

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ – FAG
ANDERSON FOGAÇA DEBASTIANI**

**INTERFERÊNCIA NO CONSUMO ESPECÍFICO DA CALDEIRA DEVIDO O
EXCESSO DE UMIDADE NO CAVACO DE EUCALIPTO**

CASCAVEL – PR

2018

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ – FAG
ANDERSON FOGAÇA DEBASTIANI**

**INTERFERÊNCIA NO CONSUMO ESPECÍFICO DA CALDEIRA DEVIDO O
EXCESSO DE UMIDADE NO CAVACO DE EUCALIPTO**

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

Professor Orientador: Me. Eng. Mec. Carlos Alberto Breda.

CASCADEL – PR

2018

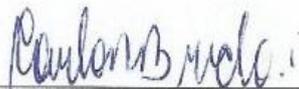
CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ - FAG

ANDERSON FOGAÇA DEBASTIANI

**INTERFERÊNCIA NO CONSUMO ESPECÍFICO DA CALDEIRA DEVIDO O
EXCESSO DE UMIDADE NO CAVACO DE EUCALIPTO**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica, da FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor (a) Carlos Alberto Breda.

BANCA EXAMINADORA



Orientador Prof.^o Me. Carlos Alberto Breda
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz – FAG
Engenheiro Mecânico



Professor Me. Roberson Roberto Parizotto
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz – FAG
Engenheiro Mecânico



Professora Me. Rosemar Cristina Dal Ponte
Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz – FAG
Bacharel em informática

Cascavel, 06 de dezembro de 2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais que me deram apoio e condições para tal, e agradeço ao meu orientador, mestre Breda, por ter tido comprometimento com a realização desse estudo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que me ensinaram a perseverar pelos meus objetivos, de não desistir perante as dificuldades e incertezas. Agradeço ao meu irmão, pelo apoio e sugestões, e por ceder seu acervo de estudo. Agradeço aos meus amigos pelo apoio e por sempre estarem presentes direta e indiretamente.

Agradeço ao meu orientador mestre Breda por sempre estar disponível, de sempre ajudar, de sempre estar comprometido, por sempre estar engajado e motivado a compartilhar seu vasto conhecimento adquirido ao longo de sua carreira profissional, e não apenas isso, mas por criar condições para a construção do conhecimento.

Obrigado!

RESUMO

No processo de produção de vapor saturado na indústria, é utilizada a caldeira para tal fim, que por sua vez tem a necessidade de um combustível, na maioria das vezes se opta pelo combustível mais acessível dentro da região de atuação, no referido trabalho é analisado um caso real de um abatedouro de aves no oeste do estado do Paraná, este faz o uso de cavaco de eucalipto como combustível base, fonte energética de combustão da caldeira para obtenção de vapor. A umidade encontrada no cavaco de madeira é um fator maléfico dentro do processo de queima da biomassa fazendo com que o rendimento da caldeira diminua consideravelmente e aumente os gastos devido o aumento do consumo específico de cavaco, como a empresa estudada não tem controle sobre tal variável, devido o armazenamento ser feito ao tempo, este trabalho busca o conhecimento sobre os gastos acumulados pela umidade. Para obtenção dos dados foi realizado um experimento de desumidificação em estufa de ar forçado dos cavacos, por meio de amostras, para saber a umidade média de recebimento da biomassa pela empresa, logo foi feito o cálculo do poder calorífico útil, cálculo do consumo específico de cavaco devido o teor de umidade e cálculo do custo ocasionado pela água excessiva da biomassa, comparando a umidade ideal para consumo. Houve êxito na obtenção dos resultados por meio do experimento proposto, com a obtenção do valor médio da umidade e dos custos envolvidos por ela, logo os dados mostraram os malefícios da umidade, que é ocasionada pelo mau armazenamento e manejo.

Palavras chaves: experimento, biomassa, poder calorífico.

ABSTRACT

In the process of production of saturated steam in the industry, the boiler is used for this purpose, which in turn has the need for a fuel, most of the time is opted for the most accessible fuel within the region of performance, in said monograph is analyzed a real case of a slaughterhouse of chickens in the western state of Paraná, this makes the use of eucalyptus chip as a base fuel, an energy source for the combustion of the boiler to obtain steam. The humidity found in the wood chip is an evil factor in the chip burning process, causing the boiler efficiency to decrease considerably and increase the expenses due to the increase of the specific chip consumption, as the company studied has no control over this factor because the storage is done in the open air, this work seeks knowledge about the accumulated expenses by the humidity. In order to obtain the data, a dehumidification experiment was carried out in a forced air heater of the chips, by means of samples, to know the average humidity of reception of the chip by the company, as well as the calculation of the useful calorific value, calculation of the specific consumption of due to the humidity content and the calculation of the cost caused by the excessive humidity of the chip, comparing the ideal humidity for consumption. It was possible to obtain the results through the proposed experiment, obtaining the average value of the humidity and the costs involved by the humidity, so the data showed the damages of the humidity, which is caused by poor storage and handling.

Keywords: experiment, biomass, calorific value.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caldeira de Haycock	20
Figura 2 – Caldeira vagão, de James Watt	20
Figura 3 – Caldeira de tubos de água	21
Figura 4 – Caldeira de tubos retos, Babcock e Wilcox	21
Figura 5 – Caldeira de tubos curvados, Stirling	22
Figura 6 – Principais componentes de um gerador de vapor.....	24
Figura 7 – Caldeira flamotubular	27
Figura 8 – Caldeira aquatubular	28
Figura 9 – Caldeira Dedini zurn – modelo “VC”	29
Figura 10 – Caldeira flamotubular com ante-fornalha de parede de água	30
Figura 11 – Perfil da variação de umidade em função dos dias de secagem.....	35
Figura 12 – Balanço de massa em uma caldeira.....	40
Figura 13 – Pátio de cavaco	43
Figura 14 – Coleta de cavaco	44
Figura 15 – Armazenagem das amostras.....	44
Figura 16 – Recipientes de armazenagem.	45
Figura 17 – Balança.....	45
Figura 18 – Estufa de circulação de ar forçado.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configurações da balança de alta precisão.	46
Tabela 2 – Tara dos recipientes	50
Tabela 3 – Peso médio das cargas de biomassa.....	52
Tabela 4 – Dados de cálculo.....	54
Tabela 5 – Configurações da caldeira.....	56
Tabela 6 – Custo adicional de cavaco devido à umidade	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Estabilização de massa.	53
Gráfico 2 – Rendimento conforme teor de umidade.	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos combustíveis.....	31
Quadro 2 – Classificação dos biocombustíveis.....	34
Quadro 3 – Perda de umidade em estufa.....	51

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Poder calorífico superior.....	36
Equação 2 – Poder calorífico inferior.....	37
Equação 3 – Teor de umidade.....	39
Equação 4 – Teor de massa seca.....	39
Equação 5 – Eficiência da caldeira, método direto.....	40
Equação 6 – Consumo específico da caldeira.....	41
Equação 7 – Consumo específico da caldeira com PCU.....	41
Equação 8 – Consumo específico acima de 32% de umidade.....	48
Equação 9 – Custo mensal de cavaco, acima de 32% de umidade.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A.C – Antes de Cristo

bar – Bar (Unidade de Pressão)

CO₂ – Dióxido de Carbono.

EES – *Engineering Equation Solver*

g – Grama

H₂SO₄ – Ácido Sulfúrico

H₂S – Sulfeto de hidrogênio

H₂O – Água

h_l – Entalpia da água de entrada (kJ/kg)

h_v – Entalpia do vapor produzido (kJ/kg)

kW – Quilowatt

kcal/kg – Quilocaloria por Quilograma

kg – Quilograma

kgf/cm² – Quilograma-Força por Centímetro Quadrado

L – Litro

M – Teor de Massa Seca (%).

M³ – Metro Cúbico.

M² – Metro Quadrado

Ms – Microsoft®

m_c – Vazão Mássica de Combustível (Kg/s)

m_{cfixo} – Consumo Específico Fixo de 32% de Umidade (kg/h)

m_v – Vazão Mássica de Vapor (Kg/s)

m₁ – Massa do Recipiente de Secagem Seco em Estufa (g)

m₂ – Massa do Recipiente com a Amostra Antes da Secagem (g)

m₃ – Massa do Recipiente com a Amostra Após a Secagem (g)

η – Eficiência da Caldeira

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

N₂O – Óxido Nitroso

NO – Nobélio

O₃ – Ozônio

PCI – Poder Calorífico Inferior (Kcal/kg)

PCS – Poder Calorífico Superior (Kcal/kg)

PCU – Poder Calorífico Útil (Kcal/kg)

Psi – Libra-Força por Polegada Quadrada

PSF – Ponto de Saturação das Fibras

pm – Peso Médio do m³ de Cavaco Recebido (kg/m³)

rpm – Rotações por Minuto

r\$ – Valor do m³ de Cavaco

SO₂ – Dióxido de Enxofre

SO₃ – Óxido Sulfúrico

tdia – Tempo de Trabalho por Dia da Caldeira

Tag – Etiqueta

Twh – Terawatt-Hora

T/h – Tonelada por Hora

U – Teor de Umidade (%)

w – Umidade do Cavaco de Madeira

Z – Porcentagem de Cinzas em Base Seca

°C – Graus Célsius

% – Porcentagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos Específicos	16
1.2 JUSTIFICATIVA	17
1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	18
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 GERADOR DE VAPOR	19
2.1.1 Desenvolvimento Histórico dos Geradores de Vapor	19
2.1.2 Caldeira.....	23
2.1.3 Principais Componentes da Caldeira.....	23
2.1.4 Caldeiras Flamotubulares	26
2.1.5 Caldeiras Aquatubulares.....	27
2.1.6 Caldeiras Mistas	29
2.2 COMBUSTÍVEIS.....	30
2.2.1 Classificação dos Combustíveis	30
2.2.2 Composição dos Combustíveis.....	32
2.3 BIOMASSA	32
2.3.1 Classificação da Biomassa.....	33
2.3.2 Biomassa de Madeira	34
2.3.3 Poder Calorífico Inferior	35
2.3.4 Poder Calorífico Superior.....	35
2.3.5 Poder Calorífico Útil	36
2.4 CONVERSÃO DENDROENERGÉTICA DA BIOMASSA	37
2.4.1 Pirólise.....	37
2.4.2 Gaseificação.....	38
2.4.3 Combustão.....	38
2.5 ANÁLISE DO TEOR DE UMIDADE.....	38
2.6 ANÁLISE DO RENDIMENTO ENERGÉTICO DE CALDEIRA	39
2.6.1 Método Direto	40
2.6.2 Método Indireto	42

3 METODOLOGIA.....	43
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1 DADOS OBTIDOS DO EXPERIMENTO.	50
4.2 CONTROLE DO RECEBIMENTO DE CAVACO.	51
4.3 APLICAÇÃO DOS DADOS.	52
4.4 MENSURAÇÃO DOS RESULTADOS.	55
5 CONCLUSÃO.....	59
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXO A – TABELA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR.....	63
ANEXO B – TABELA DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA ÁGUA	64
ANEXO B – (CONTINUAÇÃO) TABELA DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA ÁGUA.....	65

1 INTRODUÇÃO

O referido trabalho aborda o uso de biomassa que é utilizada na indústria para produção de vapor, em vários processos industriais, tais como indústria frigorífica, têxtil, química entre outras. Este estudo foi desenvolvido no oeste do estado do Paraná em um abatedouro de aves.

Com a crescente preocupação de redução de custos e para com o meio ambiente, que surgiu a vontade de estudar o tema da biomassa na produção de vapor. Visto que a empresa estudada não apresentava rendimento satisfatório na conversão de biomassa em vapor, logo foi notada uma possível causa de decréscimo dessa conversão, a umidade contida no cavaco de madeira poderia ser um fator maléfico.

Em razão disso, esse trabalho busca conhecer a umidade média do cavaco consumido pela empresa, por meio da análise do teor de umidade em estufa e compreender a interferência que a umidade contida na biomassa, ocasiona no rendimento da caldeira, e consequentemente quantificar esse custo desconhecido até então.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por escopo analisar e compreender a interferência, o impacto ocasionado pela umidade contida na biomassa no rendimento da caldeira.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Coletar amostras de cavaco de diferentes pontos do pátio de cavaco;
- Definir o teor de umidade média do cavaco por meio do experimento de desumidificação em estufa com circulação de ar forçado a $105 \pm 2^\circ\text{C}$;
- Calcular o poder calorífico útil de 0 a 70% de umidade;
- Calcular o consumo específico com base no poder calorífico útil;
- Gerar um gráfico de curva com base no poder calorífico útil, consumo específico e umidade;
- Calcular o custo do consumo específico de cavaco com base na umidade média encontrada em experimento e relacionando com a umidade ideal de 32% para cavaco de eucalipto.

