊNCIA DAS CALDEIRAS INDUSTRIAIS	25
4.1 ISOLAMENTO TÉRMICO E O DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO DE VAPOR.....	27
4.2 ECONOMIZADORES	29
4.3 PRÉ-AQUECEDORES	29
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
REFERÊNCIAS	32

1. INTRODUÇÃO

Uma caldeira é destinada para a geração de vapor por meio da troca térmica entre o material combustível e a água. Essa troca é realizada por esse equipamento construído com chapas e tubos cujo intuito é efetivar com que água se aqueça e passe da condição líquida para a gasosa, empregando o calor liberado pelo combustível que faz com as partes metálicas da caldeira se aqueça, conduzindo calor à água e gerando o vapor. Comumente as caldeiras são usadas em organizações onde os processos industriais carecem de elevadas temperaturas, em indústrias químicas e petroquímicas e em outros variados ramos industriais.

Compreender o funcionamento de uma caldeira é de grande relevância, já que consiste em uma máquina de grande uso industrial. Sendo que os processos de geração e distribuição de vapor são essenciais para as ciências térmicas e fluidos ao produzirem o vapor preciso para o movimento de turbinas no decorrer do processo de geração de energia elétrica. Além que tais processos fornecem energia na forma de calor para vários processos de produção, tais como destilação do etanol e de outros combustíveis, para produção de celulose e papel, dentre tantos outros.

Sendo que as caldeiras usam um enorme volume de combustível no decorrer do processo, com isso, podendo gerar um custo final muito elevado. Dessa forma, as empresas necessitam estar continuamente buscando ações e medidas para a redução de custos e elevar a eficiência produtiva. Ao averiguar a eficiência térmica de uma caldeira, se pode evidenciar que sua capacidade nunca chegará a 100%, variando somente entre uma média de 65% a 75%, assim, as indústrias acabam por perder investimentos no decorrer do processo produtivo e essa é o maior motivo da relevância da busca pela eficiência energética de caldeiras nas indústrias.

O presente trabalho se justifica, em virtude das potencialidades do estudo das caldeiras industriais para a geração e distribuição de vapor. A definição de caldeira, abrange em um depósito incumbido pela troca energética, que gera vapor, através do calor oriundo do combustível. Com isso, é possível converter vapor em energia, consistindo de enorme importância para o setor industrial. Um fator estimulador para sustentar o trabalho, deriva na importância que o assunto possui para o campo acadêmico e para a sociedade em geral, em virtude ao que representa o aspecto de eficiência energética no país.

A busca por melhores eficiências em sistemas de geração de vapor tem possibilitado estudos nas áreas de sistemas térmicos. Essas pesquisas vêm sendo aprofundadas na medida em que se evidencia que os recursos naturais são cada vez mais escassos e que necessitam ser melhor aproveitados. Diante desse fato, se delineou o seguinte problema de pesquisa, quais os procedimentos para elevar a eficiência em caldeiras industriais para a geração e a distribuição de vapor?

O objetivo geral do trabalho foi entender os procedimentos adequados para o aumento da eficiência das caldeiras industriais para a geração e distribuição de vapor. Os objetivos específicos consistiram em: Apresentar o ciclo Rankine, eficiência energética e o conceito, características e tipos de caldeiras para indústrias; Demonstrar as características da combustão em caldeiras industriais e os equipamentos e dispositivos de controle e segurança para distribuição de vapor para geração de vapor; Descrever os dispositivos e procedimentos para a eficiência das caldeiras industriais

O trabalho abrange em uma Revisão de Literatura do tema proposto, no qual conforme cita Koche (2007), consiste em um processo de busca, análise e descrição de um corpo do conhecimento em busca de resposta a uma pergunta específica. “Literatura” abrange todo o material importante que é escrito em relação a um assunto. Sendo que será concretizada uma consulta a livros, monografias, dissertações e por artigos científicos selecionados através de busca nas seguintes bases de dados Scielo, bibliotecas, tendo como autores Diório (2019), Moran (2018), Jannuzzo e Swisher (2007), Mamede Filho (2010), etc. O período das fontes pesquisadas serão os trabalhos publicados nos últimos quinze anos. As palavras-chaves utilizadas para referida pesquisa serão: eficiência, caldeiras industriais e vapor

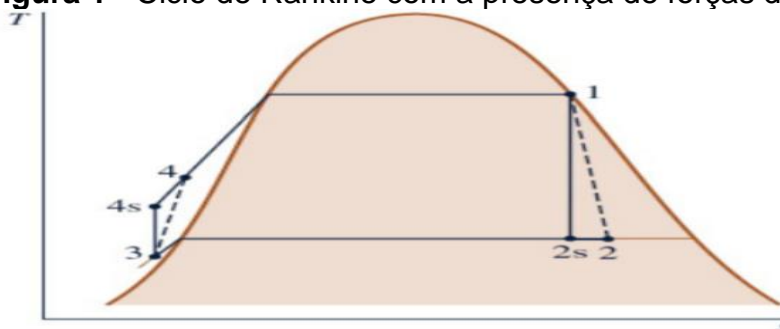
2. CICLO RANKINE

A averiguação da eficiência de um sistema de potência a vapor abrange em efetivar balanços de massa e energia vinculados à segunda lei da Termodinâmica. Sendo que tais balanços podem ser empregados no sistema global e em cada dispositivo representado do processo de geração de vapor. O modelo termodinâmico que se emerge desses balanços é intitulado de ciclo Rankine (DIÓRIO, 2019).

Conforme explica Diório (2019), o ciclo Rankine consiste em um modelo termodinâmico que se origina da adoção de balanços de massa, de energia e da segunda lei da termodinâmica para cada equipamento que forma uma máquina de geração de potência do sistema de geração de vapor. No qual essa pode ser constituída por um trocador de calor (caldeira), turbina, condensador e também por um sistema de bombeamento de água, de tal modo que as propriedades não variam ao decorrer do tempo, ou seja, o sistema se situa em regime estacionário.

