

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
IGOR HARTWIG BISSOTO

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE CALDEIRAS INDUSTRIAIS A PARTIR
DO DIMENSIONAMENTO DO TAMANHO DO CAVACO**

CASCABEL
2019

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

IGOR HARTWIG BISSOTO

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE CALDEIRAS INDUSTRIAIS A PARTIR
DO DIMENSIONAMENTO DO TAMANHO DO CAVACO**

Trabalho apresentado na disciplina e Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Professor Orientador: Mestre Eng. Mecânico
Eliseu Avelino Zanella Junior.

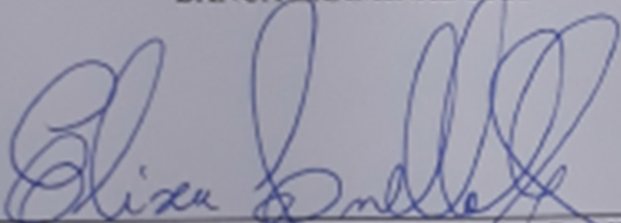
**CASCABEL
2019**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
IGOR HARTWIG BISSOTO**

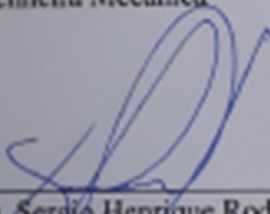
**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE CALDEIRAS INDUSTRIAIS A PARTIR DO
DIMENSIONAMENTO DO TAMANHO DO CAVACO**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor MESTRE ENG. ELISEU AVELINO ZANELLA JUNIOR

BANCA EXAMINADORA



Orientador Prof. Mestre Eng. Eliseu Avelino Zanella Junior
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenharia Mecânica



Professor Mestre Eng. Sergio Henrique Rodrigues Mota
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico



Professor Eng. Especialista Rogerio Luiz Ludegero
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico

Cascavel, 26 de novembro de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e toda a minha família,
por todo o apoio e incentivo durante minha caminhada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus que me deu saúde, força e fé para a realização desta pesquisa.

A minha família, em especial aos meus pais, por acreditar na minha capacidade e sempre me incentivar à busca pelo conhecimento.

Ao meu orientador Mestre Elizeu, pela oportunidade de poder realizar este trabalho e dedicação em prol do mesmo.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

“Somos o que repetidamente fazemos, a excelência, portanto, não é um feito
e sim um hábito”

(ARISTÓTELES)

RESUMO

O presente trabalho versa sobre a eficiência energética de uma caldeira industrial instalada em um laticínio localizado no sudoeste do Paraná. Esta pesquisa ampara-se na necessidade de conhecimento sobre o consumo de combustíveis vegetais e redução de custos, a partir da análise de diferentes tamanhos de cavaco empregados como combustível de caldeiras industriais, objetivando melhorar a eficiência energética e, conseqüentemente, reduzir o consumo de cavaco da caldeira, e dessa forma, redimensionando também as taxas de injeção de ar primário, secundário e de exaustão dos gases gerados pela queima de acordo com o tamanho do cavaco escolhido, a fim de diminuir as perdas de calor e emissão dos gases poluentes no meio ambiente. A metodologia aplicada para a concretização desse estudo emanou da coleta dos dados de consumo da caldeira anteriormente ao desenvolvimento da pesquisa, onde após a separação dos diversos tamanhos de cavacos obtidos de uma única carga recebida do fornecedor, utilizou-se três tamanhos diferentes de cavaco que foram separados através de duas peneiras. Em seguida, aconteceu a realização da queima dos cavacos separados e a obtenção da produção de vapor da caldeira seguiu parametrizada igualmente para todos os testes, sendo que os parâmetros de ar primário, secundário e de exaustão foram mantidos em modo automático para manter uma boa eficiência de queima. Com base na efetivação desta pesquisa, foi possível precisar que a queima de cavaco mista dificulta a parametrização automática da caldeira, a qual influência diretamente na queima do combustível, reduzindo a eficiência e aumentando o consumo de cavaco e, em consequência elevando os custos com o combustível.

Palavras-chave: Combustível; Parametrização; Queima.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

% - Porcentagem.

cm – Centímetro.

m³ - Metro cúbico.

Kcal/kg – Quilocaloria por quilograma.

Kg – Quilograma.

Kgf/cm² - Quilograma força por centímetro quadrado.

Kg/m³ - Quilograma por metro cúbico.

KPa – Quilopastal.

mm – Milímetro.

m – Massa.

P – Peso específico.

v – Volume.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Componentes da caldeira.....	16
Figura 2 - Caldeira Flamotubular.	18
Figura 3 - Caldeira Aquatubular.....	19
Figura 4 - Picador de Madeira	21
Figura 5 – Granulometria do cavaco.....	22
Figura 6 – Granulometria do cavaco.....	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação segundo a origem dos combustíveis.	14
Tabela 2 – Classificação conforme estado físico dos combustíveis.	14
Tabela 3 – Dados da caldeira depois do 1º teste.	25
Tabela 4 – Dados da caldeira depois do 2º teste.	26
Tabela 5 – Dados da caldeira depois do 3º teste.	26
Tabela 6 – Dados da caldeira após os testes.....	27
Tabela 8 – Custo real de cavaco dos testes.....	29
Tabela 9 – Diferença de custos dos testes.....	30
Tabela 10 – Estimativa dos custos anuais dos cavacos.....	30

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 OBJETIVO GERAL.....	11
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.3 JUSTIFICATIVA	11
1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	12
1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:	13
2.1 GERADORES DE VAPOR OU CALDEIRAS	13
2.1.1 HISTÓRIA DAS CALDEIRAS.....	13
2.1.2 TIPOS DE CALDEIRAS	15
2.1.3 CONSTRUÇÃO BÁSICA DAS CALDEIRAS	15
2.1.4 CALDEIRAS FLAMOTUBULARES	17
2.1.5 CALDEIRAS AQUATUBULARES	18
2.2 COMBUSTÍVEL.....	19
2.2.2 COMBUSTÍVEL LÍQUIDO	20
2.2.3 COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS	20
2.2.4 LENHA	20
2.2.5 CAVACO	20
2.5 VAPOR.....	23
3 METODOLOGIA.....	23
4 DESENVOLVIMENTO	25
5 CONCLUSÃO	29
6 TRABALHOS FUTUROS.....	32
REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

O cenário industrial brasileiro é composto por indústrias siderúrgicas, alimentícias, petroquímicas e automobilísticas, e na maioria delas torna-se necessário a utilização de caldeiras a vapor movidas por combustíveis vegetais.