1.2 JUSTIFICATIVA

A busca por melhorias na área industrial é ambicionada, para que sempre haja inovação, redução de custos e aumento da qualidade de todo o processo industrial, para colaborar com a filosofia da busca pela melhoria contínua, o referido trabalho engaja-se em coletar, analisar e direcionar dados para entender o consumo específico de cavaco de uma caldeira de vapor saturado, localizado em um abatedouro de aves no oeste do Paraná. A biomassa de cavaco de madeira de reflorestamento é amplamente utilizada por indústrias, para a realização de diversos processos produtivos, mais amplamente utilizados em caldeiras de vapor saturado, a biomassa quando queimada passa de energia química para energia térmica, que pode também gerar energia mecânica, essa transformação é fundamental para o funcionamento de muitas empresas, que por sua vez geram empregos.

Com o aumento da preocupação e conscientização da sociedade para com o meio ambiente, toda a cadeia produtiva está mudando as suas percepções e se adequando a esse estilo de vida mais consciente, o referido trabalho busca compreender o consumo de cavaco da caldeira, o cavaco é proveniente de madeira reflorestada, então com o entendimento da variação do consumo específico devido à umidade é possível por meio de um local de armazenagem coberto, diminuir o consumo de cavaco, logo menos árvores serão utilizadas para este processo de geração de vapor.

A redução de cavaco vai além de fatores sociais, ambientais, mas também econômicos, pois o cavaco de reflorestamento tem valor agregado, o teor de umidade pode influenciar negativamente no consumo específico de cavaco, pois a umidade diminui o poder calorífico útil (Nogueira, 2008).

Com o conhecimento da quantidade gasta de cavaco com determinada umidade, é possível quantificar o gasto que se tem a mais para evaporar a água contida no cavaco a cada grau de umidade, assim traçando um gráfico de curva, relacionando o aumento da umidade com a diminuição do poder calorífico do cavaco e aumento do consumo específico. Desta forma é possível quantificar em cifras anuais quanto à empresa está deixando de economizar devido à forma de recebimento e armazenamento do cavaco.

A determinação de um gráfico de curva com o poder calorífico útil, consumo específico e umidade, têm como alvo facilitar o entendimento do assunto, tanto no meio acadêmico, mas também industrialmente, pois o gráfico é um artifício visual de fácil entendimento, com ele é possível de forma rápida definir o poder calorífico útil sem cálculos,

apenas traçando linhas nos eixos x e y. Dessa forma o trabalho apresentado estará agregando ao meio acadêmico mais um instrumento de aprendizado para futuros engenheiros.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O referido trabalho busca entender e compreender a interferência da umidade contida no cavaco, no rendimento da caldeira, logo há a pergunta:

- A umidade contida no cavaco interfere no rendimento da caldeira?

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O referido estudo foi realizado em um abatedouro de aves no oeste do estado do Paraná, especificamente no pátio de armazenagem de cavaco, junto à caldeira que consome este combustível, durante um período de 30 dias.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 GERADOR DE VAPOR

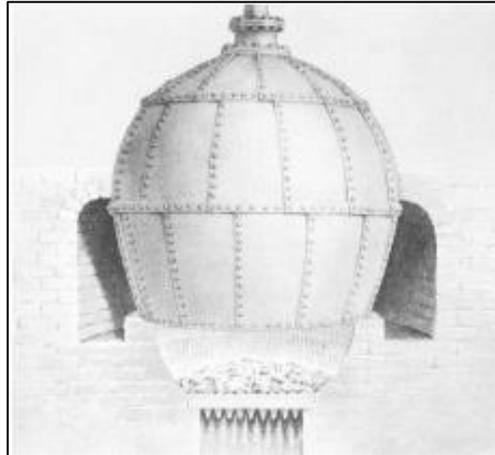
Os geradores de vapor ou caldeiras são equipamentos com objetivo de produzir e armazenar vapor sob pressão superior à atmosférica, fazendo uso de qualquer fonte de energia, dessa forma executando os referedores utilizados em unidades de processo. (MARQUES, HADDAD e MARTINS, 2006).

Estes equipamentos são objetivados a transformar água em estado líquido para vapor, que é o estado gasoso da água. Para que esse processo ocorra é necessário fornecer calor sensível para a água, até que a mesma faça a troca de estado líquido para gasoso, ou seja, que ela entre em estado de ebulição, também é necessário fornecer calor latente para que a água seja vaporizada e fornecer calor de superaquecimento para a transformação do vapor superaquecido, todo esse calor que deve ser fornecido é proveniente da queima do combustível a ser utilizado para o processo (LEITE, 2008).

2.1.1 Desenvolvimento Histórico dos Geradores de Vapor

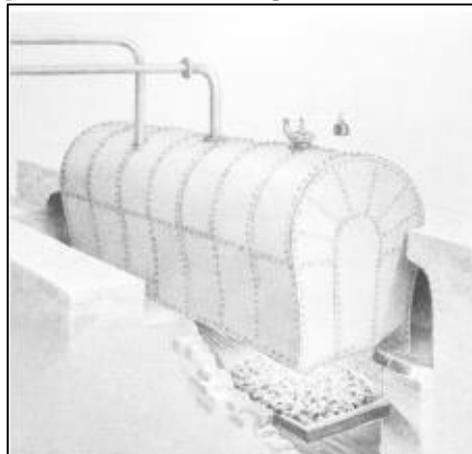
Conforme Nascimento (2007), no século II A.C. que Heron de Alexandria efetuou uma série de experiências e construiu um aparelho que foi o predecessor das caldeiras e das turbinas a vapor, este invento tinha o nome de Eolípila, que fazia a ebulição da água e movimentava uma esfera ao redor de um eixo. Nesta época o inventor não percebeu a utilidade de seu invento, já que a movimentação da esfera não produzia nenhum trabalho útil, no entanto muitos séculos mais tarde foi base para a revolução industrial e tecnológica.

Segundo Bizzo (2003), as primeiras utilizações práticas ou de caráter industrial de vapor tiveram início no século 17. O inglês Thomas Savery patenteou em 1698 um projeto de bombeamento de água utilizando vapor como força motriz. Em 1711, Newcomen projetou outra invenção com o mesmo fim, aproveitando as ideias de Denis Papin, um inventor francês. A caldeira de Newcomen era um tanque esférico, com aquecimento direto no fundo, que ficou conhecida por caldeira de Haycock (figura 01).

Figura 1 – Caldeira de Haycock

Fonte: BIZZO (2003, p.67)

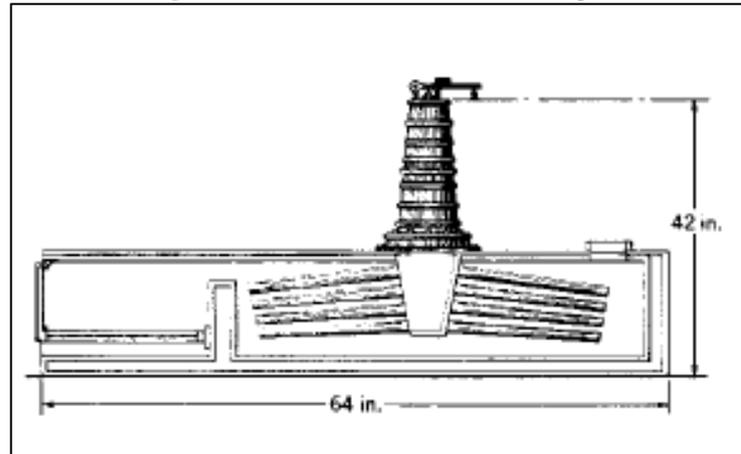
James Watt alterou o formato da caldeira em 1769, projetando a caldeira Vagão (figura 02), a predecessora das caldeiras utilizadas em locomotivas. No entanto o desenvolvimento que Watt realizou com a utilização do vapor como força motriz, não adicionou muito ao projeto de caldeiras. Todos estes modelos tiveram desastrosas explosões, pertinentes a utilização de fogo direto e a aglomeração de vapor no tanque. A ruptura do vaso causava grande descarregamento de energia na forma de expansão do vapor retido (BIZZO, 2003).

Figura 2 – Caldeira vagão, de James Watt

Fonte: BIZZO (2003, p.67)

No final do século 18 e meados do século 19 criaram as primeiras caldeiras com tubos de água. O modelo de John Stevens (figura 03) movimentou um barco a vapor no Rio Hudson (BIZZO, 2003).

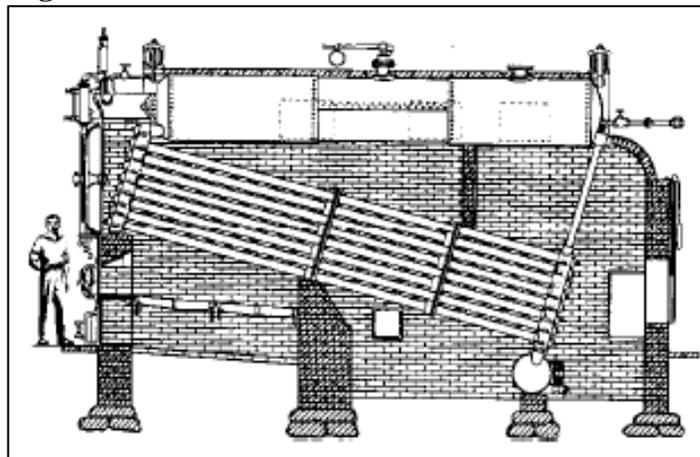
Figura 3 – Caldeira de tubos de água



Fonte: BIZZO (2003, p. 67)

Stephen Wilcox, em 1856, desenvolveu um gerador de vapor com tubos inclinados, e da associação com George Babcock tais caldeiras começaram a ser desenvolvidas, com grande sucesso comercial (figura 4), (BIZZO, 2003).

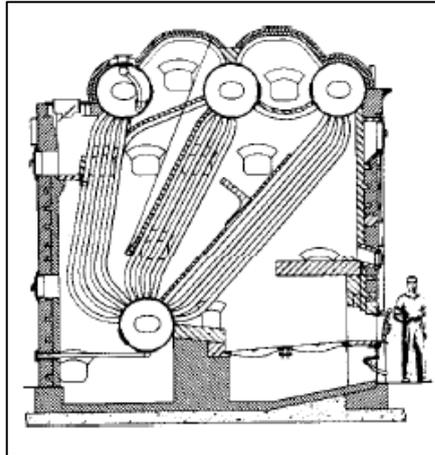
Figura 4 – Caldeira de tubos retos, Babcock e Wilcox



Fonte: BIZZO (2003, p.68)

Em 1880, Alan Stirling projetou uma caldeira de tubos curvados, projeto este de funcionamento simples, que é ainda hoje utilizada nas grandes caldeiras de tubos de água (figura 5), (BIZZO, 2003).

Figura 5 – Caldeira de tubos curvados, Stirling



Fonte: BIZZO (2003, p. 68)

Os primeiros geradores de vapor surgiram em meados do século XVIII, devido à necessidade de substituir os inconvenientes, gerados pela queima direta do carvão fóssil, dessa forma encorajou-se o desenvolvimento das unidades geradoras de vapor. O foco dessa evolução era captar a energia liberada pela combustão do combustível, dentro de uma unidade central e posteriormente distribuir a energia aos pontos de consumo da empresa (BAZZO, 1995).

Nos anos de 1924 e 1925, nos Estados Unidos, a grande evolução nos projetos de caldeiras ocorreu na estação de *Edgard da Boston Edison Company*, onde entrou em operação uma caldeira com aporte de 1200 psi (84,5 kgf.cm²). Esta caldeira forneceu em torno de 70 toneladas de vapor por hora, atingindo 371°C de temperatura, e acionando uma turbina de 3.150 kW a 3600 rpm (NASCIMENTO, 2007).

A utilização do vapor d'água como fluido de trabalho é justificado pelo alto calor específico, junto a grande disponibilidade da água no setor industrial. O vapor é empregado em larga escala, tanto para trabalhos de aquecimento, quanto para serviços de acionamento mecânico, o uso do vapor atende diversas necessidades na indústria, seja ela alimentícia, bebidas, papel, têxtil, metalúrgica, química, etc. Para diversas localidades a geração de vapor é indispensável devido à geração de eletricidade ser atrelada os geradores de vapor (BAZZO, 1995).