Moran (2018) explica que no ciclo de *Rankine*, as irreversibilidades agem nos processos de 1 para 2 e de 3 para 4, devido ao fato de que os processos que produzem e utilizam o trabalho não são isentrópicos por conta das forças dissipativas do sistema. Referente aos ciclos reais, o comprimento da linha 3-4 tende a ser mais acentuado em decorrência da necessidade de a bomba fornecer energia capaz de vencer o atrito provocado pelo escoamento. Outro fator relevante, consiste no fato de que quanto menor for a ineficiência da turbina, maior é a inclinação da linha 1-2 em sentido anti-horário conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Ciclo de Rankine com a presença de forças dissipativas



Fonte: Moran (2018, p. 366)

Ao observar a figura é possível notar que as forças dissipativas provocam um aumento na entropia do ciclo, esse que por sua vez ocorre de um

deslocamento do ponto 2 e 4 para a direita. Desse modo, a eficácia de um ciclo ideal pode ser estimada determinada pela equação que faz uso das entalpias do processo isentrópico, bem como a eficiência do processo real empregando as entalpias correspondentes ao ciclo 1-2-3-4-1 (MORAN, 2018).

Em conformidade com Diório (2019), a eficiência do ciclo é estabelecida a partir de uma análise da porcentagem de energia que é aproveitada, ou seja, transformada em trabalho líquido de saída (útil ou disponível), em relação à quantidade de calor que é fornecida ao ciclo, isto é, concebido pela caldeira. Outro fator relevante é de que uma parte do trabalho que é produzido deve ser gasta no bombeamento do fluido.

2.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Uma das preocupações mais relevantes do mundo moderno, consiste no desenvolvimento correspondente da oferta e de opções de gestão da demanda, para disponibilizar serviços de energia tanto a custos ambientais quanto sociais de forma correta e para que sejam mínimos. Todas as partes abrangidas necessita possuir uma finalidade para tornar a utilização da energia mais eficaz sem afetar o conforto da sociedade em geral (JANNUZZI; SWISHER, 2007).

Jannuzzi e Swisher (2007) explicam ainda que esse planejamento é essencial para o país, levando em conta não somente a crise energética nacional, mas acima de tudo a redução de fatores que prejudicam o meio ambiente, como o aumento do efeito estufa, a poluição, entre outros.

Em conformidade com a Agência Internacional de Energia – IEA (2017), fatores como a qualidade da energia e a forma de utilização de usuário final da mesma, consiste em princípios de grande importância para a eficiência energética. Sendo assim, a eficiência energética pode ser considerada em três modos distintos, que são: na oferta, na demanda ou uso final, esse que está ligado de forma direta ao comportamento do consumidor.

Para Mamede Filho (2010), o assunto sobre eficiência energética tem sido comum em debates. Com a elevação da demanda de energia elétrica e a diminuição dos recursos naturais para a extração dessas, se tornou fundamental desenvolver novas tecnologias e técnicas na extração para que se obtenha um melhor nível de

eficiência.

Se sabe que a eficiência energética possui um conceito de ser um tipo de atividade técnico-econômica, onde possui como finalidade mais relevante promover a sua utilização de modo otimizado em todas as matérias-primas que são fornecidas pela natureza (ANEEL, 2015).

Segundo Mamede Filho (2010), a eficiência energética pode ser definida como a otimização que se pode fazer no consumo de energia. Fatores como a forte ameaça de insuficiência das reservas de combustíveis fósseis, a pressão em relação aos resultados econômicos e as preocupações voltadas para o meio ambiente levam a estimar a eficiência de energia como uma das soluções para equilibrar o modelo de consumo presente, para um padrão viável de desenvolvimento sustentável.

Conforme a IEA (2017), a eficiência energética incide no uso racional de energia, e as medidas para isso, correspondem de fato a inserção de ações que sejam capazes de reduzir a energia necessária para que dessa forma seja atendida as necessidades da economia. Essas medidas correspondem ao aprimoramento tecnológico que envolve o processo produtivo, distribuição e uso da energia, além de possíveis melhorias na organização, conservação ou gerenciamento energético. Desse modo, as ações de eficiência podem assegurar um sistema energético que seja seguro e estável em termos econômicos para o futuro.

2.2 CONCEITO, CARACTERÍSTICAS E TIPOS DE CALDEIRAS PARA INDÚSTRIAS

As caldeiras consistem em equipamentos que são usados de forma ampla nas indústrias voltadas para a produção de vapor por meio da troca térmica entre o combustível e a água, gerando então um vapor sob pressões superiores à atmosférica a partir da energia térmica de um combustível e o ar (elemento comburente), são formados por equipamentos distintos que juntos possibilitam obter um rendimento térmico superior (SILVA, 2009).

Ainda segundo Silva (2009), os vapores gerados nas caldeiras possuem dois destinos diferentes, sendo que o vapor saturado é voltado para o aquecimento e cozimento, entre outros, e já o vapor superaquecido destina-se a geração de energia em combinação com uma turbina.

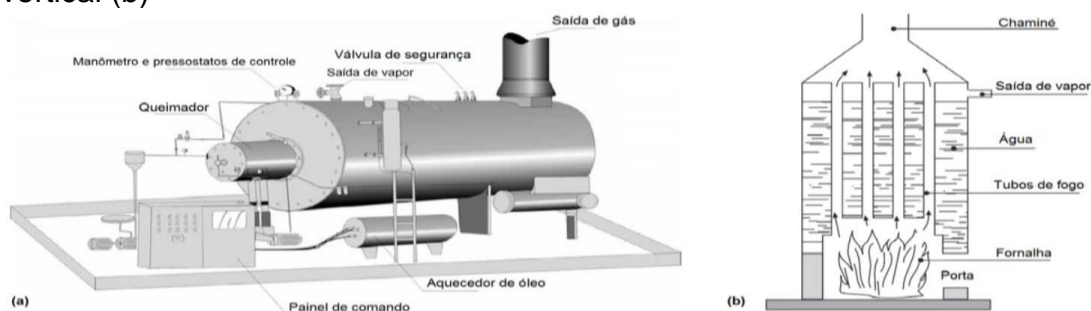
Para Cunha (2015), concebido na caldeira, arrasta consigo partículas de água, sendo esse o vapor úmido na temperatura de saturação, normalmente usados em aquecimento, onde partículas de água que o escoltam, não comprometem seu uso. É proveniente do vapor saturado, e isso ocorre pela introdução de mais calor ao vapor, ou seja, acima da temperatura de saturação. Na maioria das vezes esse vapor é utilizado para geração de energia em turbinas, onde existe a necessidade de eliminar a umidade, devido ao fato de que as partículas de água danificam a turbina. É no superaquecedor que o vapor passa de saturado a superaquecido.