Segundo dados do IBGE, o Brasil teve um crescimento de 1,1% na produção industrial em 2018, e de acordo com analistas do Banco Central a expectativa para 2019 é que a produção industrial brasileira avance 3,04%. Consequentemente, com o aumento da produção o consumo de vapor produzido pelas caldeiras também se eleva, e com isso, o consumo de combustível automaticamente cresce. Sendo assim, faz-se necessário realizar melhorias nas máquinas, bem como utilizar o combustível de tal forma que sua eficiência seja a melhor possível.

O presente trabalho tem como objetivo comparar diferentes tamanhos de cavaco de *Pinus elliottii*, o qual é usado como combustível de uma caldeira instalada em um laticínio do sudoeste do Paraná. A empresa utiliza este combustível por ser abundante na região e depender de pouquíssima mão de obra em seu manuseio e estocagem. No entanto, foi constatada a dificuldade em definir, junto ao fornecedor, um tamanho de cavaco que melhor se adapta à queima na caldeira de 15 toneladas.

Desse modo, ao longo do estudo foi utilizados e analisados diferentes tamanhos de cavaco de pinus na caldeira de 15 toneladas, com o objetivo de otimizar a queima deste combustível e melhorar a eficiência energética da caldeira, buscando assim diminuir o consumo de cavacos e reduzir os custos mensais. No decorrer desta pesquisa serão comparados os resultados dos diferentes tamanhos de cavaco para determinar qual é o melhor tamanho de cavaco a ser empregado.

1.1 OBJETIVO GERAL

Otimizar a eficiência da caldeira de 15 toneladas em função da queima de cavaco de pínus na fabricação de produtos lacteis.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar diferentes tamanhos de cavaco de pínus para melhorar a eficiência da queima da caldeira de 15 toneladas.
- Quantificar em m^3 o consumo de cavaco conforme seu respectivo tamanho.
- Registrar a alteração econômica dos diferentes tamanhos de cavaco de pínus.

1.3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho surge a partir da experiência profissional em uma empresa de laticínios na qual se constatou a dificuldade em definir junto ao fornecedor um tamanho de cavaco que melhore a eficiência da queima na caldeira de 15 toneladas, diminuindo assim o consumo de combustíveis vegetais e consequentemente reduzindo os custos, sendo desenvolvido em uma empresa particular no município de Três Barras do Paraná.

Em âmbito acadêmico é um estudo que proporcionou aos futuros Engenheiros Mecânicos uma nova possibilidade de trabalho, e para as empresas desta mesma natureza poderá servir como fonte de pesquisa para implantação neste seguimento.

1.4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Apesar de existirem inúmeros fornecedores de cavaco no mercado, cada um possui sua forma de cortá-lo, pois há cavaco feito direto da tora e também quem o faça de refugos, os quais não foram possíveis utilizá-los para o seu devido fim. Isto posto, a granulometria do cavaco é muito diferente dependendo do fornecedor, e, com isso, acaba diminuindo a eficiência da queima, aumentando consideravelmente o consumo de biomassa. Tendo como base essa perspectiva, questiona-se: como melhorar a eficiência da caldeira de 15 toneladas em função da queima de cavaco de pinus na fabricação de produtos lácteos?

1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa será aplicada na região oeste do estado do Paraná, de modo específico em um Laticínio, localizado em Três Barras do Paraná- PR, estando voltado para empresas que utilizam caldeiras movidas a cavaco de pinus seco.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

2.1 GERADORES DE VAPOR OU CALDEIRAS

2.1.1 HISTÓRIA DAS CALDEIRAS

Conforme (ALTAFINI, 2002), o primeiro protótipo primitivo de caldeira foi desenvolvido ainda no século II A.C por Heron de Alexandria. Seu equipamento evaporizava água e movimentava uma esfera ao redor do seu eixo e, apesar dessa invenção, as caldeiras de geração de vapor só começaram a ser utilizadas em indústrias na Primeira Revolução Industrial.

Segundo (BAZZO, 1995), os primeiros equipamentos destinados para a geração de vapor se deram no início do século XVIII, devido à necessidade de se encontrar alternativas na geração de calor que substituíssem a queima direta de carvão fóssil. Nos dias atuais essa concepção evoluiu a ponto das indústrias dependerem do vapor d'água. Tal procura pelo vapor como energia de trabalho se dá pelo seu elevado calor específico e por ser um fluido abundante no meio industrial. Atualmente o vapor é aplicado em uma escala bastante ampla, sendo aplicado em indústrias de alimentos, bebidas, têxtil, papel, celulose, química, entre outras. Dependendo da aplicação empregada esse eflúvio pode ser usado na forma de vapor saturado ou superaquecido.

O item 13.1.1 da NR 13 define que caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refeedores e implementos similares adotados em unidades de processo.

Na grande maioria das caldeiras industriais e nas centrais termoelétricas utiliza-se vapor de água como agente transmissor de energia. Tudo isso se deve ao fato de que a água é o fluido mais abundante no mundo, além de possuir grande poder entálpico e ser pouco corrosivo, não é tóxico nem inflamável ou explosivo. O vapor gerado pela caldeira é empregado para aquecimento ou para produção de energia mecânica (ALTAFANI, 2002).