A geração de vapor se tornou popular devido à revolução industrial, onde foi largamente utilizada nas locomotivas e mover turbinas para a geração de energia, com a evolução da indústria e as novas demandas por cozimentos, higienização e fabricação de alimentos, se fez necessário modernizar as caldeiras para essa nova era. Atualmente as

caldeiras estão presentes em grandes indústrias tais como fábricas de alimentos, frigoríficos, indústrias de vulcanização, usinas de açúcar e álcool, tecelagem etc. (LEITE, 2008).

2.1.2 Caldeira

A NR-13 caracteriza caldeira a vapor todo equipamento que produz e acumula vapor sob pressão acima da pressão atmosférica, que utilize qualquer fonte de energia, e executando-se os refervedores e equipamentos similares utilizados em unidade de processo (Brasil, 2006).

Segundo Leite (2008), gerador de vapor ou caldeira é um equipamento que tem como função gerar vapor por troca térmica proveniente do combustível e a água, essa troca se dá devido à estrutura ser feita com chapas e tubos cuja finalidade é fazer que a água adquira energia e passe do estado líquido para gasoso, assim com a liberação de calor, a energia do combustível faz com que as partes metálicas da caldeira se aqueçam, assim proporcionando a troca de calor para a água, conseqüentemente vapor.

De acordo com Foelkel (2009), as caldeiras são equipamentos de produção simples, entretanto com um alto nível de engenharia, essas por sua vez tem objetivo de queimar um combustível, que com a liberação da energia do mesmo, pode aquecer e vaporizar água nas formas de vapor saturado ou superaquecido, assim transformando essa energia em outras formas de energia, que são consumidas no mundo industrial ou rural.

Há vários modelos de caldeiras no mercado, com as mais variadas formas e capacidades de produção, no caso das caldeiras de biomassa, elas são concebidas para serem alimentadas por toretes ou toras de lenha, cavacos de madeira, fragmentos de casca e de resíduos florestais (FOELKEL, 2009).

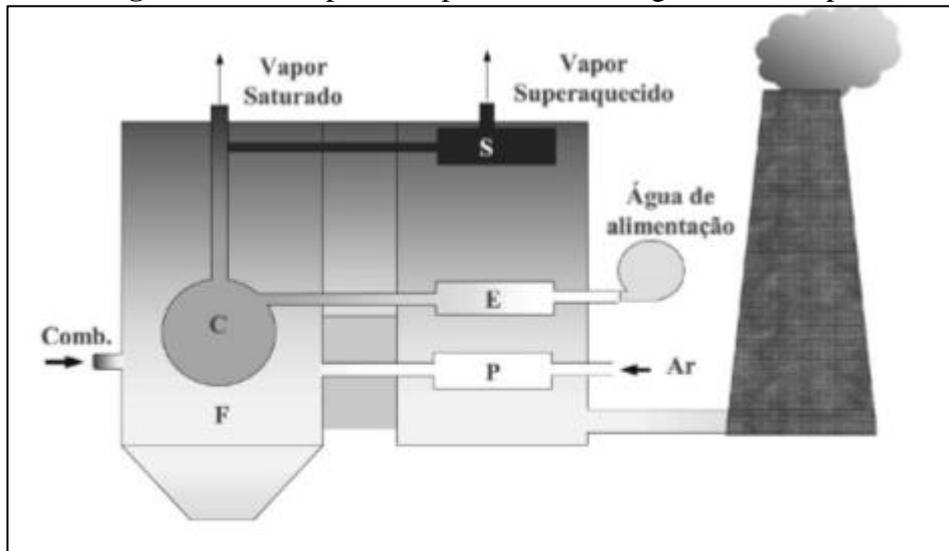
Segundo Foelkel (2009), as caldeiras podem ser consideradas máquinas produtoras de vapor, onde o vapor é um fluido que transfere calor de forma eficiente, pois o vapor tem uma alta capacidade de armazenar energia, que posteriormente pode ser recuperada pelo abaixamento das pressões e temperaturas, ou pela condensação e trocas térmicas. A grande maioria dos processos envolvendo caldeiras com produção de vapor saturado opera com pressões abaixo de 10 bar para o aquecimento e secagem de instalações industriais e rurais.

2.1.3 Principais Componentes da Caldeira

A caldeira é composta por vários equipamentos, onde cada um desenvolve uma função, para resultar no processo geral de produção de vapor. Os principais componentes de uma caldeira podem ser divididos em fornalha; caldeira; superaquecedor; economizador; pré-

aquecedor de ar; chaminé. Na figura (6), é notável a distribuição do sistema, as siglas são compatíveis com as iniciais dos componentes (MARQUES, HADDAD e MARTINS, 2006).

Figura 6 – Principais componentes de um gerador de vapor



Fonte: MARQUES, HADDAD e MARTINS (2006, p. 379)

A fornalha é o local que ocorre a queima do combustível, ou seja, a energia é liberada do combustível por meio de reações de combustão. O insumo de queima pode ser sólido, líquido ou gasoso (MARQUES, HADDAD e MARTINS, 2006).

O componente da caldeira refere-se ao vaso fechado sob pressão, cuja água muda de fase líquida para vapor saturado. O superaquecedor tem a função de elevar a temperatura da água que alimenta a caldeira, mas também superaquece o vapor para que não haja condensação dentro das redes de vapor. O economizador tem o objetivo de elevar a temperatura da água, para obter uma melhor eficiência e para que não haja choques térmicos, que possam futuramente danificar os materiais do conjunto. O pré-aquecedor de ar é um trocador de calor que tem como objetivo aquecer o ar, que posteriormente é utilizado na pré-queima do combustível, dessa forma aproveitando os gases de combustão, e economizando combustível. Por fim temos a chaminé que objetiva a circulação dos gases quentes provenientes da combustão (MARQUES, HADDAD e MARTINS, 2006).

Para Leite (2008), as caldeiras apresentam um maior número de componentes, são eles; câmara de combustão; tubos; coletores; Tubulação; superaquecedor; soprador de fuligem; pré-aquecedor; economizador; alvenaria (refratários); queimadores; ventiladores; chaminé; válvulas de segurança.

A câmara de combustão é o local onde ocorre a queima do combustível, com a queima ocorre à produção de gases de combustão que fornecem calor para água. Os tubos são responsáveis pela circulação de vapor e água dentro da caldeira, dessa forma ocorrendo à troca térmica entre os gases quentes de combustão com a água ou vapor. Os coletores têm a finalidade de coletar a água ou vapor, os coletores são elementos cilíndricos, aonde os tubos chegam e saem. O tubulão é um tambor horizontal, localizado no ponto mais alto do corpo da caldeira, onde está conectada, por tubos e coletores que estão dispostos em níveis diferentes dentro da caldeira (LEITE, 2008).

A água aquecida circula várias vezes dentro do circuito do tubulão e coletores, a água desce pelos tubos externos e volta pelos tubos internos. Esse processo se dá por um fator físico, a diferença de pressão, pois há esse diferencial, que é gerado pelas colunas líquidas e pelas correntes de convecção formadas. A coluna externa contém somente água, logo é mais pesada do que a coluna interna que contém a mistura de água mais vapor, promovendo então a circulação. O montante de água vaporizada começa a se armazenar no tubulão, durante que o líquido volta a circular. Então o tubulão acumula vapor e recebe a água de alimentação que vem do economizador. Para que não haja o arraste de gotículas de líquido junto do vapor, existem chicanas dentro do espaço de vapor, localizado acima do nível d'água do tubulão, essas chicanas têm por objetivo separar o líquido arrastado (LEITE, 2008).

Dentro do superaquecedor o vapor saturado é separado no tubulão, passando por serpentinas, assim obtendo o superaquecimento do vapor. As serpentinas contidas no superaquecedor contêm as extremidades conectadas a dois coletores de vapor. O superaquecedor está localizado na zona de radiação ou convecção, conforme o nível de superaquecimento para qual a caldeira foi construída (LEITE, 2008).

O pré-aquecedor de ar faz o aproveitamento de parte do calor dos gases residuais de combustão, assim aquecendo o ar de alimentação das chamas. No economizador, a água de alimentação transcorre por uma serpentina ou feixe tubular, para que possa aproveitar o calor dos gases residuais gerados na combustão, para depois ir, então, ao tubulão já pré-aquecido, o que representa uma economia de energia. As paredes da caldeira são revestidas internamente de tijolos refratários, resistentes para altas temperaturas, que protegem as partes metálicas estruturais da caldeira contra deterioração devido à alta temperatura e produzem homogeneização da temperatura por reflexão do calor das chamas. Os maçaricos das caldeiras são semelhantes aos dos fornos (LEITE, 2008).

Os sopradores de fuligem são tubos que contêm de orifícios, inseridos transversalmente aos tubos das serpentinas, em diversos pontos da caldeira. São conectados,

externamente à caldeira ao sistema de vapor. Durante a operação da caldeira, existe a deposição de fuligem nos tubos, o que diminui a transferência de calor. Com o passar do tempo, é injetado vapor através deste sistema para que seja removida a fuligem. Para melhorar a atuação dos mesmos, os sopradores geralmente têm movimento de rotação, consequentemente obtendo maior área (LEITE, 2008).

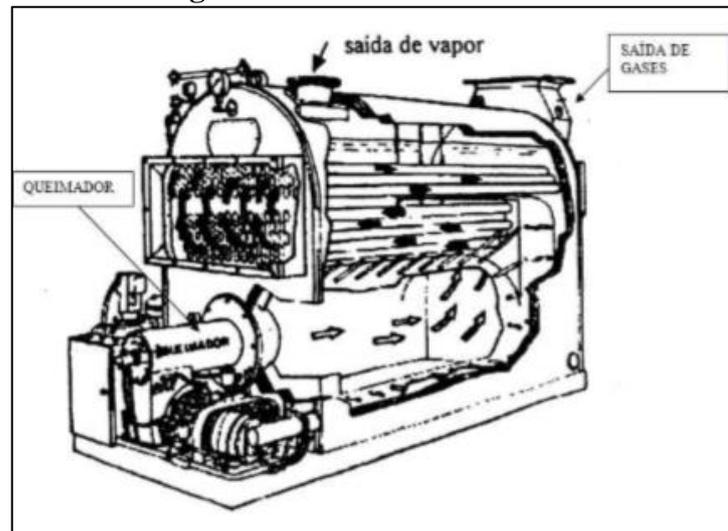
Os ventiladores têm o objetivo de locomover o ar de combustão até os queimadores na câmara de combustão e os gases da câmara de combustão até a chaminé. Existem dois tipos operacionais de ventiladores: o de tiragem forçada, que capta o ar atmosférico e o empurra através dos dutos da caldeira para os queimadores e existem os ventiladores de tiragem induzida, que são instalados na saída da caldeira, que succiona os gases de combustão de dentro da câmara e os leva até chaminé (LEITE, 2008).

A chaminé é a parte que leva os gases de combustão à atmosfera. As válvulas de segurança são equipamentos especiais, que são postas no tubulão, que tem objetivo de dar saída, acaso o vapor atingir uma pressão superior a um valor determinado para condições de segurança de operação (LEITE, 2008).

2.1.4 Caldeiras Flamotubulares

Segundo Bazzo (1995), as caldeiras flamotubulares são construídas de maneira que a água transite em volta de vários tubos, que são construídos entre espelhos, de maneira de um único feixe tubular. Dessa forma os gases provenientes da combustão transitam por dentro dos tubos, em direção à chaminé, que é o último componente desse ciclo de queima e obtenção de vapor.

O sistema de funcionamento das caldeiras flamotubulares (figura 7) se dá pelo aquecimento do ar que passa por dentro dos tubos, e em volta destes tubos está a água, onde uma vez em contato com os tubos aquecidos pelo ar, a água recebe o calor por troca térmica e então é evaporada. As caldeiras do tipo flamotubulares são utilizadas para pequenas capacidades, no qual o objetivo é a produção de vapor saturado para baixa pressão (LEITE, 2008).