Silva (2009) enfatiza que no cenário contemporâneo, os geradores de vapor ocupam um lugar de grande relevância na produção industrial. Já que geram vapor essencial a muitas atividades, atuando até mesmo de modo direto em alguns processos produtivos, como matéria-prima.

Segundo Pera (2009), as caldeiras podem ser agrupadas em flamotubulares e aquatubulares. As flamotubulares são formada por um vaso de pressão por onde passam tubos, que estão mergulhados em água e dentro de um recipiente isolado termicamente, com gases de combustão, escoando de forma interna.

Conforme é citado pelas Centrais Elétricas Brasileiras (2015), as caldeiras flamotubulares são classificadas como sendo aquelas cujos tubos evaporadores se encontram imersos na água que vai ser evaporada. Na parte interior desses tubos circulam os gases de combustão que transferem a energia necessária à geração de vapor. No caso das aquatubulares, a circulação dos gases e do vapor é inversa. Devido ao fato da água em estado líquido permanecer no tubulão, que é uma grande região cilíndrica da caldeira flamotubular, é possível criar dois modelos: vertical ou horizontal, sendo a fornalha interna ou externa. A Figura 2 apresenta um esquema de uma caldeira flamotubular horizontal compacta (a) e vertical (b).

Figura 2 - Esquema de uma caldeira flamotubular horizontal compacta (a) e vertical (b)



Fonte: Centrais Elétricas Brasileiras (2015)

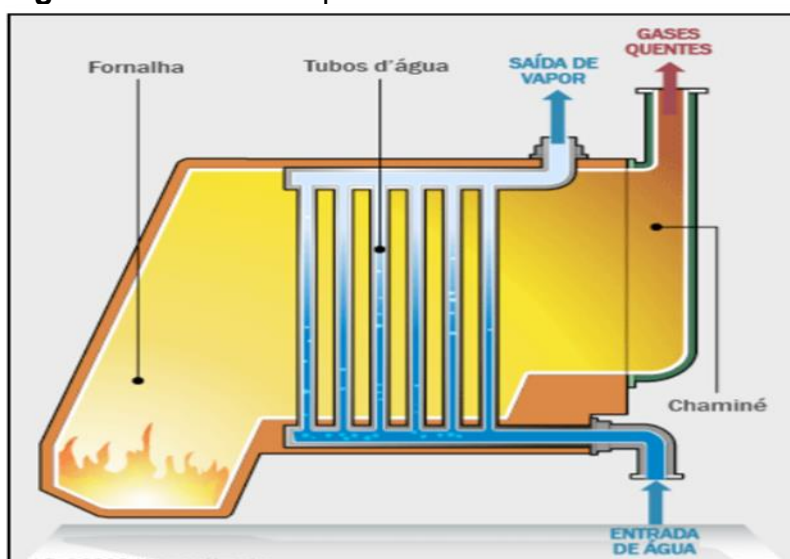
Nesse caso, as duas caldeiras exibem um formato cilíndrico com espelhos (placas planas) nas extremidades. Apesar disso, as verticais contêm os tubos internos inseridos na vertical, desde a fornalha até a chaminé da caldeira, já as horizontais de grande volume (as versões modernas são compactas) tem sua forma na horizontal, onde o feixe de tubos percorre o interior do tubulão mais de uma vez (CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, 2015).

Em concordância com Pera (2009), quando se trata do modelo vertical, a transferência de calor para vaporização de água tem a sua origem nos gases de combustão que se movimentam no interior dos tubos para a água contida no tubulão que tende a permanecer com um nível quase que constante em consequência da alimentação contínua.

Enquanto nas caldeiras aquatubulares, a água transcorre por dentro dos tubos e os gases de combustão, oriundos na fornalha, passam pelo exterior dos tubos. Sendo que a capacidade produtiva da caldeira aquatubulare é superior que das flamotubulares, já que possuem maior área de troca térmica (ODDONE, 2011).

Ainda segundo Oddone (2011), a capacidade produtiva das caldeiras aquatubulares se mostra bem maior quando comparada às flamotubulares, e isso ocorre devido ao fato de que a mesma possui uma área de troca térmica maior. Além disso, nessas caldeiras a água circula na parte interior dos tubos e os gases de combustão, que são gerados na fornalha, passam pela parte externa dos tubos, conforme é apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Caldeira aquatubular



Fonte: Oddone (2011)

Diório (2019) enfatiza que a quantidade de vapor que é produzida pelas caldeiras aquatubulares se mostra bem mais elevada do que as caldeiras flamatubulares, contudo, em média, a vazão específica situa-se em $\times 2\ 200\ \text{kg/m h}$, podendo ser menor ou maior, fator esse que vai depender sobretudo do combustível alimentado na caldeira, bem como também do tipo de fornalha.

Devido ao fato dessas produzirem uma grande quantidade de vapor, seu uso está voltado para as grandes unidades industriais, que possuam capacidades de geração de 600 - 750 ton/h , pressão de 150 - 2 200 kgf/cm e temperatura de 450 - 500 C. Contudo, certas unidades operam com condições desfavoráveis de 226 atm, sendo que algumas atingem até cerca de 250 atm. Nesse caso, o indicado seria o uso de modelos menores cuja capacidade de geração de vapor seja de 100 kg/h (DIÓRIO, 2019).

Segundo Bazzo (2015), a categorização das caldeiras aquatubulares é feita com base na geometria de seu feixe de tubos, bem como também ao tipo de escoamento no seu interior. Além de contar com um tambor separador água/vapor, as caldeiras possuem um tubulão (tambor) para reservatório de água. Caso o feixe de tubos que faz a união dos tubulões sejam retos, as caldeiras são denominadas como sendo caldeiras de tubos retos. E quando o feixe dos tubos não é retilíneo, essas recebem o nome de caldeiras de tubos curvos.

Ainda para Bazzo (2015), nos dois casos a circulação da água ocorre de modo natural, sem a presença de um agente externo. O terceiro tipo de classificação de caldeiras aquatubulares compreende a circulação positiva da água, essa que por sua vez acontece em virtude da presença de uma bomba de circulação (circulação positiva forçada), ou de algum aspecto construtivo (circulação positiva natural). Sendo que no próximo capítulo será debatido as características da combustão em caldeiras industriais e os equipamentos e dispositivos de controle e segurança para distribuição de vapor para geração de vapor.