Leite e Militão (2008), denominam como caldeiras ou geradores de vapor todo equipamento capaz de transformar água líquida em vapor d'água em pressões superiores a 1 atm, ressaltando ainda que a energia usada à operação é dada pela queima de um combustível.

De acordo com Teixeira e Lora (2004), geradores de vapor como também chamados de caldeiras podem utilizar combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, além da diferença física dos combustíveis eles possuem também diferenças químicas, sendo que a principal delas é o poder calorífico do combustível. As Tabelas 1 e 2 apresentam a classificação dos combustíveis conforme a origem e estado no qual se encontram.

Tabela 1 – Classificação segundo a origem dos combustíveis.

Origem	Combustível natural	Combustíveis derivados
Fósseis	petróleo	gás liquefeito de petróleo (GLP), gasolina, óleos diesel, combustíveis e residuais
	carvões minerais	gases manufaturados, coque
	gás natural	gás natural liquefeito (GNL)
Naturais	resíduos agroindustriais	bagaço de cana, lixívia negra, casca de arroz
	lenha	carvão vegetal, gases manufaturados, metanol
	resíduos animais	biogás
Nucleares	Urânio	U-235, U-238
	Tório	Th-232

Fonte: Teixeira e Lora (2004)

Tabela 2 – Classificação conforme estado físico dos combustíveis.

Estado físico	Combustíveis
Sólidos	carvão mineral, carvão vegetal, xisto, turfa, lenha
Líquidos	gasolina, querosene, diesel, óleos combustíveis
Gasosos	gás natural, GLP, biogás

Fonte: Teixeira e Lora (2004)

2.1.2 TIPOS DE CALDEIRAS

Em conformidade com a NR-13, estabelece que as indústrias que possuem caldeiras ou vasos de pressão precisam fazer inspeção periódica dos mesmos, determinando a operação de manutenção do sistema, visando segurança e saúde dos trabalhadores. Dessa forma, as caldeiras são agrupadas em três categorias:

- Caldeiras da categoria A - são aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1960 KPa (19.98 Kgf/cm²);

- Caldeiras da categoria C - são aquelas cuja pressão de operação é igual ou inferior a 588 KPa (5.99 Kgf/cm²) e o volume interno é igual ou inferior a 100 (cem) litros;

- Caldeiras da categoria B - são todas as caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores.

2.1.3 CONSTRUÇÃO BÁSICA DAS CALDEIRAS

O rendimento das caldeiras depende de suas características de construção e do combustível utilizado, podendo variar de 70% a 90%. As principais partes que constituem uma caldeira representada na Figura 1 são:

Fornalha: é o local onde acontece a queima do combustível e também conhecida com grelha. Nesse local para que a caldeira tenha uma melhor eficiência deve ocorrer a queima total do combustível, podendo ser gasoso, sólido ou líquido para extração de calor (PROMINP, 2008).

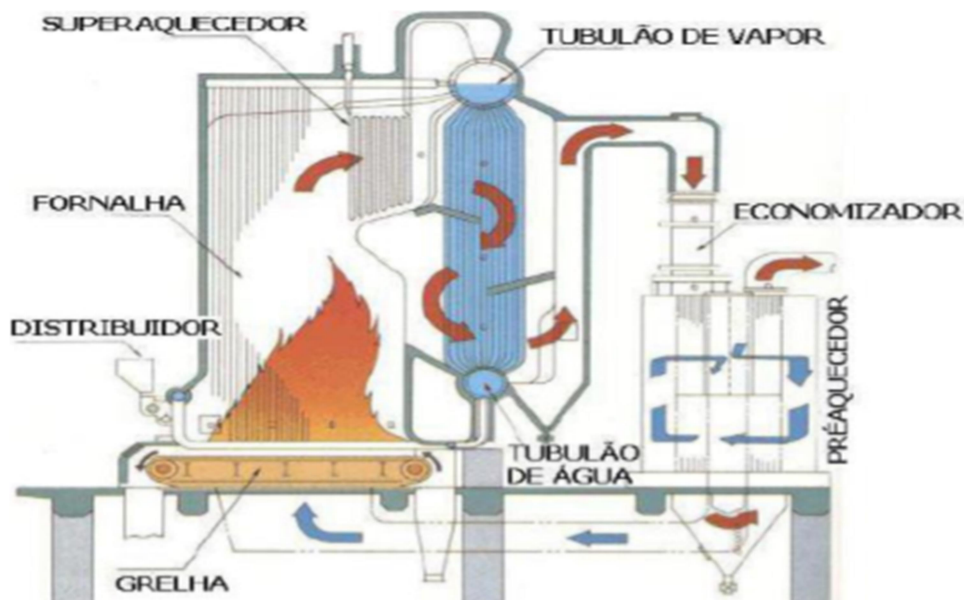
Superaquecedor: esse equipamento é responsável pelo vapor superaquecido para que não haja líquido no vapor, quando ocorre uma elevação da temperatura do vapor de água saturado e, conseqüentemente, aumentando sua entalpia para que não condense em baixa pressão, evitando assim a corrosão da turbina (PROMINP, 2008).

Economizador: funciona como um trocador de calor elevando a temperatura da água na alimentação para obter um maior rendimento na geração do vapor, impedindo dessa forma choques térmicos e melhorando ainda mais a eficiência térmica (PROMINP,2008).

Pré-aquecedor: tem como finalidade aquecer o ar que entra na caldeira utilizando os gases da chaminé, aproveitando o calor da exaustão dos gases do combustível, fazendo ocorrer a troca térmica com ar de alimentação, aumentando a eficiência na queima e ocasionando melhoria no rendimento térmico (PROMINP, 2008).