Figura 7 – Caldeira flamotubular

Fonte: LEITE (2008)

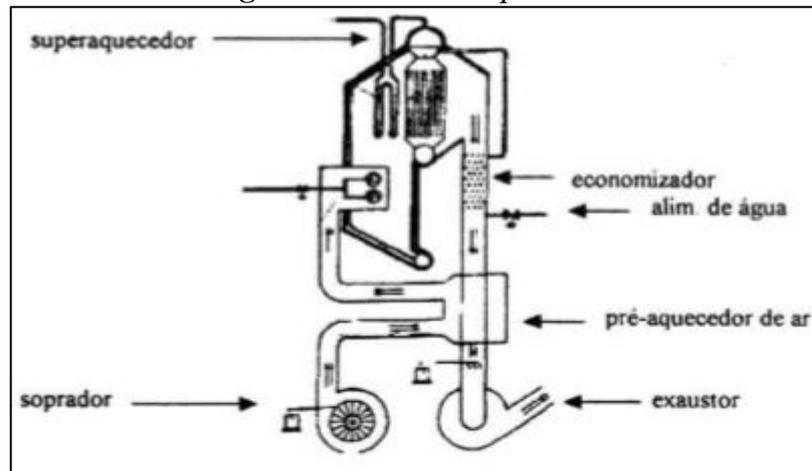
Para Bizzo (2003), as caldeiras flamotubulares são constituídas de um vaso de pressão, cilíndrico posicionado na horizontal, com dois espelhos, ou seja, dois tampos planos, onde se encontra os tubos fixados e a fornalha. As caldeiras atuais têm vários passes de gases, sendo mais usual uma fornalha e dois passes de gases. A saída da fornalha é denominada de câmara de reversão e pode ser revestida de refratários ou ter as paredes metálicas molhadas.

A câmara de reversão molhada obtém um melhor rendimento térmico, devido à diminuição das perdas de calor para o ambiente, no entanto tem a sua construção mais complexa e um custo mais elevado (BIZZO, 2003).

A fornalha da caldeira flamotubular é dimensionada para que ocorra a queima completa do combustível no seu interior, dessa forma as chamas não atingem os espelhos diretamente, pois o contrário haveria uma diminuição da vida útil da caldeira. O corpo da fornalha também é cilíndrica e completamente imerso em água (BIZZO, 2003).

2.1.5 Caldeiras Aquatubulares

No caso das caldeiras aquatubulares (figura 8) o sistema de aquecimento da água é inverso, se comparado às caldeiras flamotubulares, pois o ar quente devido à combustão do combustível passa por fora dos tubos e a água por dentro dos tubos, ou seja, os gases quentes envolvem os tubos, que estão preenchidos de água. Esse tipo de caldeira é utilizado para grandes capacidades, onde tem finalidade de gerar vapor superaquecido (LEITE, 2008).

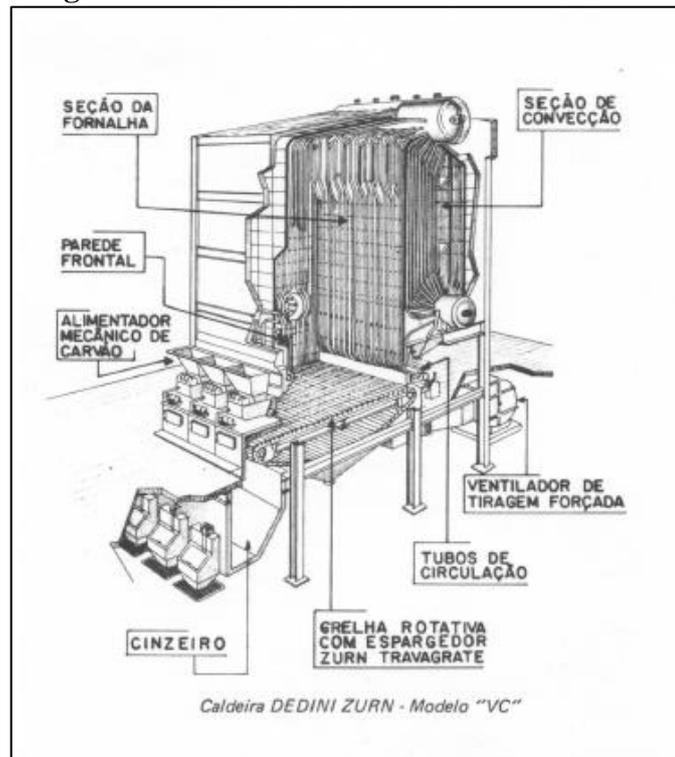
Figura 8 – Caldeira aquatubular

Fonte: LEITE (2008)

A produção de vapor desse tipo de caldeira ocorre dentro dos tubos que interligam dois ou mais reservatórios cilíndricos horizontais. Os tubos podem ser curvos ou retos, no entanto atualmente não é usual a utilização de tubos retos devido à limpeza interna dos tubos (BIZZO, 2003).

Quanto à transferência de calor no interior da caldeira aquatubular (figura 9), existe duas seções de transferência térmica. Seção de radiação, onde ocorre a transferência de calor por radiação direta da chama para os tubos de água, que usualmente são limitados a câmara de combustão. Seção de convecção, onde ocorre a transferência de calor por convecção forçada, dos gases quentes que saem da câmara de combustão, cruzando um banco de tubos de água (BIZZO, 2003).

Figura 9 – Caldeira Dedini zurn – modelo “VC”

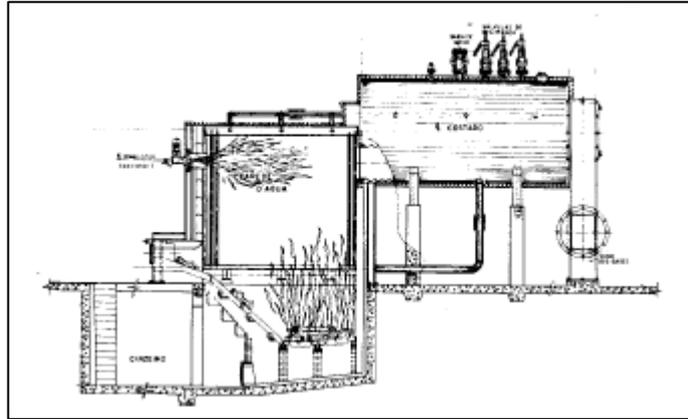


Fonte: BIZZO (2003, p. 72.)

2.1.6 Caldeiras Mistas

As caldeiras mistas (figura 10) surgiram devido à necessidade de se usar combustíveis sólidos, com caldeiras de baixa capacidade, logo então surgiu uma solução híbrida, as caldeiras mistas, que são caldeiras flamotubulares com uma antecâmara de combustão com paredes revestidas de tubos d'água. A combustão dos sólidos ocorre na antecâmara por meio de grelhas de diversos tipos assim possibilitando um maior espaço para grandes volumes de sólidos, como por exemplo, lenha em tora, cavaco, e outros tipos de biomassa, outro ponto é a retirada das cinzas por debaixo da grelha, popularmente conhecido como cinzeiro (BIZZO, 2003).

Figura 10 – Caldeira flamotubular com ante-fornalha de parede de água



Fonte: BIZZO (2003)

Este tipo de equipamento possibilitou a utilização dos combustíveis sólidos uma vez que nem todas as regiões têm a sua disposição outras fontes energéticas, mas há a possibilidade instalar um queimador apropriado para fazer uso de outros combustíveis líquidos e gasosos, no entanto as caldeiras mistas não contam com a eficiência e segurança de uma caldeira aquatubular. O rendimento desse tipo de caldeira é menor que uma caldeira flamotubular, devido às perdas de calor pela antecâmara (BIZZO, 2003).

2.2 COMBUSTÍVEIS

Combustível se define como uma substância natural ou artificial, susceptível de, ao se compatibilizar quimicamente com outra substância, e então gerar uma reação exotérmica rápida, desatrelando calor e luz. Existem vários elementos e compostos químicos que têm essa propriedade, em principal quando a reação é realizada entre eles e o oxigênio (MARQUES, HADDAD e MARTINS, 2006).

Segundo Bazzo (1995), combustíveis são substâncias com condições de reagir com oxigênio e liberar energia térmica, e são identificados como sólidos, líquidos ou gasosos. Uma vez que esses combustíveis são caracterizados por suas propriedades físico-químicas e são disponibilizadas na sua forma natural ou artificial.

2.2.1 Classificação dos Combustíveis

Para Bizzo (2003), os combustíveis são classificados como: fósseis (não renováveis) e vegetais (renováveis).

Segundo MARQUES, HADDAD e MARTINS (2006), os combustíveis são classificados em duas fontes básicas de energia: a primária e a secundária. Na fonte primária o

combustível é proveniente da natureza, e são divididos em fontes renováveis e não renováveis. Na fonte secundária o combustível é resultante de diferentes centros de transformação. O quadro (1) representa essas divisões (MARQUES, HADDAD e MARTINS, 2006).

Quadro 1 – Classificação dos combustíveis

Classificação	Tipo	Exemplo
Sólidos	Naturais	Madeira Lenha Serragem Cavacos
		Turfa Linhito Antracito Hulha
	Artificiais	Carvão Vegetal Coque de Carvão Coque de Petróleo Briquetes
Líquidos	Naturais	Petróleo Óleos de Xisto
	Artificiais	Derivados do Petróleo Alcatrão Álcool
Gasosos	Naturais	Gás Natural Metano
	Artificiais	Hidrogênio Butano e Propano GLP Gás de Iluminação Gás de Coquera Gás de Nafta Gás de Gasogênio Gás de Alto Forno
Coloidais (mistura de combustíveis sólidos e líquidos)		
Resíduos de Fabricação e de Extração		

Fonte: MARQUES, HADDAD e MARTINS (2006, p. 357)

Os combustíveis mais empregados foram os sólidos, no entanto perderão espaço com a descoberta do petróleo e seus derivados, os sólidos perderam espaço, todavia com o aparecimento de tecnologias de gaseificação mais eficientes, o uso de sólidos voltou a crescer, ocasionado pela transformação de um combustível mais apropriado para os processos energéticos (MARQUES, HADDAD e MARTINS, 2006).

2.2.2 Composição dos Combustíveis

A indústria faz uso de combustíveis em seus processos produtivos, e estes combustíveis apresentam em sua composição alguns dos elementos e compostos: carbono (C); hidrogênio (H); oxigênio (O); enxofre (S); nitrogênio (N); água (H₂O); cinzas (Z) (BIZZO, 2003).

Os níveis de carbono e hidrogênio no combustível são os que mais aumentam o poder calorífico, e o oxigênio é regularmente presente em combustíveis vegetais, e sua presença decresce o poder calorífico, na mesma via as exigências teóricas de ar de combustão (BIZZO, 2003).

O enxofre é um combustível, no entanto no processo de combustão traz malefícios ao meio ambiente e equipamento: na combustão o enxofre reage com o oxigênio e água, que conseqüentemente gera SO₂, SO₃, e ácido sulfúrico, que corrói as partes mais frias da instalação, outro elemento gerado pela combustão é o H₂SO₄ que é o líder causador de chuva ácida, que geram impactos ambientais negativos ao meio ambiente. Pode haver formação de H₂S, acaso a atmosfera de combustão for redutora, esse composto é perigoso e produz mau cheiro (BIZZO, 2003).

No processo de combustão são gerados a partir do nitrogênio, vários óxidos: N₂O, NO e NO₂, que em contato com as mucosas do ser humano causam grande irritabilidade nessas áreas, e também reage com o ozônio da atmosfera (O₃) (BIZZO, 2003).

A água está presente em todos os combustíveis, usualmente nos sólidos, na forma de umidade, e traz dois malefícios: diminuição do poder calorífico; Aumento da temperatura do ponto de orvalho do ácido sulfúrico, dessa forma agravando os problemas de corrosão (BIZZO, 2003).

2.3 BIOMASSA

A biomassa é uma matéria orgânica de origem vegetal ou animal, no caso de origem vegetal, a sua existência se deve a o processo de fotossíntese que é um processo físico-químico, a nível celular onde ocorrem reações químicas entre gás carbônico (CO₂), água (H₂O) e energia solar. Nesse processo a energia contida na luz solar é transformado em energia química, na qual é liberada posteriormente quando os laços adjacentes entre moléculas de carbono, hidrogênio e oxigênio são quebrados por processos de decomposição, combustão e digestão (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Segundo Nogueira (2008), a biomassa é um hidrocarboneto que possui átomos de oxigênio na sua composição química, onde o oxigênio faz com que a biomassa requeira menor oxigênio do ar, portanto menos nociva ao meio ambiente, entretanto a eficiência de queima é reduzida, conseqüentemente a energia liberada pela queima é menor, que por sua vez diminui o seu poder calorífico superior. As biomassas de origem vegetal têm uma composição baseada em três famílias de compostos químicos, são eles: hemicelulose, celulose e lignina.