3. CARACTERÍSTICAS DA COMBUSTÃO EM CALDEIRAS INDUSTRIAIS

Os combustíveis industriais exibem diversas ligações químicas carbono-carbono e carbono-hidrogênio com elevada energia. Essa energia química pode ser liberada perante a reação com o oxigênio existente no ar atmosférico. Essa reação libera luz e enorme volume de calor, sendo intitulada de combustão (DIÓRIO, 2019).

O calor de combustão consiste na energia liberada pela combustão, sendo explicitada através da entalpia de combustão específica (DHc) que admite valor negativo para reações exotérmicas. Assim, Lagemann (2019) explica que toda entalpia de combustão abrange em uma diferença entre o valor da entalpia na condição termodinâmica dos gases de combustão e um referencial teórico (temperatura de 298 Kelvin e pressão de 1 atmosfera), no qual se estima a entalpia como nula. A Figura 4 apresenta os materiais mais usados como combustíveis industriais.

Figura 4 - Exemplos de materiais utilizados como combustíveis industriais e seu estado físico

Estado	Combustíveis industriais
Sólido	Carvão mineral (hulha); Carvão vegetal; Coque verde de petróleo; Coque de carvão; Madeira; Resíduos do processamento da madeira; Bagaço de cana
Líquido	Óleo combustível; Óleo diesel; Óleo de xisto; Álcool; Alcatrão; Biodiesel
Gasoso	Gás natural (GN); Gás de refinaria; Gás CO; Gás de xisto; Gás de coqueria; Gás de alto-forno; Gás liquefeito do petróleo (GLP); Biogás

Fonte: Lagemann (2019)

Segundo Diório (2019), dentre os vários combustíveis industriais disponíveis no mercado, uma grande parcela das indústrias de processamento optam por fazer uso de óleos combustíveis e o gás natural, contudo dependendo da disponibilidade regional e do preço de mercado, algumas empresas fazem a mistura dos combustíveis com reaproveitamento de resíduos provenientes do processamento da madeira e da cana-de-açúcar ou biogás, gerando assim um menor impacto

ambiental, menor geração de resíduos sólidos, redução da forte dependência de combustíveis fósseis não renováveis, além de elevar a lucratividade da empresa.

Existem três tipos de combustíveis diferentes, sendo esses: os sólidos, líquidos e os gasosos, que são encontrados em formas comerciais distintas. O uso dos combustíveis sólidos nas caldeiras se dá devido ao fato da biomassa ser o combustível mais empregue, além de que esse possui uma reserva significativa em determinados locais do país. No decorrer de toda a década de 70, o óleo possuiu um forte incentivo em seu consumo, esse que se dava sobretudo por conta do seu baixo custo, enquanto o gás natural, estimado como sendo um novo combustível na matriz energética do país, passando ainda por etapas de expansão, necessitava de fato vários estudos que fossem voltados para a adaptação do seu uso no mercado consumidor (DADAM et al., 2006).

No que se refere aos combustíveis líquidos mais comuns, esses são provenientes da destilação do petróleo, como no caso dos óleos combustíveis e do óleo diesel, sendo esses os mais consumidos. Contudo, também se mostram possíveis os combustíveis líquidos de outras fontes, como no caso do óleo de alcatrão (ou até mesmo o alcatrão, procedente do carvão vegetal), o metanol, etanol e o biodiesel. De forma análoga aos combustíveis gasosos, os líquidos exibem um poder calorífico inferior (PCI) e superior (PCS) ligados com quantia de energia que é liberada durante o processo de combustão. A distinção entre os mesmos incide na presença de umidade no combustível (DIÓRIO, 2019).

Em conformidade com Lagemann (2019), a compatibilidade dos combustíveis está ligada de forma direta com a composição dos mesmos. Nesse caso, os combustíveis que divergem entre si, como exemplo de um óleo que exibe uma alta concentração de asfaltenos e outro óleo que apresenta uma baixa concentração, nessa situação a concepção dos depósitos em um óleo impossibilita a sua compatibilidade (ou mistura) com o outro óleo.

Em relação aos combustíveis gasosos, esses podem ser minerais ou não minerais. No caso dos minerais, a sua obtenção se dá por meio da refinação do petróleo, destilação do xisto betuminoso ou hidrogenação do carvão. Dentre os mais utilizados é possível citar a gasolina, o óleo diesel e o óleo combustível (CEFET-MG, 2009). De fato, esses combustíveis são formados de hidrocarbonetos.

3.1 COMBUSTÃO DE GASES E LÍQUIDOS

Em condições habituais de temperatura e pressão, certos combustíveis podem se mostrar em estado sólido como no caso do carvão mineral, e outros podem se apresentar estado líquido tais como a gasolina, o diesel e o etanol, enquanto outros são espontaneamente gasosos como por exemplo o gás natural, gás de refinaria, entre outros. Nesse âmbito, já se tem tecnologias disponíveis para que possam ser aproveitados a energia de cada tipo de combustível, através de sua combustão tanto em nível industrial quanto em escala individual (BAZZO, 2015).

Bazzo (2015) complementa ainda que para se ter um melhor aproveitamento em relação aos benefícios dos combustíveis gasosos, é essencial em primeiro lugar ter o devido conhecimento de algumas de suas propriedades, essas que possibilitam um desempenho ótimo durante seu uso. Dentre essas propriedades é possível citar: densidade tanto relativa quanto absoluta; poder calorífico; calor inerente; jatos; velocidade de queima; chama de gás e os limites de inflamabilidade.

Segundo Diório (2019), em relação aos combustíveis líquidos mais comuns, esses são provenientes da destilação do petróleo, como no caso dos óleos combustíveis e o óleo diesel, e devido a essa circunstância os mesmos tendem a apresentar um consumo maior.

Algumas considerações relevantes devem ser levadas em conta, tendo um maior cuidado para que o óleo combustível não sofra nenhum tipo de contaminação no decorrer ou logo depois que esse é entregue à unidade consumidora, e que esse seja armazenado, aquecido e manejado segundo as recomendações cabíveis para que se tenha a obtenção de uma combustão eficaz (CEFET-MG, 2009).