Chaminé: Após a queima do combustível na fornalha, os gases quentes percorrem o circuito dos gases, desenvolvendo diversas passagens, para o melhor aproveitamento do calor, sendo finalmente lançados à atmosfera pelas chaminés. A chaminé possui uma altura bem elevada para que os gases eliminados sejam levados por correntes de ar (PROMINP, 2008).

Figura 1- Componentes da caldeira.



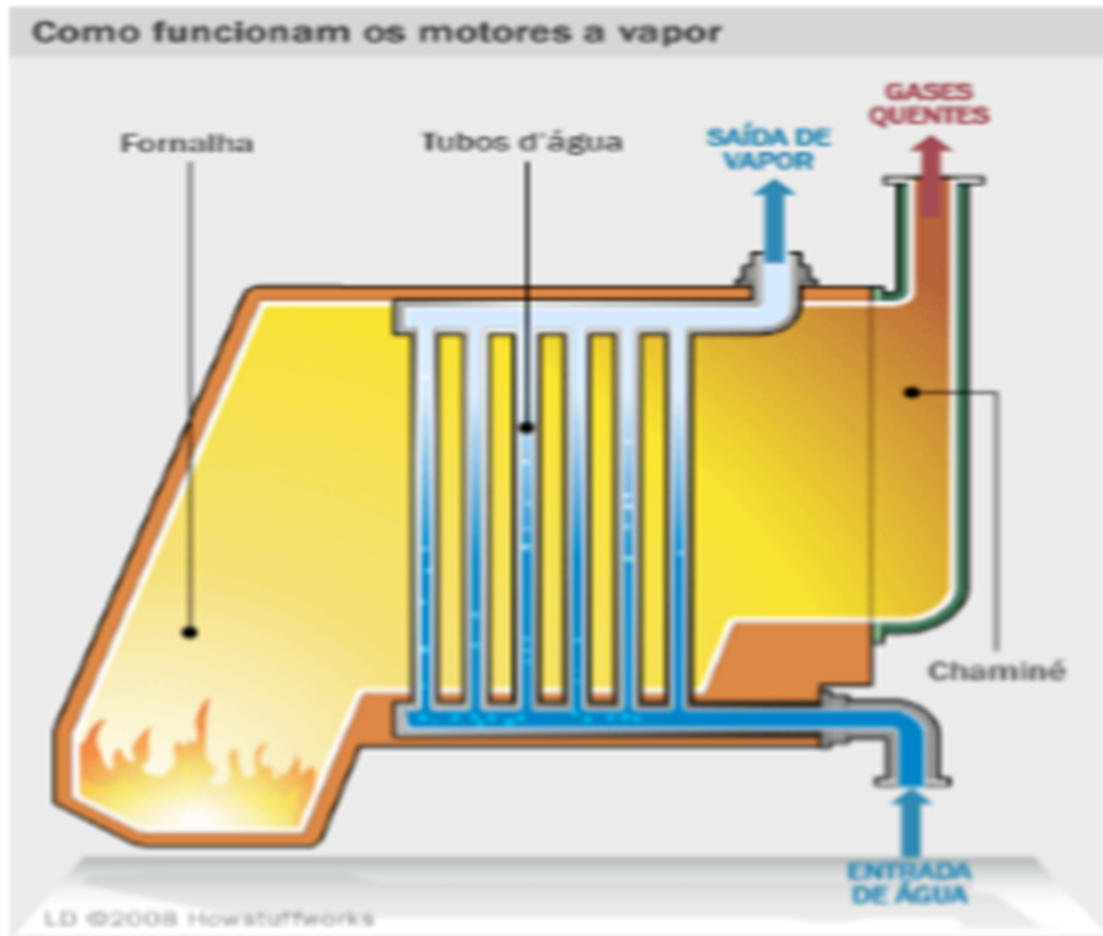
Fonte: Fontes alternativas UTFPR (2013).

Existem vários tipos de caldeiras, as quais podem ser determinadas para diversos critérios. As caldeiras mais genéricas se classificam em flamotubulares e aquatubulares (ALTAFINI, 2002).

2.1.4 CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

As caldeiras flamotubulares mostradas na figura 2 são caracterizadas pelos gases que circulam pela parte interna da caldeira, ou seja, os gases são conduzidos pelos tubos no interior da caldeira. Essas caldeiras são construídas para trabalhar com pressões limitadas, devido às partes internas que estão submetidas a grandes pressões. Algumas caldeiras que não são muito usadas são as caldeiras flamotubular verticais. Todavia, as caldeiras horizontais são encontradas mais facilmente nas indústrias atualmente, podem ser fabricadas com fornalha lisa ou corrugadas com a traseira seca ou molhada. As caldeiras que utilizam como fonte de combustível líquido ou gasoso, o queimador é colocado na parte da frente da fornalha, predominando a substituição de calor por radiação luminosa e nas partes subsequentes da caldeira caixas de reversão e tubos, a troca de calor se processa inicialmente por radiação gasosa e convecção. A fornalha e os tubos ficam em contato com a água e são apoiados no espelho por soldas ou mandrilagem. No tubulão externo os espelhos são ancorados por soldas, submetidos à pressão interna do vapor e os tubos à pressão externa. As caldeiras flamotubulares são limitadas em produção e, geralmente, não ultrapassam 15 ton/h de produção de vapor e 18 bar de pressão de trabalho (ALTAFINI 2002).

Figura 2 - Caldeira Flamotubular.