A hemicelulose e a celulose são agrupadas assim formando a holocelulose, que é um composto que forma as paredes das fibras da madeira, sendo que a celulose é a parede em si, e a hemicelulose tem a função de ocupar os espaços vazios. O composto químico lignina é um polímero tridimensional que tem como objetivo manter as fibras agrupadas, ou seja, juntas destas. Para a grande maioria das espécies de madeiras duras a distribuição de celulose está entre 40% a 55%, celulose, 25% a 40 % de hemicelulose e apenas 18% a 25% de lignina, (NOGUEIRA, 2008).

A biomassa tem se mostrado muito importante para o setor elétrico nacional uma vez que em 2016 se tornou a segunda fonte de geração de energia do Brasil, com registro de 8,8 % da matriz energética brasileira, fato esse que deixou o gás natural em terceiro lugar com 8,1%. O somatório da geração de energia a partir da biomassa chegou a 54 TWh, colaborando com que o país alcançasse 82,7 % de energia renovável ofertada internamente no Brasil (MME, Brasil, 2016).

2.3.1 Classificação da Biomassa

Quando se pensa em biomassa, o conceito pode parecer limitado, mas há várias fontes de biomassa existentes, que podem ser convertidas em energia (ANEEL, 2008);

- Vegetais não lenhosos: Sacarídeos, celulósicos, amiláceos e aquáticos;
- Vegetais lenhosos: Madeira;
- Resíduos Orgânicos: Agrícolas, Urbanos e Industriais;
- Biofluidos: Óleos vegetais.

Para Nogueira e Lora (2003), a biomassa e seus recursos energéticos podem ser classificados em três principais grupos, esses referidos aos biocombustíveis. Portanto há biocombustíveis da madeira que são os dendrocombustíveis, e os combustíveis provenientes de plantações não florestais, esses são os agrocombustíveis, e os resíduos urbanos.

Os dendrocombustíveis, provenientes da madeira, são compostos basicamente por lenha, que podem ser obtidas a partir de madeira renovável, ou seja, florestas plantadas ou

nativas, outros meios para obtenção são de serrarias e indústrias de celulose, onde a finalidade não é a produção em si de resíduos de biomassa (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Os resíduos urbanos são combustíveis provenientes de lixo e matéria orgânica das águas de esgotos, o reaproveitamento destes como combustíveis têm papel relevante para com o meio ambiente, e um descarte de contaminantes (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Para Schürhaus (2008), os biocombustíveis são classificados conforme quadro (2).

Quadro 2 – Classificação dos biocombustíveis

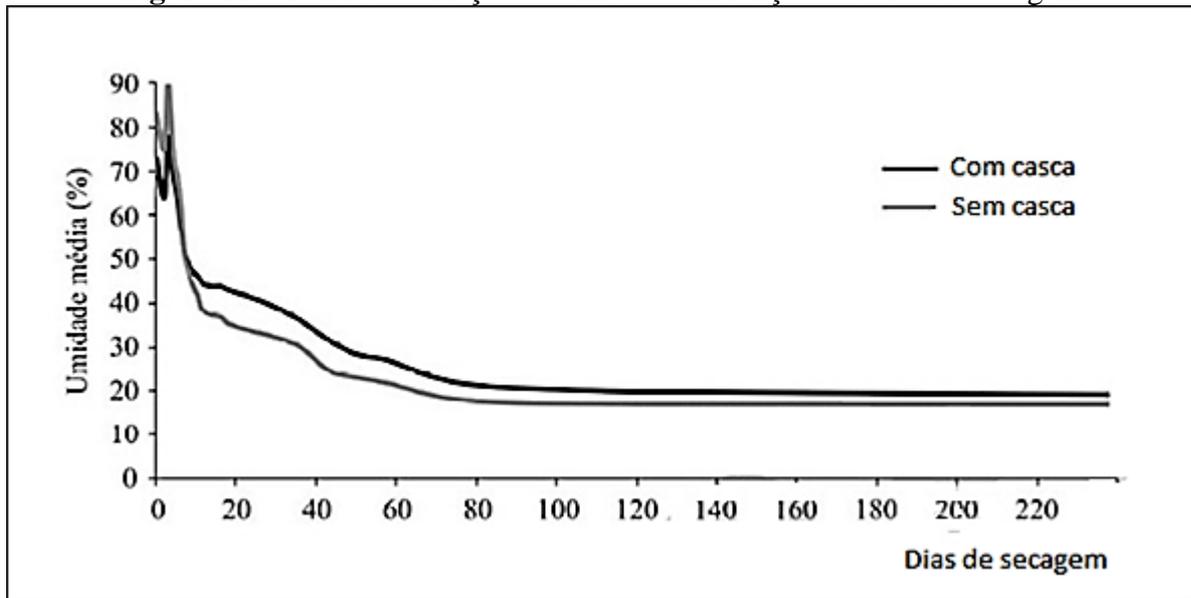
1º nível	2º nível	definição
biocombustíveis da madeira	combustíveis diretos da madeira	madeira produzida para fins energéticos, usada diretamente ou indiretamente como combustível
dendrocombustíveis	combustíveis indiretos da madeira	inclui biocombustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, subprodutos da exploração florestal e resultantes do processamento industrial da madeira para fins não energéticos
	combustíveis de madeira recuperada	madeira usada diretamente ou indiretamente como combustível, derivada de atividades socio-econômicas que empregam produtos de origem florestal
biocombustíveis não florestais	combustíveis de plantações energéticas	tipicamente combustíveis sólidos e líquidos produzidos a partir de plantações anuais, como é o caso do álcool da cana-de-açúcar
agrocombustíveis	subprodutos agrícolas	principalmente resíduos de colheitas e outros tipos de subprodutos de culturas, como palhas e folhas
	subprodutos animais	basicamente esterco de aves, bovinos e suínos
	subprodutos agroindustriais	basicamente subprodutos de agroindústrias, como o bagaço de cana e a casca de arroz
resíduos urbanos		resíduos sólidos e líquidos gerados em cidades e vilas

Fonte: SCHÜRHAUS (2008, p.16)

2.3.2 Biomassa de Madeira

O cavaco é um combustível florestal obtido a partir do cisalhamento de toras de madeira, esse processo gera lascas com granulometria pequena, esse cavaco então é destinado para a produção de energia em fornos e caldeiras. A diminuição de tamanho da madeira é muito benéfica, pois, o escoamento em silos é mais prático, e nas esteiras de transporte que compõem muitas estruturas de caldeiras (DINIZ, 2014).

Conforme Senger (2015), a umidade da lenha pode ser reduzida em mais de 50% nas primeiras três semanas, no processo de secagem. A figura (11) mostra a curva usual de secagem da lenha ao ar livre. É notável que adiante de 50% de umidade, há uma decrescente taxa de remoção de umidade, até atingir 20%, valor este, a umidade fica estável.

Figura 11 – Perfil da variação de umidade em função dos dias de secagem

Fonte: SENGER (2015, p. 27)

2.3.3 Poder Calorífico Inferior

Para Menezes (2013), o poder calorífico de um material é determinado pelo conteúdo de energia que é liberada quando o material entra em combustão, logo o calor gerado pelo processo de combustão de diferentes resíduos madeireiros podem variar dependendo de suas propriedades físicas, químicas e anatômicas.

O poder calorífico inferior (PCI) é a quantidade de calor liberada durante o processo de combustão com água no estado de vapor. O PCI depende muito das condições do combustível, pois fica variável conforme a umidade (KLAUTAU, 2008).

Segundo Menezes (2013), o PCI é a quantidade de calor necessária para produzir um quilo de combustível, por meio da combustão do mesmo, com excesso de ar e gases de descarga, resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando sua condensação. Todavia a energia gasta para evaporar o hidrogênio de constituições do combustível durante o processo de condensação da água é contabilizada.

Fabricantes de caldeiras e demais setores da indústria, disponibilizam tabelas com o PCI calculado dos combustíveis mais utilizados, conforme anexo (A).

2.3.4 Poder Calorífico Superior

O poder calorífico superior (PCS) é a quantidade de calor liberada durante o processo de queima, combustão com água na forma condensada, água que é proveniente da umidade. O PCS pode ser testado em laboratório, se fazendo uso de um calorímetro, que afere a variação

da temperatura da água ocasionada pela queima completa do montante de combustível em prova (KLAUTAU, 2008).

Para o PCS toda a água originada durante o processo de combustão é condensada, assim recuperando o calor proveniente da condensação. Esse montante de calor liberado durante o processo de condensação do vapor d'água e arrefecimento dos materiais de combustão é considerado até 25°C (SOUZA, 2013). A condição de combustão de um combustível é considerada como ideal quando o mesmo deve estar sem umidade, ou seja, seco absoluto, entretanto a queima está ligada com a influência de sua composição química, da madeira, lignina e extrativos, que potencializam a queima (QUIRINO, 2005).

Segundo Klautau (2008), o PCS pode ser calculado com base no teor de cinzas em massa, conforme equação (1).

$$PCS = 20 - 20 \cdot Z \quad (1)$$

Onde:

Z: porcentagem de cinzas em base seca (%)

2.3.5 Poder Calorífico Útil

O poder calorífico útil de uma biomassa de madeira é atingido negativamente pelo teor de umidade, quanto maior o teor de umidade menor é o poder calorífico útil disponível para a combustão conseqüentemente a liberação de energia da biomassa (FOELKEL, 2009).

A umidade pode ser denominada como o montante de água presente em uma amostra em relação a sua massa. A umidade acarreta vários pontos negativos, tais como custo elevado com transporte, devido o peso da água impregnado na biomassa de madeira, e também apresenta problemas para comercialização, pois quanto maior a umidade menor é a matéria prima adquirida, no caso de compras por peso (DINIZ, 2014).

O poder calorífico de um combustível é afetado pela umidade que está contida no mesmo, assim o poder calorífico da biomassa de madeira varia de 2400 a 3700 kcal/kg, para efeito de comparação, uma lenha com teor de umidade de 40% apresenta um poder calorífico por volta de 2400 kcal/kg, e com 12% de umidade o PCI é de 3680 kcal/kg (NASCIMENTO, 2007). Entretanto a variações de poder calorífico para cada espécie conforme Quirino, (2005).

Segundo Foelkel (2009), uma das principais falhas energéticas em caldeiras de biomassa é o teor de umidade contido na biomassa que é utilizada como combustível, as

perdas variam entre 25% a 50%. O elevado índice de umidade não afeta apenas o poder calorífico do combustível, mas afeta também, a estrutura interna da caldeira e suas operações.

Para o cálculo do poder calorífico útil é utilizado à equação (2), (FOELKEL, 2009).

$$PCU = (PCI \cdot (1 - (0,01 \cdot w))) - (600 \cdot 0,01 \cdot w) \quad (2)$$

Onde:

PCU: poder calorífico útil (kcal/Kg)

PCI: poder calorífico inferior (Kcal/kg)

w: umidade do cavaco de madeira (%)

Para Foelkel (2009), o poder calorífico inferior considerado para cavaco de eucalipto é de 4400 Kcal/kg.

Toda biomassa de madeira tem um percentual de umidade, sendo a água capilar a umidade que sai naturalmente com o corte da árvore, já a água higroscópica o montante de água que fica presa nas paredes das fibras da madeira. O ponto de saturação das fibras (PSF) é o limite entre esses dois pontos, e varia entre 25 % e 32 %, variação essa dependente da espécie, no entanto é considerada uma média igual a 28 % (JANKOWSKY; GALINA, 2013).

2.4 CONVERSÃO DENDROENERGÉTICA DA BIOMASSA

Para aproveitar o potencial energético da biomassa em escala industrial seja por meio da geração de energia elétrica ou potência a vapor, há métodos para a extração dessa energia armazenada por meio da combustão direta e processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) (ANEEL, 2008);

2.4.1 Pirólise

Esse processo é o mais antigo de todos os processos termoquímicos, ele consiste em transformar o combustível em outro combustível de melhor qualidade e conteúdo energético, um exemplo é o processo de fabricação de carvão. O processo tem como princípio de funcionamento da seguinte forma, o combustível primário é submetido a aquecimento (300°C a 500°C) com a quase falta de ar, para que o material volátil seja retirado. Esse processo faz com que o combustível final tenha duas vezes a sua densidade energética inicial, um exemplo fortemente difundido da pirólise é o carvão (ANEEL, 2005).