Lagemann (2019) comenta que fatores como a presença de umidade nos combustíveis líquidos tende a comprometer a sua eficiência térmica. Além disso, é possível que as moléculas de água emulsionem com as moléculas dos combustíveis dando origem a estruturas estáveis que afetam a qualidade do combustível e resultam em sérios problemas de corrosão nos tanques, tubulações e nos demais componentes que fazem parte do processo.

Além da água, os combustíveis líquidos também podem ter alguns outros contaminantes em sua composição, bem como a areia e óxido de ferro. De fato, esses resíduos tendem a provocar sérios problemas operacionais de combustão

instável e não uniforme, surgindo nesse caso fagulhas na chama, extinção da chama, pulsações, entupimento e erosão dos filtros de combustíveis, bem como também dos bicos atomizadores ou bicos injetores, e alguns outros componentes mecânicos (LAGEMANN, 2019).

Segundo Altafini (2012), oposto dos óleos combustíveis que exibem viscosidades diferentes, essas podem ser tanto baixa, média ou elevada. Essa característica compromete de forma direta a eficácia do combustível durante o processo de combustão, pois provoca mudanças na quantidade de energia que é necessária para alcançar a temperatura ideal de queima (consumo de vapor de aquecimento) e o bombeamento do fluido, levando em conta que os fluidos mais viscosos fazem uso de maior quantidade de energia para que ocorra o seu escoamento.

Altafini (2012) cita ainda que em relação aos tanques de armazenagem, todos esses de fato possuem uma região extra na sua lateral (exterior), essa que é chamada de região de contenção, local para onde o líquido extravasado escoar e permanece coibido, prevenindo desse modo que se tenha possíveis derramamentos e acidentes nas instalações industriais.

3.2 EQUIPAMENTOS E DISPOSITIVOS DE CONTROLE E SEGURANÇA PARA DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR PARA GERAÇÃO DE VAPOR

É necessário que todo projeto de dimensionamento de uma caldeira especifique detalhadamente os parâmetros ligados a segurança, e que levem em conta as transformações nas condições de operação no decorrer da vida útil do equipamento (DIÓRIO, 2019).

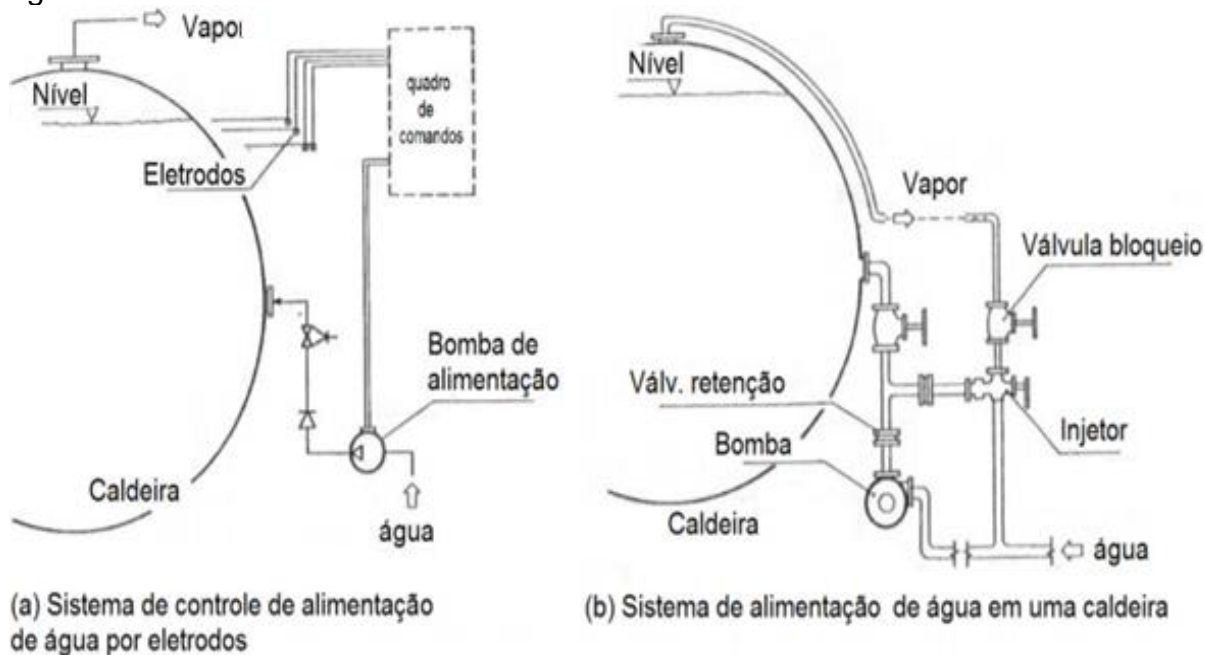
Diório (2019) comenta que por exemplo, uma caldeira necessita ter uma pressão máxima de operação menor do que a sua resistência estrutural suporta, por conta da espessura de seus tubos. Entretanto, essa pressão máxima deve considerar uma possível perda de espessura dos tubos e em consequência disso uma redução da resistência ao longo do tempo de operação, devido à corrosão.

Em conformidade com Bazzo (2015), para garantir a operação segura das caldeiras, bem como de qualquer gerador de vapor, são instalados elementos auxiliares que tem como objetivo, por exemplo, fazer o devido controle da

alimentação de água e combustível necessários, e de sistemas para conter a temperatura e a pressão do vapor.

Ainda segundo Bazzo (2015), cada caldeira carece de exibir dois sistemas de alimentação de água independentes para que, caso um venha a falhar, o segundo entre em operação. O tipo de controlador de tais sistemas é dado pelo porte da caldeira. Sendo que os controladores com acionamento (atuador) pneumático ou elétrico são usados em caldeiras de médio e grande tamanho (superior a 50 ton/h), enquanto nas de pequeno porte se emprega o controlador com atuador de eletrodo. A Figura 5 ilustra o exemplo de um controlador de nível de água e o sistema de alimentação de água em caldeiras.