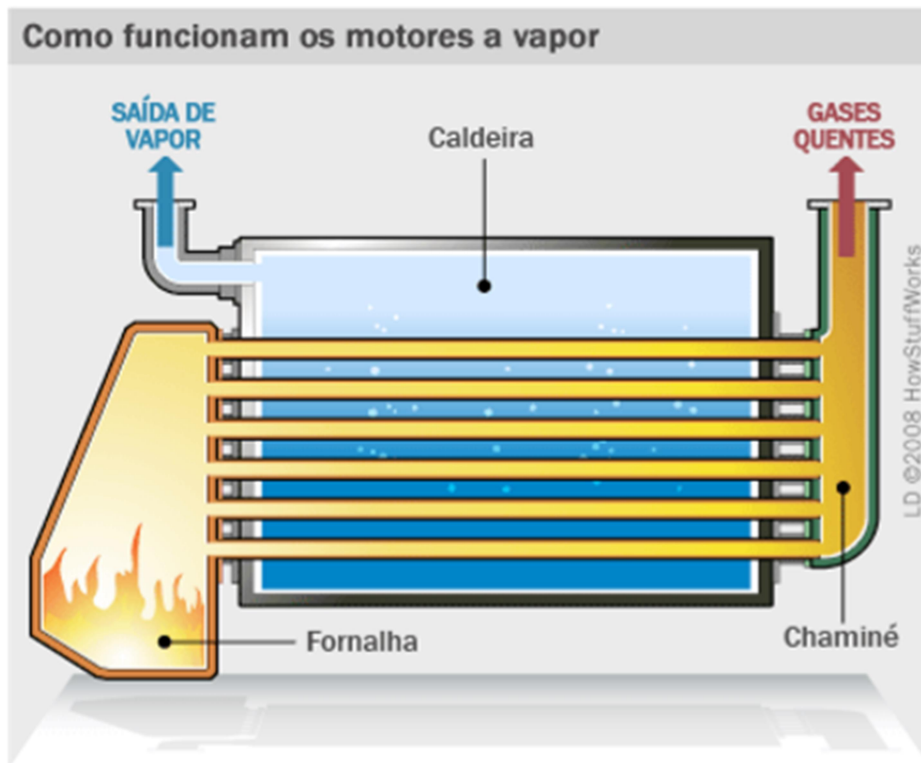


Fonte: Howstuffworks (2008).

2.1.5 CALDEIRAS AQUATUBULARES

Nas caldeiras aquatubulares, Figura 3, ocorre um processo diferente das caldeiras flamotubulares. Os gases gerados pela queima do combustível circulam ao redor dos tubos que conduzem massa de água e vapor. Esse tipo de caldeira tem uma maior produção de vapor quando é comparada com as flamotubulares. As caldeiras aquatubulares são mais utilizadas por possuir vasos pressurizados internamente com menores dimensões. Tal modelo de caldeira possibilita a adaptação de acessórios como o superaquecedor, que permite a geração do vapor superaquecido, utilizado no funcionamento de turbinas. As aquatubulares são mais encontradas nas indústrias devido a esses fatores (ALTAFINI 2002).

Figura 3 - Caldeira Aquatubular.



Fonte: Howstuffworks (2008).

2.2 COMBUSTÍVEL

É possível alimentar as caldeiras com combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, podendo ser encontrado comercialmente em diferentes formas. Os combustíveis mais utilizados nas caldeiras são os combustíveis sólidos, também conhecidos como biomassa, pelo fato de ser encontrar em grandes quantidades em certas regiões do país, como podemos observar na Figura 04,a qual demonstra o uso de cavaco para alimentação da caldeira. Na década de 70, o combustível líquido teve um grande incentivo pelo baixo custo. Atualmente os combustíveis gasosos estão em expansão no país e necessitam de vários estudos para adaptação desse combustível para seu consumo. (ARRUDA, 2009).

2.2.1 COMBUSTÍVEL GASOSO

Arruda (2009), afirma que os combustíveis gasosos podem ser obtidos através de rejeitos de processos industriais ou são extraídos de reservatórios

naturais. Os mais conhecidos são o gás natural, gás liquefeito de petróleo e o biogás adquirido através de tratamento primário.

2.2.2 COMBUSTÍVEL LÍQUIDO

Os combustíveis líquidos minerais podem ser conseguidos através da refinação do petróleo, destilação de xisto ou ainda da hidrogenação do carvão, e a grande característica entre eles é serem formados de hidrocarbonetos. Os combustíveis líquidos não minerais são os álcoois e os óleos vegetais, onde os álcoois são encontrados na forma de álcool metílico e álcool etílico. (CEFET-MG, 2009).

2.2.3 COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS

Os combustíveis sólidos utilizados nas caldeiras são derivados de madeira, comercializados em forma de lenha (toras cortadas em unidade de metro), lascas de madeira que foram descartadas pelas madeireiras ou ainda trituradas diretamente das toras por um equipamento chamado de picador e o briquete (bloco cilíndrico compacto, de alta densidade, composto por resíduos de madeiras em geral).

2.2.4 LENHA

Segundo Silva (2000), denomina-se com lenha todo e qualquer fragmento de madeira utilizado como combustível. A lenha é considerada o primeiro combustível empregado pelo ser humano. A madeira é uma fonte renovável de energia, na qual sua exploração requer de pouca tecnologia e mão de obra pouco qualificada, o que torna seu custo relativamente baixo.

A madeira possui teor de enxofre mínimo, sendo apresentada pelas madeireiras com umidades que vão de 20 % até 45 %, possuindo umidade de 20% e seu poder calorífico pode chegar até 2.300 kcal/kg com massa específica de 340 kg/m³ (BRINOP, 2009).

2.2.5 CAVACO

O cavaco é um derivado de madeira, composto por lascas de toras, refugos de madeireiras, ou mesmo de partes inutilizáveis como galhos e as copas das

árvores, conforme figura 4. Apresenta um valor específico inferior a 2500 kcal/kg, massa específica de 330 kg/m³ e teor de enxofre mínimo (CTGAS, 2009).