2.4.2 Gaseificação

O processo de gaseificação converte combustíveis sólidos em gasosos, por meio de reações termoquímicas, envolvendo vapor quente e ar, ou oxigênio, em quantidades inferiores para a estequiométrica, ou seja, o mínimo para a combustão. A gaseificação não se limita em um único tipo, ela se ramifica em mais tipos, o mais conhecido são os reatores de leito fixo e de leito fluidizado. A gaseificação é um processo que tem como objetivo a limpeza do processo, onde se tem uma preocupação para com o meio ambiente, pois nesse processo são removidos elementos nocivos à saúde tais como o enxofre. Esse processo também concebe a possibilidade de usos alternativos, como motores de combustão interna e turbinas a gás (ANEEL, 2005).

2.4.3 Combustão

Combustão é a transformação da energia química dos combustíveis em calor, por meio das reações dos elementos constituintes com o oxigênio fornecido. A combustão direta ocorre principalmente em fogões, fornos (metalurgia, por exemplo) e caldeiras (geração de vapor, por exemplo). Aparentemente o processo de combustão direta, demonstra ser prático, entretanto esse processo é considerado ineficiente, pois a energia da biomassa não é aproveitada de forma correta. Outro problema da combustão direta é a alta umidade (20% ou mais no caso da lenha) e a baixa densidade energética do combustível (lenha, palha, resíduos etc.), o que dificulta o seu armazenamento e transporte (ANEEL, 2005).

2.5 ANÁLISE DO TEOR DE UMIDADE

Para realizar a análise do teor de umidade é necessário, conforme NBR 14929, (Determinação do teor de umidade de cavacos – método por secagem em estufa), manter as amostras em temperatura constante de $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ por um período de 16 a 24 horas.

As amostras devem ser retiradas da estufa, resfriadas, pesadas novamente o recipiente e seu conteúdo e é calculada a massa da amostra seca.

Novamente as amostras voltam para estufa e são secadas por um período adicional de 2 horas. Então Pesados novamente o recipiente e seu conteúdo após o resfriamento.

Assim deve ser repetido este processo de secar e pesar quantas vezes necessárias até se alcançar uma massa constante de cada amostra em separado. O período de secagem entre duas pesagens consecutivas não deve ser inferior a 2 horas.

Após as amostras não sofrerem mais variação de massa é calculado o teor de umidade dos cavacos utilizando a equação (3), disponível na NBR 14929.

$$U = \left(\frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

U : teor de umidade (%)

m_1 : massa do recipiente de secagem seco em estufa (g)

m_2 : massa do recipiente com a amostra antes da secagem (g)

m_3 : massa do recipiente com a amostra após a secagem (g)

Para calcular o teor de massa seca, em porcentagem é utilizada a equação (4), disponível na NBR 14929;

$$M = \left(\frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

Onde:

M : teor de massa seca (%)

m_1 : massa do recipiente de secagem seco em estufa (g)

m_2 : massa do recipiente com a amostra antes da secagem (g)

m_3 : massa do recipiente com a amostra após a secagem (g)

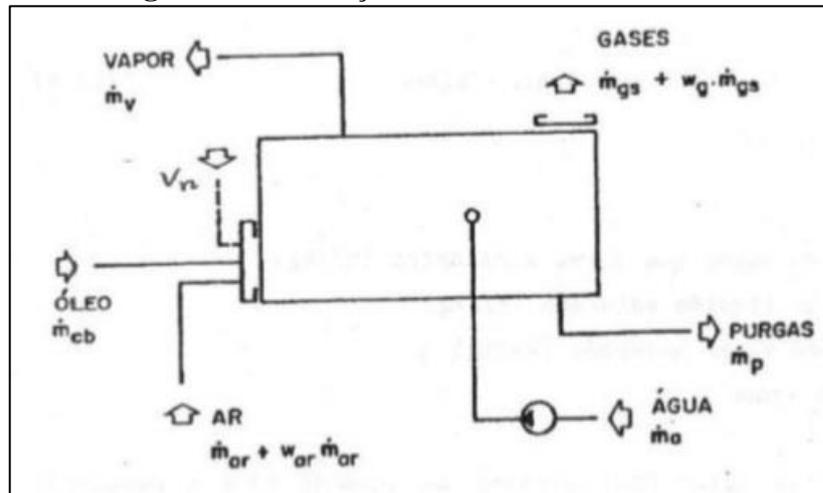
2.6 ANÁLISE DO RENDIMENTO ENERGÉTICO DE CALDEIRA

Segundo Bazzo (1995), a análise do rendimento energético de uma caldeira é feita a partir de dados experimentais obtidos com instrumentos posicionados nos efluentes de interesse.

Para aplicar o cálculo é fundamental definir a energia envolvida no processo, ou seja, o calor concebido no interior da fornalha, o calor transmitido ao fluido de trabalho, o calor agregado aos fluxos de massa, o acontecimento da combustão parcial e o calor extraviado para o meio ambiente por condução, convecção ou radiação (BAZZO, 1995).

A Figura 12 aponta um esquema geral dos fluxos de massa envolvidos numa caldeira flamotubular, na qual é gerado apenas vapor saturado.

Figura 12 – Balanço de massa em uma caldeira



Fonte: BAZZO (1995, p. 162)

A eficiência ou rendimento térmico de uma caldeira é calculado como a razão entre a energia transmitida à água para transformar em vapor e a utilização de energia contida no combustível. Existem duas formas de verificar o cálculo do rendimento energético em geradores de vapor: pelo método direto e pelo método indireto. O método indireto é o mais correto a se fazer, uma vez que fornece resultados mais confiáveis (SENGER, 2015).

2.6.1 Método Direto

O método direto (equação 5) é uma análise simplificada da transferência de calor que ocorre na caldeira, sendo necessário o conhecimento de alguns dados como vazão de vapor e combustível, temperatura e pressão do vapor produzido, quando não se têm esses dados devido à falta de instrumentação da caldeira é recomendado o método indireto (MARQUES, HADDAD e MARTINS, 2006).

$$\eta = \frac{(\text{energia produzida})}{(\text{energia em forma de combustível})} \quad (5)$$

$$\eta = \left(\frac{\dot{m}v \cdot (h_v - h_l)}{\dot{m}c \cdot PCI} \right) \quad (5)$$

Onde:

η : eficiência da caldeira

$\dot{m}v$: vazão mássica de vapor (kg/s)

h_v : entalpia do vapor produzido (kJ/kg)

h_l : entalpia da água de entrada (kJ/kg)

$\dot{m}c$: vazão mássica de combustível (kg/s)

PCI : poder calorífico inferior (kcal/kg)

Segundo Buecker (2002), o cálculo do rendimento pelo método direto corresponde ao produto da vazão mássica de vapor e mudança de entalpia entre o estado inicial e final da água, dividida pela energia térmica liberada com o consumo do combustível.

Este método tem a vantagem de permitir um cálculo mais rápido. No entanto, devido às mudanças temporárias que podem acontecer na vazão mássica de vapor, o método pode se tornar menos confiável (SENGER, 2015).

Fazendo uso da equação (5), é possível determinar o consumo específico de combustível, isolando as variáveis, conforme equação (6).

$$\dot{m}c = \left(\frac{\dot{m}v \cdot (h_v - h_l)}{\eta \cdot PCI} \right) \quad (6)$$

Onde:

η : eficiência da caldeira

$\dot{m}v$: vazão mássica de vapor (kg/s)

h_v : entalpia do vapor produzido (kJ/kg)

h_l : entalpia da água de entrada (kJ/kg)

$\dot{m}c$: vazão mássica de combustível (Kg/s)

PCI : poder calorífico inferior (kcal/kg)

O PCU pode ser considerado no cálculo do rendimento da caldeira (equação 7), (FOELKEL, 2009).

$$\dot{m}c = \left(\frac{\dot{m}v \cdot (h_v - h_l)}{\eta \cdot PCU} \right) \quad (7)$$

Onde:

η : eficiência da caldeira

\dot{m}_v : vazão mássica de vapor (kg/s)

h_v : entalpia do vapor produzido (kJ/kg)

h_l : entalpia da água de entrada (kJ/kg)

\dot{m}_c : vazão mássica de combustível (Kg/s)

PCU : poder calorífico útil (kcal/kg)

2.6.2 Método Indireto

No cálculo indireto, é feita a análise das perdas do gerador de vapor para alcançar o valor da eficiência. Neste método são necessários vários dados que da mesma forma podem estar errados. No entanto a maior parcela de perda está interligada ao fluxo e gases da chaminé, que pode vir a ser medido com exatidão, conseqüentemente o valor da eficiência se aproxima do valor exato (MARQUES, HADDAD e MARTINS, 2006).

O cálculo da eficiência pelo método indireto é feito com base nas perdas de calor no sistema gerador de vapor. Certo que as perdas de calor são menos flutuantes, este método possibilita maior segurança que o método direto (BAZZO, 1995).

De acordo com Bizzo (2003), as perdas de calor incluídas na operação de uma caldeira convencional são: perdas pelos gases de combustão soltos pela chaminé, perdas por radiação e convecção com o ambiente, perdas por purgas de condensado, perdas pela remoção das cinzas e perdas pela combustão parcial do combustível.

Segundo Bazzo (1995), a perda de calor acumulada devido cinzas, purgas, vapor de nebulização (se houver) e a perda pelas paredes, simbolizam menos que 2 % da energia que é cedida pela combustão na fornalha. Dessa forma, pode-se julgar o valor de 2% para essas perdas, propiciando o cálculo.

3 METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras foram coletadas conforme a NBR 10007- Amostragem de resíduos sólidos, para que os dados coletados possam representar a realidade encontrada no campo de realização da pesquisa. Logo foram recolhidas as amostras de cavacos no pátio da empresa, que fica exposta a intempéries climáticas (figura 13), as amostras foram coletadas em diferentes pontos da pilha de cavaco (figura 14), dessa forma assegurando a diversificação dos pontos de coleta, e uma maior homogeneidade das amostras.

Figura 13 – Pátio de cavaco



Fonte: Autor (2018)

Figura 14 – Coleta de cavaco



Fonte: Autor (2018)

As amostras de cavaco de eucalipto foram armazenadas em recipientes numerados, conforme figura 15.

Figura 15 – Armazenagem das amostras



Fonte: Autor (2018)

O processo de desumidificação foi realizado conforme norma NBR 14929 - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa, dessa forma seguindo um padrão já estabelecido para os testes a serem realizados.

Para a armazenagem das amostras foi utilizados recipientes confeccionados em aço inox, material disponível no local de estudo, com o fundo soldado, com diâmetro de seis polegadas e uma tela vazada de alumínio para que os cavacos não saltassem no ato da secagem com ar forçado e devido ser vazados permitir a circulação de ar quente. Os potes foram identificados com numeração arábica (figura 16).

Figura 16 – Recipientes de armazenagem.



Fonte: Autor (2018)

Foi utilizada uma balança (figura 17), para a determinação das massas das amostras coletadas.

Figura 17 – Balança



Fonte: Autor (2018)

As configurações da balança estão representadas conforme tabela (1).

Tabela 1 – Configurações da balança de alta precisão.

Instrumento	Balança
Marca	Toledo
Modelo	MODELO. 2003/11-209
TAG	BALANÇA 0480
Número de série	10960517
Capacidade de medição	0,00 a 5,00 kg
Resolução	0,001 kg

Fonte: Autor (2018)

Após a coleta das amostras, quanto maior o número de amostras mais preciso a aferição será, e a determinação das massas das amostras, foi extraída a umidade contida nas amostras até extinguir a mesma, através de uma estufa de circulação de ar forçado (figura 18).

Figura 18 – Estufa de circulação de ar forçado.



Fonte: Autor (2018)

Esta estufa tem a capacidade de manter a temperatura em $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$, que através de um termostato é possível determinar que a temperatura dentro da estufa permaneça em 105°C , ligando e desligando automaticamente a resistência que compõem a estufa, o ventilador que constitui o sistema tem a função de fazer a circulação forçada do ar.

Os dados coletados durante e após o experimento, foram registrados e armazenados no programa *Ms Excel*, e organizados em planilhas.

Para a realização da análise foi necessário pesar a tara do recipiente vazio após secagem em estufa e registrar a sua massa em planilha.

Logo foram recolhidas as amostras de cavacos e dispostas nos recipientes, estas foram pesadas e suas massas registradas, descontando a tara do recipiente de armazenagem.