Figura 5 - Exemplo de controlador de nível de água e sistema de alimentação de água em caldeiras



Fonte: Bazzo (2015)

Dessa forma, caso o sistema de controle não seja automático, é preciso que o operador faça a introdução da quantidade necessária de água em momentos correspondentes para que desse modo seja mantido o nível constante, e para que isso aconteça é essencial que se tenha um visor de nível. Além disso, o sistema de controle da pressão de operação da caldeira, e da pressão de vapor agem de modo indireto (PINHEIRO, 2015).

Ainda segundo Pinheiro (2015), essa variável de fato é controlada por meio do sistema de alimentação de combustível na fornalha da caldeira (controle da combustão). Nesse caso, os pressostatos operam de forma conjunta com os queimadores da fornalha, com o intuito de conservar de forma constante a pressão de alimentação do combustível, e o manômetro passa a ser responsável por relatar a verdadeira pressão de vapor para o operador do equipamento. De tal modo, no próximo capítulo será descrito os dispositivos e procedimentos para a eficiência das caldeiras industriais.

4. PROCEDIMENTOS PARA A EFICIÊNCIA DAS CALDEIRAS INDUSTRIAIS

Em relação a eficiência energética no emprego de vapor, se ressalta que a performance energética e a diminuição das perdas em uma indústria, fazem sentido dentro de condicionantes de viabilidade econômica. Isto é, os custos atrelados à economia energética necessita ser cobertos com a energia economizada. E que a eficiência não é uma finalidade por si mesma, mas sim somente se justifica pelas vantagens econômicas que pode promover (ELETROBRÁS, 2005).

Segundo Pinheiro (2015), no caso de uma distribuição de vapor a perda de energia que compreende desde a caldeira até os pontos de uso, acontece devido a transferência de calor para o ambiente, sendo necessário que essa seja reduzida através de um uso correto de isolamento nas linhas de vapor. Além dessa, outra perda corriqueira ocorre nas linhas de vapor saturado, sendo que a energia térmica perdida acarreta na formação de um condensado, esse que deve ser retirado através de purgadores.

Pinheiro (2015) cita ainda que é essencial que a etapa de desenvolvimento e desenho do sistema de distribuição de vapor, esteja em conformidade com a demanda e a perda de carga aceitável, e que os purgadores sejam especificados no melhor local para eles definido. Além disso, no que se refere a manutenção dessa redes de distribuição, é necessário dar prioridade a preservação do isolamento, fator essencial para sustentar a condensação do vapor em valores aceitáveis, bem como o adequado funcionamento dos purgadores de vapor.

De forma geral, a eficiência de energia de um sistema é a denotação do quanto uma máquina real se aproxima de seu comportamento ideal, no qual não há perdas. A busca para reduzir as perdas é contínua, já que elas constituem maiores custos. Assim, é necessário sempre operar com dispositivos de elevado rendimento e sustentar a eficiência em um grau máximo. Saber o real valor da eficiência é de enorme relevância para a indústria (MORAN, 2018).

Para Moran (2018), em relação as usinas de geração de potência a vapor, essas por sua vez desenvolveram algumas alterações em seus ciclos de geração com o intuito de melhorar o desempenho do ciclo gerador de potência. Dentre essas melhorias a mais comum incide na utilização dos ciclos por reaquecimento e por superaquecimento, entretanto, as mais difíceis de serem vistas consistem na

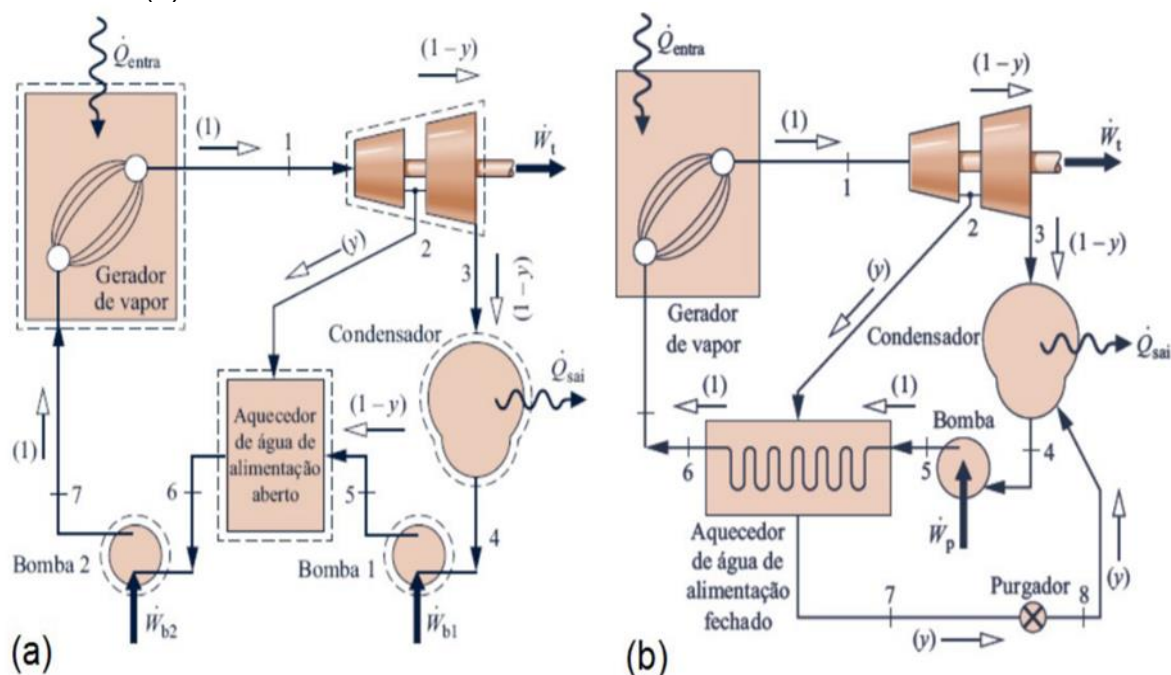
melhoria por vapor supercrítico ou por vapor regenerativo. Ao passar pelo interior da turbina, uma parte da energia do vapor é transformada em potência, gerando assim a formação de líquido.

Nesse contexto, caso uma quantidade muito elevada de líquido seja formada, suas gotículas podem acarretar em uma erosão das pás da turbina por conta da sua elevada energia cinética o que de fato implica em uma redução do desempenho do ciclo, tendo em vista a manutenção excessiva e custos associados (DIÓRIO, 2019).