Figura 4 - Picador de Madeira



Fonte: SOARES, (2016)

Conforme (LIPPEL, 2014), a granulometria dos cavacos pode influenciar na produtividade das caldeiras, visto que cada caldeira tem suas “exigências” específicas de tamanho. Nas figuras 5 e 6 abaixo são apresentadas as classificações dos cavacos pela sua granulometria, de acordo com LIPPEL.

Figura 5 – Granulometria do cavaco



Fonte: LIPPE, (2014)

Figura 6 – Granulometria do cavaco



Fonte: LIPPEL, (2014)

Dependendo do tamanho do cavaco escolhido, é necessário que, durante o processo de picagem, o cavaco passe por uma peneira responsável pela separação dos diferentes tamanhos. Os cavacos de madeira passam pelo processo de picagem e são depositados em pilhas que podem ser estocadas ou carregadas logo em seguida para entrega aos consumidores (SOARES, 2016).

2.5 VAPOR

O vapor tem uma grande importância como fonte industrial de calor. O vapor além de ser uma energia limpa proporciona um aquecimento rápido e uniforme. Um aquecimento a vapor apresenta 1,5 a 2 vezes mais eficiência do que aqueles que utilizam água quente (SILVA, 2000).

3 METODOLOGIA

Lakatos e Marconi (2003), asseguram que toda e qualquer pesquisa que objetiva conseguir informações e/ou conhecimentos sobre um problema, para o qual se busca uma resposta, ou de uma hipótese que se queira confirmar, ou, ainda, encontrar novos fenômenos ou as relações entre eles, é denominada como pesquisa de campo. Toda pesquisa de campo necessita, primeiramente, a execução de uma pesquisa bibliográfica sobre o tema em estudo. Este foi o primeiro passo para se saber em que circunstância se encontra o problema em estudo, quais trabalhos já foram feitos a respeito e as opiniões que imperam a respeito do assunto.

Dessa forma, a pesquisa bibliográfica permitiu a delimitação de um modelo teórico inicial de referência, da mesma forma que ajudou na limitação das variáveis e na realização do plano geral da pesquisa, destacando ainda que toda pesquisa experimental na qual a intenção principal é o teste de hipóteses que se refere às relações de tipo causa-efeito. Logo, todos os estudos dessa natureza utilizam projetos experimentais que abrangem os seguintes fatores: grupos de controle (além do experimental), seleção da amostra por técnica probabilística e manipulação das variáveis independentes, a fim de controlar ao máximo os fatores relevantes.

As técnicas rigorosas de amostragem possibilitam a generalização das descobertas a que se chega pela experiência. No que diz respeito, para que possam ser descritas quantitativamente, as variáveis relevantes são especificadas. Sendo assim, os vários tipos de estudos experimentais foram realizados tanto "em campo", ou seja, no ambiente natural, quanto em laboratório, onde o ambiente é severamente controlado.

Portanto, conclui-se que o presente estudo foi uma pesquisa experimental de campo em que, inicialmente, realizou-se um levantamento de dados da caldeira

de 15 toneladas, que se desenvolveu juntamente com seu histórico de consumo de cavaco, pressão de trabalho, produção de toneladas de vapor por hora e, principalmente, levantamento do histórico do tipo e tamanho de cavaco utilizado até pouco antes do início do estudo.

Em seguida, foram utilizadas duas peneiras desenvolvidas pela empresa com o intuito de separar os cavacos de diferentes tamanhos. A primeira peneira separou cavacos com tamanho de até 6 cm, e a segunda peneira separou os cavacos com até 4 cm. O cavaco que passou pelas duas peneiras foi analisado como cavaco do tipo fino, e foram separados quantidades suficientes de cada tamanho de cavaco escolhido para o desenvolvimento da pesquisa. A unidade de medida utilizada foi o metro cúbico. Todo o cavaco foi retirado de uma única carga recebida do fornecedor para garantir que as características do cavaco fossem as mesmas e o único diferencial referiu-se ao seu tamanho. Depois de separadas as quantidades pelos seus respectivos tamanhos, cada montante foi armazenado e queimado separadamente no queimador da caldeira, observando que para cada montante foram coletados todos os dados possíveis durante sua respectiva queima. Todos os dados de medição foram extraídos do painel automático da caldeira em teste. Os dados coletados foram o consumo real de cavaco em m^3 a pressão da caldeira em bar e a vazão em m^3 de água na entrada da caldeira.

Após a finalização da coleta de dados de todos os tamanhos de cavaco testados na caldeira, fez-se uma comparação entre o histórico já existente e os dados adquiridos na pesquisa para chegar a um resultado final, podendo assim mostrar qual tamanho de cavaco teve a melhor eficiência energética. Com resposta concluída do consumo dos tamanhos de cavacos analisados foi calculado a alteração econômica dos mesmos.

4 DESENVOLVIMENTO

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizadas duas chapas de aço expandida para fabricação de duas peneiras utilizadas para separar os cavacos, com tamanho de 1,2x2,0m e bitola de 50x100mm, sendo que a peneira 1 separou cavacos com até 50x50mm e a peneira 2 cavacos de até 30x30mm, e o cavaco que passou pelas duas peneiras foi denominado com cavaco fino. O cavaco separado foi denominado cavaco seco com umidade abaixo de 30%, onde os três tamanhos de cavaco foram selecionados da mesma carga de cavaco recebida do fornecedor no dia da classificação.

Para realização dos testes foram coletados os dados da caldeira antes da inicialização. Toda a biomassa mista que estava no silo da caldeira foi queimada anteriormente a inicialização dos ensaios e, ainda antes das experiências realizadas. A caldeira foi ligada no modo automático com parâmetros iguais a 19 kgf/cm² e com 10 toneladas de vapor por hora.

Na iniciação dos testes, o silo da caldeira foi abastecido apenas com o cavaco grosso (90mm a 50mm), e durante uma hora a mesma foi abastecida apenas por este tipo de cavaco. Ao final desta hora de experiência foram coletados os dados da respectiva queima.