Por sequência foi colocado os recipientes e seu conteúdo na estufa e mantidos a uma temperatura de $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ por um período de 16 a 24 horas.

As amostras foram retiradas da estufa, resfriadas, pesado novamente o recipiente e seu conteúdo e calculado a massa da amostra seca.

Foi colocado o recipiente e a amostra novamente na estufa e deixados secar por um período adicional de 2 horas. Então Pesados novamente o recipiente e seu conteúdo após o resfriamento.

Foi repetido este processo de secar e pesar quantas vezes necessárias até se alcançar uma massa constante de cada amostra em separado. O período de secagem entre duas pesagens consecutivas não deve ser inferior a 2 horas.

Após as amostras não sofrerem mais variação de massa foi calculado o teor de umidade dos cavacos utilizando a equação (3) disponível na NBR 14929.

$$U = \left(\frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

Para calcular o teor de massa seca (equação 4), em porcentagem foi utilizada a seguinte equação, disponível na NBR 14929;

$$M = \left(\frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

Após o conhecimento da umidade média das amostras foi calculado o poder calorífico útil da biomassa de madeira comprada pelo abatedouro de aves.

Para o cálculo do poder calorífico útil (equação 2).

$$PCU = \left(PCI \cdot (1 - (0,01 \cdot w)) \right) - (600 \cdot 0,01 \cdot w) \quad (2)$$

No presente estudo, foi considerado um valor intermediário de 32%, ou seja, a umidade ideal de recebimento de biomassa não deve ultrapassar o limite estabelecido, pois

todo valor acima desse, faz parte da água capilar que sai naturalmente. Portanto todo excedente da umidade ideal de recebimento será contabilizado como gasto.

Após identificar o poder calorífico útil, que é descontado a umidade excessiva do cavaco e a energia gasta para evaporar esta água, então é feita a análise do rendimento da caldeira, utilizando o método direto de análise.

Para o cálculo do consumo específico pelo método direto (equação 6).

$$\dot{m}c = \left(\frac{\dot{m}v \cdot (h_v - h_l)}{\eta \cdot PCI} \right) \quad (6)$$

Na indústria é necessário manter uma vazão de vapor constante para manter determinados processos, logo para equilibrar essa produção de vapor, se gasta mais combustível, elevando então o consumo específico.

Com auxílio do método direto de medição de eficiência de caldeiras, é possível isolar o consumo específico, e comparar a diferença que há entre o PCI e PCU.

Cálculo do consumo específico utilizando PCU, (equação 7).

$$\dot{m}c = \left(\frac{\dot{m}v \cdot (h_v - h_l)}{\eta \cdot PCU} \right) \quad (7)$$

Os dados obtidos pelas equações foram organizados no programa *Ms Excel*, para gerar dados referentes a cada grau de umidade que aumenta, e posteriormente gerando gráficos que possibilitam um melhor entendimento.

Logo é calculado então o consumo específico acima de 32% de umidade, conforme equação (8).

$$\dot{m}c = (\dot{m}c_{fixo} - \dot{m}c) \quad (8)$$

Onde:

$\dot{m}c_{fixo}$: consumo específico fixo de 32% de umidade (Kg/h)

$\dot{m}c$: consumo específico (Kg/h)

Para calcular o custo mensal de cavaco, acima do limite tolerado de 32% de umidade, usou-se a equação (9).

$$Custo\ mensa\ = ((\dot{m}c - \dot{m}c_{fixo}) * t_{dia} * dias) / pm * r\$ \quad (9)$$

Onde:

Custo mensal: custo mensal descontando os 32% limite

*m*_{fixo}: consumo específico fixo de 32% de umidade (kg/h)

*m*_c: consumo específico conforme o grau de umidade (kg/h)

*t*_{dia}: tempo de trabalho por dia da caldeira

dias: dias de trabalho da caldeira por mês

*p*_m: peso médio do m³ de cavaco recebido (kg/m³)

r\$: valor do m³ de cavaco

Para obtenção do peso médio do m³ de cavaco, é necessário pesar as cargas recebidas, relacionando com o volume das mesmas, e efetuando a média entre as cargas mensuradas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a aplicação do método de pesquisa desenvolvido, fica evidente que a hipótese de que a umidade interfere negativamente no rendimento da caldeira é verídico, dessa forma evidenciando o maior consumo de biomassa para manter a produção de vapor constante, e também explana a quantidade monetária perdida por consequência do mau armazenamento da biomassa, que é exposto às intempéries climáticas, como a chuva que é o mais maléfico.

4.1 DADOS OBTIDOS DO EXPERIMENTO.

No processo de pesagem das amostras foi coletada a tara dos recipientes (Tabela 2) que foram utilizados, para que posteriormente fosse descontado o valor encontrado.

Tabela 2 – Tara dos recipientes

	Recipiente 01	Recipiente 02
Massa	826 g	979 g

Fonte: Autor (2018)

A etapa seguinte foi a coleta das amostras *in loco*, conforme NBR 10007, que foram obtidas em diferentes pontos dos montes de cavaco, que ficam dispostos no pátio da empresa, dessa forma obtendo uma amostra homogênea.

Feito a coleta, as mesmas foram armazenadas em potes cilíndricos de aço inox, com numeração arábica para a distinção de ambas.

Feito a coleta, foi registrado a massa das amostras, em planilha *Ms Excel*, conseguindo foi feito a desumidificação por meio da estufa com circulação forçada de ar, capaz de manter a temperatura em $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$, igualmente exigida pela NBR 14929.

Devido à circulação de ar forçada, os recipientes foram cobertos com uma tela de alumínio vazado, dessa forma evitando que o material em estudo fosse arremessado fora devido à força da ventilação.

Através da equação (3), foi possível determinar o teor de umidade das amostras conforme as medições de massa eram realizadas.

$$U = \left(\frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

Junto do cálculo do teor de umidade foi aplicado o cálculo do teor de massa seca das amostras, pela equação (4), disponível na NBR 14929.

$$M = \left(\frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

O experimento de desumidificação durou duas semanas, desta forma, foi obtido um maior número de amostras a serem estudadas.

Foi realizado um registro e controle do processo de desumidificação, feito em *Ms Excel*, conforme quadro (3). Onde é possível notar a perda de umidade conforme o tempo de exposição em estufa. As amostras foram submetidas à desumidificação até as massas não apresentassem variação nas pesagens.

Quadro 3 – Perda de umidade em estufa.

SEMANA 01		Amostra 1	Umidade	Há variação de massa ?	Amostra 2	Umidade	Há variação de massa ?
		Peso do recipiente	826 g			979 g	
	Massa inicial umida	337 g	100 %		393 g	100 %	
	1° pesagem após estufa	209 g	37,98 %	sim	231 g	41,22 %	sim
	2° pesagem após estufa	196 g	41,84 %	sim	231 g	41,22 %	não
	3° pesagem após estufa	196 g	41,84 %	não	231 g	41,22 %	não
	4° pesagem após estufa	196 g	41,84 %	não	231 g	41,22 %	não
SEMANA 02		Amostra 3	Umidade	Há variação de massa ?	Amostra 4	Umidade	Há variação de massa ?
		Peso do recipiente	826 g		979 g		
		Massa inicial umida	378 g	100 %	417 g	100 %	
		1° pesagem após estufa	223 g	41,01 %	306 g	26,62 %	sim
		2° pesagem após estufa	167 g	55,82 %	203 g	51,32 %	sim
		3° pesagem após estufa	154 g	59,26 %	185 g	55,64 %	sim
		4° pesagem após estufa	153 g	59,52 %	185 g	55,64 %	não
		5° pesagem após estufa	153 g	59,52 %	185 g	55,64 %	não
Média de umidade		48,74%					

Fonte: Autor (2018)

4.2 CONTROLE DO RECEBIMENTO DE CAVACO.

A empresa cujo estudo foi realizado faz a compra de cavaco de eucalipto de diferentes fornecedores, logo não há homogeneidade da biomassa, tanto no percentual de umidade, densidade e granulometria.

Para se gerar um padrão neste estudo foi realizada a pesagem das cargas de cavaco recebidas, para obter o peso médio do m³ de cavaco que a empresa recebe, e posteriormente

quantificar os gastos referentes à umidade impregnada na biomassa, para isso foi realizado uma tabela, com o controle de recebimento das cargas e o peso médio das mesmas (tabela 3).

Tabela 3 – Peso médio das cargas de biomassa.

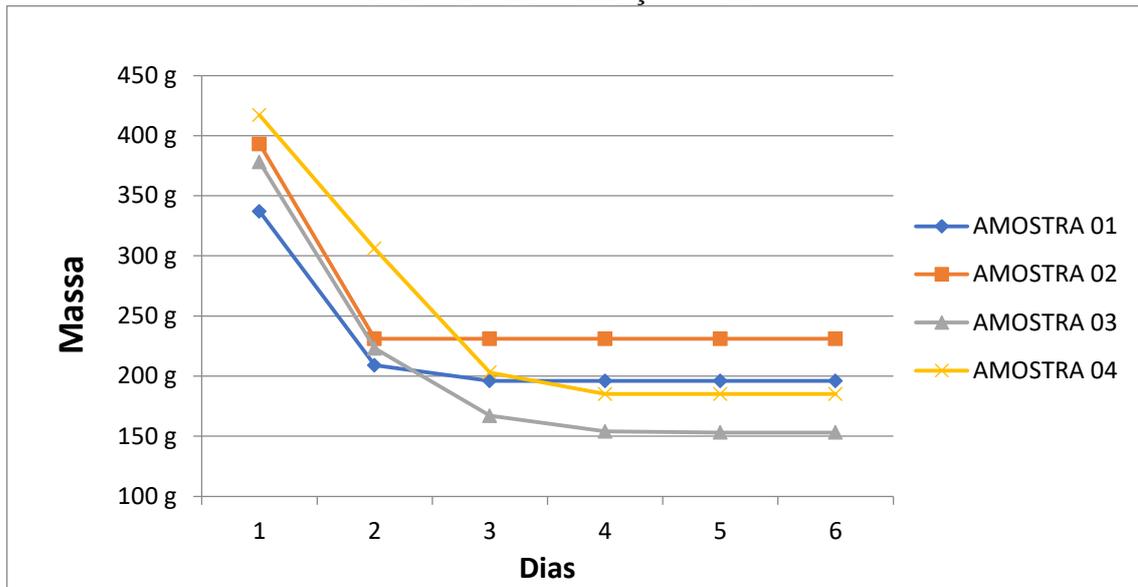
	Cargas (kg)	Fornecedor	Dia	Horário	Volume m ³	Kg/m ³
1	28240	1	28/set	08h25min	110	256,73
2	35600	1	28/set	14h16min	110	323,64
3	36940	1	03/out	08h15min	110	335,82
4	36020	2	03/out	14h10min	115	313,22
5	27240	1	03/out	15h44min	110	247,64
6	31120	2	03/out	18h00min	115	270,61
7	34660	1	04/out	08h11min	110	315,09
8	35800	1	04/out	11h49min	110	325,45
9	39140	1	05/out	08h22min	110	355,82
10	35740	2	05/out	11h31min	115	310,78
11	39220	2	05/out	16h07min	115	341,04
12	39440	2	08/out	11h10min	115	342,96
13	39680	2	08/out	16h43min	115	345,04
					Média	314,14

Fonte: Autor (2018)

Após a aferição das cargas chegou-se a um peso médio de 314,14 Kg/m³ de cavaco de eucalipto, com este dado é possível quantificar a perda de rendimento da caldeira ocasionada pela umidade excessiva da biomassa.

4.3 APLICAÇÃO DOS DADOS.

Foi gerado um gráfico com o progresso de desumidificação, para evidenciar o processo de maneira ilustrativa (gráfico 1). Ficou visível a perda e estabilização das massas, conforme o decorrer dos dias do experimento.

Gráfico 1 – Estabilização de massa.

Fonte: Autor (2018)

Com o conhecimento do teor de umidade contido na biomassa de cavaco é possível então determinar o poder calorífico útil (PCU) de cada amostra e a média, utilizando a fórmula do poder calorífico útil, (equação 02).

$$PCU = (PCI \cdot (1 - (0,01 \cdot w))) - (600 \cdot 0,01 \cdot w) \quad (2)$$

Foi adotado como poder calorífico inferior o valor médio de 4400 Kcal/h para cavacos de eucalipto.