Ainda segundo Diório (2019), buscando melhorar o desempenho do equipamento, o ideal seria operar a turbina, cujo vapor de saída exibisse título maior ou igual a 90%. Para que isso ocorra, pode-se empregar o superaquecimento do vapor. A energia adicional para superaquecimento do vapor deve ser transferida pelo superaquecedor antes de alimentar o vapor à turbina.

Em conformidade com Moran (2018), é plausível que a performance de um ciclo de potência seja aperfeiçoada a partir do vapor, de tal modo que esse seja trabalhado com a regeneração, ou seja, com o aquecimento regenerativo da água de alimentação, sendo que a fonte pode ser um sistema tanto aberto quanto fechado. A Figura 6 exhibe as características da geração de potência em um sistema aberto e fechado.

Figura 6 - Geração de potência a vapor regenerativo em sistema aberto (a) e fechado (b)



Fonte: Moran (2018)

A partir do momento em que o aquecimento da água de alimentação é feito e um sistema aberto, de fato não se tem uma queda na pressão no gerador de vapor, condensador e no aquecedor de água, apesar disso, nesse caso a mistura provoca uma irreversibilidade no sistema, de tal maneira que as bombas e a turbina operam isentropicamente. Em relação ao sistema regenerativo fechado, não se tem uma mistura entre o vapor extraído e a água de alimentação, sendo que o reaquadecor engloba um purgador, possibilitando desse modo passagem do líquido para o condensador (MORAN, 2018).

Segundo Pinheiro (2015), desse modo, tanto a turbina quanto a bomba operam isentropicamente, entretanto, o purgador não participa desse processo, resultando em uma queda de pressão. Sendo assim, apenas uma parcela do escoamento total se amplia por meio da turbina de segundo estágio, onde o ciclo desenvolve uma menor quantidade de trabalho.

4.1 ISOLAMENTO TÉRMICO E O DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO DE VAPOR

O isolamento térmico de uma certa tubulação apresenta como finalidade básica a conservação da energia nas linhas que operam em baixa ou alta temperatura. O condensado que é desenvolvido na tubulação de vapor, está relacionado com o isolamento térmico, exercendo um impacto direto na eficácia do sistema. Isso ocorre devido ao fato de que a presença de isolamento térmico na linha de vapor assegura uma redução da perda de energia ao longo da tubulação, impedindo dessa maneira que se tenha uma elevada condensação de vapor (ZATTONI, 2008).

Para Pederiva e Mattioni (2013), é de grande importância que determinados fatores sejam levados em conta para a escolha de um isolamento térmico que se mostre apropriado para uma tubulação de vapor, dentre esses é possível citar: diâmetro da linha e temperatura do fluido. No que refere-se aos tipos de isolantes que mais são usados se tem: Refletivos: esses que têm alto poder refletor de ondas de calor; Fibrosos: são compostos de lãs de rocha, de escória e de vidro, abesto, feltro e madeira, sendo que esses se mostram mais capazes de possibilitar uma condução e convecção.

Pederiva e Mattioni (2013) acrescentam ainda que se tem também os Granulares: silicato de cálcio, magnésia, diatomita, e a cortiça. Onde esses podem prender o ar, impedindo que ocorra a sua movimentação; Celulares: espumas de borracha, de vidro, plásticas e o aerogel de sílica, formados por poros impermeáveis. Independentemente do tipo do isolante térmico é necessário que esse seja protegido contra intempéries por uma cobertura de alumínio, essa que pode ser lisa ou corrugada.

O alumínio pode ser estimado como sendo um tipo de material que é largamente utilizado pela sociedade, devido ao fato desse apresentar propriedades físicas e características químicas que conferem ao mesmo uma maior versatilidade. No que se refere a aplicação de cobertura do isolante térmico de uma tubulação de vapor, são aproveitadas duas propriedades do alumínio, sendo: característica de barreira e baixa emissividade, que consiste na competência de emitir radiação eletromagnética (ZATTONI, 2008).

Ainda conforme explica Zattoni (2008), se tratando da característica de barreira, o alumínio se mostra como sendo um material capaz de barrar a luz, sendo esse impermeável à atuação da umidade e do oxigênio. Já em relação a baixa emissividade do alumínio, é possível que seja feito o uso desse material em tubulações de vapor fazendo de tal modo com que a energia dentro da linha seja nutrida. Além dessas propriedades o alumínio também incide em um material de custo reduzido e apresenta uma conformação facilitada.

Para Teles (2009), em relação as tubulações de vapor, essas geralmente são submetidas a pressões de projeto e passam por uma alteração em relação a temperatura. Desse modo, essas podem sofrer dilatações e contrações por conta da troca térmica que acontece no decorrer do processo, estabelecendo assim uma averiguação da flexibilidade da rede, como o uso de juntas de expansão. Com o intuito de evitar o surgimento de corrosões e ferrugem, é indicado que as tubulações sejam de aço, carbono ou cobre, sendo que o uso de isolamento térmico é essencial por assegurar perdas mínimas de calor por radiação.

Segundo Daumichen (2015), se tratando do dimensionamento de uma tubulação encarregada de fazer o transporte de vapor, é necessário que essa tenha o seu diâmetro em conformidade com a sua vazão. Nesse âmbito, em uma tubulação subdimensionada, a velocidade sofre uma intensificação que pode resultar

em um maior desgaste, risco de ausência de vapor, golpes de ariete e cavitação. Em contrapartida, um superdimensionamento no diâmetro tende a fazer com que o projeto se torne mais caro devido aos materiais e isolamentos, além de aumentar a formação de condensado, e por conta dessa razão é necessário que se tenha uma equiparação no projeto de tubulações.

4.2 ECONOMIZADORES

Segundo Pera (2009), uma elevação de 3 ou 4% na geração de vapor pode ser obtido perante a instalação de um economizador na caldeira. Esse componente possui o intuito de aquecer a água, que é alimentada na caldeira, reduzindo assim, a diferença de temperatura para sua evaporação. Uma melhoria da eficiência térmica é conquistada devido que o aquecimento da água é efetivado com a energia residual dos gases de combustão.

Os economizadores são usados para o aquecimento da água de alimentação antes dessa ser colocada no interior da caldeira. O pré aquecimento é realizado por meio da troca de calor com os gases de combustão saindo da caldeira. Nesse caso, o uso do calor sensível dos gases de combustão proporciona uma elevação na eficiência térmica do equipamento (TELLES, 2009).