Tabela 3 – Dados da caldeira depois do 1º teste.

14/07/2019	PV bar	Total Cavaco m ³	Total Água m ³	Meta Total Cavaco m ³
06:00	19	6,987	10,5	8,3265
07:00	19	6,807	11	8,723
08:00	19	6,641	9,7	7,6921
09:00	19	6,195	10,3	8,1679

Fonte: Autor (2019).

Após o término da primeira hora de testes, com o silo vazio, a caldeira começou a ser abastecida com o cavaco médio (50mm a 30mm) e a caldeira foi mantida nos mesmos parâmetros da primeira hora de teste para não haver divergência de resultados. Quando a segunda hora de testes terminou foram coletados novamente os dados da queima, obtendo assim o resultado expressado na tabela abaixo.

Tabela 4 – Dados da caldeira depois do 2º teste.

14/07/2019	PV bar	Total Cavaco m³	Total Água m³	Meta Total Cavaco m³
06:00	19	6,987	10,5	8,3265
07:00	19	6,807	11	8,723
08:00	19	6,641	9,7	7,6921
09:00	19	6,195	10,3	8,1679
10:00	19	6,506	10	7,93

Fonte: Autor (2019).

No início da terceira e última hora de teste, a caldeira foi alimentada com o cavaco fino (cavaco menor que 30mm), sendo que não houve mudança de parâmetros. Os testes continuaram e no final da terceira hora os dados da queima foram coletados, obtendo os seguintes resultados:

Tabela 5 – Dados da caldeira depois do 3º teste.

14/07/2019	PV bar	Total Cavaco m³	Total Água m³	Meta Total Cavaco m³
06:00	19	6,987	10,5	8,3265
07:00	19	6,807	11	8,723
08:00	19	6,641	9,7	7,6921
09:00	19	6,195	10,3	8,1679
10:00	19	6,506	10	7,93
11:00	19	7,151	10	7,93

Fonte: Autor (2019).

Com o término dos testes a caldeira voltou a ser alimentada com o cavaco misto e seguindo a produção de vapor conforme demanda da produção.

Tabela 6 – Dados da caldeira após os testes.

14/07/2019	PV bar	Total Cavaco m ³	Total Água m ³	Meta Total Cavaco m ³
06:00	19	6,987	10,5	8,3265
07:00	19	6,807	11	8,723
08:00	19	6,641	9,7	7,6921
09:00	19	6,195	10,3	8,1679
10:00	19	6,506	10	7,93
11:00	19	7,151	10	7,93
12:00	19	5,929	8,7	6,8991
13:00	19	6,454	9,3	7,3749
14:00	19	6,31	8,6	6,8198
15:00	19	6,543	9,1	7,2163
16:00	19	6,741	9,8	7,7714
17:00	19	5,881	9	7,137
18:00	19,1	5,81	8,2	6,5026
	TOTAL	83,955	124,2	7,5762
				6,4581
		Média kg de vapor por hora	9553,8	

Fonte: Autor (2019).

Durante cada teste foram coletadas amostras para calcular o peso específico de cada tipo de cavaco, alcançando os resultados demonstrados na tabela a seguir. Para descobrir ao peso específico de cada amostra coletada foi utilizado uma caixa de papelão com volume igual a 0,06 m³, em seguida a caixa foi enchida com o cavaco e pesada em uma balança aferida pelo laticínio, foram realizadas quatro pesagens, sendo, a primeira pesagem com o cavaco misto a segunda com cavaco grosso depois com cavaco médio e por ultimo com cavaco fino obtendo os seguintes pesos listados abaixo na tabela. Para o calculo do peso específico foi utilizado a formula:

$$p = \frac{m}{v}$$

Tabela 7 – Peso específico do cavaco.

Tipo de Cavaco (mm)	Quantidade coletada (m ³)	Massa (kg)	Peso Específico kg/m ³
Misto antes do teste	0,06	22,50	375,0000
Grosso (90 à 50)	0,06	23,18	386,3333
Médio (50 à 30)	0,06	22,35	372,5000
Fino (< 30)	0,06	21,61	360,1667

Fonte: Autor (2019).

5 CONCLUSÃO

Com base nos dados alcançados a partir dos respectivos testes, tornou-se possível perceber que o cavaco grosso teve melhor rendimento, consumindo 6,195 m³ de cavaco para 10,3 toneladas de vapor saturado na pressão de 19 kgf/cm², obtendo-se assim um consumo de 0,6014 m³ de cavaco por tonelada de vapor produzido.

No teste com o cavaco médio constatou-se um aumento de consumo, onde a caldeira consumiu 6,506m³ de cavaco para produzir 10 toneladas de vapor saturado na pressão de 19 kgf/cm², tendo um consumo real de 0,6506 m³ de cavaco por tonelada de vapor produzido.

Ao realizar a experiência com o cavaco fino o consumo foi ainda maior, pois para produzir 10 toneladas de vapor saturado a uma pressão de 19 kgf/cm² a caldeira consumiu 7,151 m³ de cavaco, ou seja, o consumo real da caldeira ficou de 0,7151 m³ de cavaco por tonelada de vapor produzido.

Dado que o cavaco é comercializado a um valor de R\$ 0,15 por kg, foi preciso converter o consumo real em m³ para consumo real em kg, e com essa conversão foi possível obter o custo real de cavaco durante cada teste, conforme apresentado na tabela abaixo. Para converter o cavaco real em m³ para consumo real em kg foi realizado a multiplicação do consumo de cavaco em m³ com o peso específico já obtido das amostras coletadas anteriormente. E para obter o custo real em R\$ foi realizado a multiplicação entre o consumo real em kg e o valor do kg do cavaco em R\$.

Tabela 8 – Custo real de cavaco dos testes.