Telles (2009) explica ainda que os economizadores podem ser caracterizados como sendo trocadores de calor gás-líquido. Por conta do baixo coeficiente de troca de calor por convecção no lado dos gases, normalmente os economizadores são formados por tubos aletados. No que se refere a sua instalação, é necessário que esses estejam logo depois da última superfície de convecção do gerador de vapor.

4.3 PRÉ-AQUECEDORES

De forma análoga aos economizadores, os pré-aquecedores são instalados de modo prévio à fornalha, com o intuito de aquecer o ar que participará da reação de combustão. Dessa forma se aprimora a eficiência do processo de queima do combustível e também da geração de vapor como um todo (PERA, 2009).

Conforme Telles (2009), os pré-aquecedores de ar colaboram por elevar a temperatura do ar de combustão antes mesmo que esses entrem nas fornalhas ou

queimadores, por meio da troca de calor com os produtos de combustão que saem da caldeira. Além de ser vantajosa pelo fato de elevar o rendimento térmico devido a redução das perdas nos gases de exaustão, o ar pré-aquecido tende a proporcionar melhorias significativas tanto no funcionamento quanto no rendimento das fornalhas ou dos queimadores.

Ainda para Telles (2009), o ar pré-aquecido eleva a estabilidade de chama, a temperatura interna da câmara de combustão, aumentando dessa forma a troca de calor por radiação, possibilitando assim um uso menor do excesso de ar. O fato de ser usado também o calor sensível dos gases de combustão não impossibilita seu uso ligado ao economizador, onde esse ao ser utilizado, deve vir antes mesmo do pré-aquecedor, levando em consideração o fato de que existe certos limites em relação a temperatura máxima do ar de combustão segundo o tipo de queimador e combustível usado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Se considera que os objetivos desse trabalho foram atendidos, pois foram exibidas diversas informações teóricas que propiciam conhecimentos fundamentais sobre o assunto pesquisado. Diante do exposto, se evidenciou que a geração de vapor nas caldeiras, é requisito primordial para o funcionamento da grande parcela das indústrias, independente do segmento de atuação.

Em todo processo industrial, as caldeiras fazem utilização de um enorme volume de combustíveis e, por isso, se exibem como grande parte dos gastos das indústrias. Se sabe que a eficiência térmica em caldeiras nunca será de 100%, sempre haverá e a finalidade é sempre reduzir essas perdas a partir de procedimentos e técnicas.

Um dos princípios básicos para que a caldeira atue de modo mais estável na geração do vapor, é o acréscimo da temperatura da água de reposição. A instalação de um trocador de calor, também chamado 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, em função do custo mensal que seria gasto com energia elétrica para elevação da temperatura da água.

A geração e distribuição eficiente de vapor através de uma indústria pode fazer a diferença entre um processo economicamente viável e seguro para outro processo fadado ao fracasso. Dessa forma, é relevante compreender os conceitos e funcionamento dessa máquina para que se possa analisar de forma adequada o ciclo de geração de vapor, para maximizar assim, a sua eficiência energética. Desse modo, com o intuito de propiciar estudos mais minuciosos e como sugestão para trabalhos vindouros, se pode averiguar a importância da eficiência energética em trocadores de calor para as indústrias brasileiras.

REFERÊNCIAS

ALTAFINI, C. R. **Curso de Engenharia Mecânica**. Disciplina de Máquinas Térmicas. Apostila sobre Caldeiras. Universidade de Caxias do Sul. 2012.

ANEEL, **Programa de Eficiência Energética**. 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/> Acesso em: 15 abr. 2020.

BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2015.

CEFET – MG. **Centro de Educação Tecnológica de Minas Gerais**. Curso técnico de mecânica. Disciplina de máquinas térmicas. Belo Horizonte, 2009.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Eficiência energética no uso de vapor**. FUPAI/EFFICIENTIA. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2015.

CUNHA, E. **Análise da influência das variáveis da caldeira de recuperação química no sistema de abate do material particulado da indústria de celulose e papel**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Itajubá 2015.

DADAM, A; NICOLAU, V; JAHN, T; HARTKE, R. **Análise Numérica Comparativa de Combustíveis Utilizados em Fornos Túneis**. Cerâmica Industrial, 11 (4) Julho/Agosto, 2006.

DAUMICHEN, R. **Curso sobre distribuição de vapor**. São Paulo: Instituto de Petróleo, 2015.

DIÓRIO, A. **Geração e Distribuição de Vapor**. Londrina: Educacional, 2019.

ELETROBRAS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Eficiência energética no uso de vapor**. Rio e Janeiro: Eletrobrás, 2005.

IEA - Agência Internacional de Energia. **Luz é trabalhista perdido**. *Fact Sheet* Paris, França, 2017.

JANNUZZI, G.; SWISHER, J. **Planejamento Integrado de Recursos Energéticos**. São Paulo, 2007.

LAGEMANN, V. **Combustão em caldeiras industriais: óleos e gás combustível**. 1. ed. – Rio de Janeiro: Interciência, 2016.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas industriais** - 4ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MORAN, M. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. Tradução e Revisão Técnica de Robson Pacheco Pereira et al. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

ODDONE, C. **Cogeração**: Uma alternativa para produção de eletricidade. Dissertação de Pós Graduação. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

PEDERIVA, A; MATTIONI, R. **Dimensionamento de uma tubulação de vapor para uma fábrica de ração animal**. Estudo parte da Terceira Semana Internacional das Engenharias da FAHOR. 2013.

PERA, H. **Geradores de vapor**. Editora Fama, 2a Edição, 2009.

PINHEIRO, P. Controle de combustão: Otimização do excesso de ar. II Congresso de Equipamentos e Automação da Indústria Química e Petroquímica, Rio de Janeiro. **Anais..** Automação Industrial São Paulo: ABIQUIM, Associação Brasileira da Indústria Química e de Produtos Derivados, p. 157-162, 2015.

SILVA, R. **Estudo sobre os procedimentos para elaboração de um plano de controle de emergência na indústria química**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2009.

TELLES, P. **Tubulações industriais**. 9a edição. Rio de Janeiro: S.A, 2009.

ZATTONI, C. **Materiais para Tubulação**. São Paulo: FATEC-SP, 2008.