Tipo de Cavaco (mm)	CONSUMO REAL (m ³)	PESO ESPECÍFICO (kg/m ³)	CONSUMO REAL (kg)	VALOR DO kg CAVACO EM R\$	CUSTO REAL (R\$)
Misto Antes do teste	6,641	375,00	2490,37	R\$0,15	R\$373,55
Grosso (90 à 50)	6,195	386,3333	2393,33	R\$0,15	R\$359,00
Médio (50 à 30)	6,506	372,5000	2423,49	R\$0,15	R\$363,52
Fino (< 30)	7,151	360,1667	2575,55	R\$0,15	R\$386,33

Fonte: Autor (2019).

De acordo com o critério de avaliação de melhor custo, utilizou-se como valor base o custo do cavaco misto que diariamente é utilizado na caldeira, no qual, comparado com os cavacos testados, obteve-se os resultados demonstrados na tabela abaixo na coluna denominada como diferença.

Tabela 9 – Diferença de custos dos testes.

Tipo de Cavaco (mm)	CONSUMO REAL (m³)	PESO ESPECÍFICO (kg/m³)	CONSUMO REAL (kg)	VALOR DO kg CAVACO EM R\$	CUSTO REAL (R\$)	DIFERENÇA
Misto Antes do teste	6,641	375,0000	2490,37	R\$0,15	R\$373,55	
Grosso (90 à 50)	6,195	386,3333	2393,33	R\$0,15	R\$359,00	R\$14,55
Médio (50 à 30)	6,506	372,5000	2423,49	R\$0,15	R\$363,52	R\$10,03
Fino (< 30)	7,151	360,1667	2575,55	R\$0,15	R\$386,33	-R\$12,78

Fonte: Autor (2019).

Logo, também foi feita uma estimativa durante o período de um ano para determinar os futuros custos de cada teste, onde se observou uma redução de 3,90% no custo com cavaco resultante da comparação entre o cavaco grosso e o cavaco misto normalmente utilizado. Quando comparados os cavacos médio e misto, o cavaco misto atingiu uma redução nos custos de 2,68%. Já no comparativo entre o cavaco fino e o misto, o custo aumentou em 3,42%, conforme demonstrado na tabela abaixo.

Tabela 10 – Estimativa dos custos anuais dos cavacos.

Tipo de Cavaco (mm)	Custo real (R\$/hora)	Período em dias	Horas trabalhadas por dia	Custo por período (R\$)	Comparativo	%
Misto Antes do teste	R\$373,55	365	24	R\$3.272.298,00		
Grosso (90 à 50)	R\$359,00	365	24	R\$3.144.841,92	-R\$127.456,08	-3,90%
Médio (50 à 30)	R\$363,52	365	24	R\$3.184.459,29	-R\$87.838,71	-2,68%
Fino (< 30)	R\$386,33	365	24	R\$3.384.275,42	R\$111.977,42	3,42%

Fonte: Autor (2019).

A partir da avaliação do histórico do consumo de cavaco, fornecido pela empresa, depreende-se que a empresa irá economizar aproximadamente cento e vinte e sete mil reais por ano se utilizar cavaco denominado nos testes como cavaco grosso (90mm à 50mm), ressaltando ainda que, mesmo utilizando um cavaco médio,

porém separado do cavaco fino, consegue-se um bom resultado na economia, devido a parametrização de ventilação e exaustão da caldeira. No entanto, com o cavaco fino o resultado foi inversamente dos demais, pois é um cavaco leve, e se insuflar grandes quantidades de ar, o cavaco acaba sendo arrastado pela tubulação da caldeira, perdendo assim poder calorífico, e quando diminui-se a insuflação de ar perdemos eficiência da queima, tornando-a incompleta. Por esse motivo o consumo aumenta e, conseqüentemente, eleva os custos da caldeira.

6 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalho futuro podemos citar o estudo de viabilidade da instalação de peneiras vibratórias para separação do cavaco comprado dos fornecedores para poder queimá-los separadamente.

Outro trabalho futuro é a análise do gás gerado pelos resíduos de gordura do leite proveniente das limpezas diárias feitas nos equipamentos, podendo assim determinar se estas sobras podem ser utilizadas como combustível para ser queimado na caldeira, devido ao fato de que tais efluentes ficam armazenados em lagoas onde geram estes gases e diante disso, pode-se fazer a análise da viabilidade de instalação de um biodigestor.

REFERÊNCIAS

ALTAFINI, Carlos R. **Apostila sobre caldeiras**. Universidade de Caxias do Sul. Disponível

em:<<http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/caldeirasapostila.pdf>>

Acesso: 15 fev. 2019.

ARRUDA, Zart. **Análise de Combustíveis de Caldeiras**. Disponível em:

><http://usuarios.upf.br/~engeamb/TCCs/20092/MATEUS%20ZART%20DE%20ARRUDA.pdf><Acesso: 19 mar. 2019.

BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2 ed. Florianópolis: UFSC, 1995.

CTGÁS-ER. **Curso de turbinas a vapor**. Disponível em:>

http://ead2.ctgas.com.br/a_rquivos/termoeletrica/turbinas_a_vapor/curso_basico_turbina_a_vapor.pdf >. Acesso: 12 mar. 2019.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LIPPEL. **QUALIDADE DOS CAVACOS**. 2014. Disponível em:

<<http://www.lippel.com.br/lippel/uploads/downloads/05-05-2014-10-36qualidadedos-cavacos-para-combustao.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2019.

LORA & NASCIMENTO & TEXEIRA. **Geração Termelétrica - Planejamento, Projeto e Operação**. 1.ed.- Rio de Janeiro Editora Interciência, 2004.

PROINP. **Economizadores e Superaquecedores de Caldeiras**. Disponível em:

<https://lcsime.files.wordpress.com/2012/09/caldeiras_prominp.pdf Acesso: 02 abr. 2019.