Na sequência do estudo foi realizado o cálculo do consumo específico utilizando o poder calorífico inferior (PCI).

Cálculo do consumo específico pelo método direto utilizando PCI, (equação 6). As entalpias foram retiradas da tabela B.1 (anexo B), a temperatura utilizada para determinar o h_l foi de 80°C, e para determinar o h_v foi de 187°C, nota-se que é necessário interpolar este valor.

$$\dot{m}_c = \left(\frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_l)}{\eta \cdot PCI} \right) \quad (6)$$

Onde:

\dot{m}_v : 12000 (kg/h)

η : 0,85

PCI : 4400 (kcal/kg)

h_v : 665,39 (kcal/kg)

h_l : 80,03 (kcal/kg)

É necessário fazer a conversão das entalpias, pois a tabela traz as entalpias em kJ/kg, logo é necessário convertê-las para kcal, logo se pode usar a relação de, 1 kcal/kg é igual a 4,184 kJ/kg.

Consequente para efeito de comparação foi realizado o cálculo do consumo específico, utilizando o poder calorífico útil (PCU), conforme equação (7).

$$\dot{m}_c = \left(\frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_l)}{\eta \cdot PCU} \right) \quad (7)$$

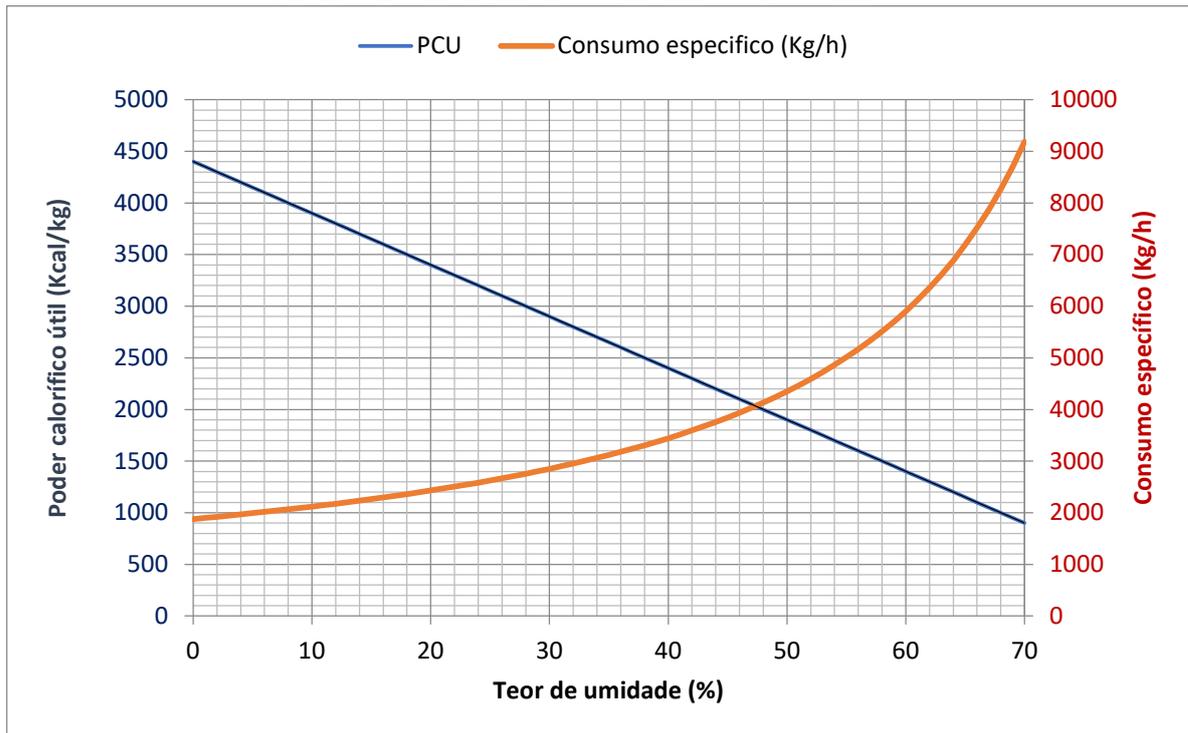
Foram utilizados para os cálculos os dados da tabela (4).

Tabela 4 – Dados de cálculo

Vapor	12000 (Kg/h)
Eficiência	0,85
Entalpia de entrada	80,03 (Kcal/h)
Entalpia de saída	665,39 (Kcal/h)
Poder calorífico inferior	4400 (Kcal/h)
Tempo de trabalho	24 (horas)
Dias de trabalho	25 (dias)
Peso médio do m³ de cavaco	314,14 (Kg/m ³)
Preço do m³ de cavaco de eucalipto	R\$ 39,90 (R\$)
Consumo específico a 32% de umidade	2951,39 (Kg/h)

Fonte: Autor (2018)

Feito todos os cálculos do teor de umidade, poder calorífico útil e consumo específico, foi gerado um gráfico, com a tendência dos dados obtidos (gráfico 2), dessa forma facilitando o entendimento, a respeito da interferência da umidade para com o poder calorífico do cavaco de eucalipto.

Gráfico 2 – Rendimento conforme teor de umidade.

Fonte: Autor (2018)

Ficou evidente a diminuição do poder calorífico disponível na biomassa, conforme aumenta a umidade do cavaco, desse modo confirmando a hipótese levantada de que haveria uma interferência maléfica da umidade na eficiência da caldeira, uma vez que para a produção de vapor se manter constante é necessário um maior volume de biomassa para alimentar a caldeira.

4.4 MENSURAÇÃO DOS RESULTADOS.

Com os resultados obtidos, foi calculado o gasto mensal e anual do consumo específico acima do percentual ideal de 32% de umidade do cavaco. Para tal quantificação foi utilizado os dados referentes à caldeira utilizada no abatedouro de aves, conforme tabela (5).

Tabela 5 – Configurações da caldeira.

Equipamento	Caldeira flamotubular
Marca	Icavi
Tipo	Mista
Tipo de fluido	Vapor
Produção de vapor	12 T/h
Pressão de operação	10 Kgf/cm ²
PMTA	11,5 Kgf/cm ²
Pressão de prova	18 Kgf/cm ²
Temperatura máxima de projeto	187°C
SAQ total	556,00 m ²
Eficiência	0.85
Volume de água	18000 l
Volume de vapor	5500 l
Volume total	23500 l
Combustível	Cavaco 100%
Categoria do equipamento	B-NR-13
Fabricação	Out/12
Temperatura de Condensado	97°C
Temperatura de Operação	80°C
Temperatura da Chaminé	165°C
Altura de chaminé	18 Metros
Umidade do combustível	20% - 50%

Fonte: Autor (2018)

Logo com o conhecimento da produção de vapor de 12 T/h, que consta no projeto e com a confirmação do mesmo valor, *setpoint*, na sala de comando da caldeira, foi calculado o custo adicional de cavaco devido à umidade, para suprir a demanda de vapor de 12 T/h, que é constante devido os processos do abatedouro de aves.

O estudo levou em consideração que a umidade ideal do cavaco é de 32% devido ser o ponto de saturação das fibras da madeira, ponto este que separa a água capilar que escoar com o tempo da madeira e a água higroscópica que está presa nas fibras da madeira.

Foi calculado então o consumo específico acima de 32% de umidade, conforme equação (8).

$$\dot{m}c = (\dot{m}c_{fixo} - \dot{m}c) \quad (8)$$

Para calcular o custo mensal de cavaco, acima do limite tolerado de 32% de umidade, usou-se a equação (9).

$$\text{Custo mensal} = (((\text{mc} - \text{mcfixo}) * \text{tdia} * \text{dias}) / \text{pm} * \text{r}\$) \quad (9)$$

Para o cálculo acima foi usado os seguintes dados, conforme tabela (4).

Em sequência foi feito o mesmo cálculo para vários teores de umidade, por meio do programa *Ms Excel*, conforme tabela (6).

Tabela 6 – Custo adicional de cavaco devido à umidade

Teor de umidade (%)	PCU (kcal/kg)	Consumo específico (Kg/h)	Consumo excedente de cavaco acima de 32% (Kg/h)	Gasto mensal, com umidade acima de 32%	Gasto anual, com umidade acima de 32 %
32	2800	2951,39	0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
33	2750	3005,06	53,66	R\$ 4.089,46	R\$ 49.073,47
34	2700	3060,71	109,31	R\$ 8.330,37	R\$ 99.964,48
35	2650	3118,46	167,06	R\$ 12.731,33	R\$ 152.775,91
36	2600	3178,43	227,03	R\$ 17.301,54	R\$ 207.618,54
37	2550	3240,75	289,35	R\$ 22.050,99	R\$ 264.611,86
38	2500	3305,56	354,17	R\$ 26.990,41	R\$ 323.884,92
39	2450	3373,02	421,63	R\$ 32.131,44	R\$ 385.577,29
40	2400	3443,29	491,90	R\$ 37.486,68	R\$ 449.840,17
41	2350	3516,56	565,16	R\$ 43.069,80	R\$ 516.837,64
42	2300	3593,00	641,61	R\$ 48.895,67	R\$ 586.748,05
43	2250	3672,85	721,45	R\$ 54.980,47	R\$ 659.765,58
44	2200	3756,32	804,93	R\$ 61.341,84	R\$ 736.102,09
45	2150	3843,68	892,28	R\$ 67.999,10	R\$ 815.989,14
46	2100	3935,19	983,80	R\$ 74.973,36	R\$ 899.680,34
47	2050	4031,17	1079,78	R\$ 82.287,84	R\$ 987.454,03
48	2000	4131,95	1180,56	R\$ 89.968,03	R\$ 1.079.616,40
48,74	1963	4209,83	1258,44	R\$ 95.903,27	R\$ 1.150.839,19
49	1950	4237,90	1286,51	R\$ 98.042,09	R\$ 1.176.505,06
50	1900	4349,42	1398,03	R\$ 106.541,09	R\$ 1.278.493,11
51	1850	4466,98	1515,58	R\$ 115.499,50	R\$ 1.385.994,03
52	1800	4591,06	1639,66	R\$ 124.955,60	R\$ 1.499.467,23
53	1750	4722,23	1770,84	R\$ 134.952,05	R\$ 1.619.424,61
54	1700	4861,12	1909,73	R\$ 145.536,53	R\$ 1.746.438,30
55	1650	5008,43	2057,03	R\$ 156.762,48	R\$ 1.881.149,80
56	1600	5164,94	2213,55	R\$ 168.690,06	R\$ 2.024.280,76
57	1550	5331,55	2380,16	R\$ 181.387,16	R\$ 2.176.645,98
58	1500	5509,27	2557,88	R\$ 194.930,74	R\$ 2.339.168,88
59	1450	5699,25	2747,85	R\$ 209.408,35	R\$ 2.512.900,25
60	1400	5902,79	2951,39	R\$ 224.920,08	R\$ 2.699.041,01
61	1350	6121,41	3170,02	R\$ 241.580,83	R\$ 2.898.969,98
62	1300	6356,85	3405,46	R\$ 259.523,17	R\$ 3.114.278,09
63	1250	6611,12	3659,73	R\$ 278.900,90	R\$ 3.346.810,85
64	1200	6886,59	3935,19	R\$ 299.893,45	R\$ 3.598.721,35
65	1150	7186,01	4234,61	R\$ 322.711,43	R\$ 3.872.537,10
66	1100	7512,64	4561,25	R\$ 347.603,77	R\$ 4.171.245,20
67	1050	7870,39	4918,99	R\$ 374.866,81	R\$ 4.498.401,69
68	1000	8263,91	5312,51	R\$ 404.856,15	R\$ 4.858.273,82
69	950	8698,85	5747,45	R\$ 438.002,27	R\$ 5.256.027,23
70	900	9182,12	6230,72	R\$ 474.831,29	R\$ 5.697.975,47

Fonte: Autor (2018)

Com os resultados obtidos por intermédio do programa *Ms Excel*, que possibilitou a geração de cálculos diversos de forma simplificada, fazendo notável o maior consumo

específico para manter a produção de vapor constante e conseqüentemente o custo adicional de operação devido a umidade excessiva impregnada na biomassa de madeira.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo buscou por meio do experimento de desumidificação em estufa, o conhecimento da umidade média dos cavacos de madeira recebidos pelo abatedouro de aves localizado no oeste do estado do Paraná, dessa forma quantificar os malefícios causados pela água contida na biomassa que é largamente utilizada para geração de vapor na região do estudo e verificar a hipótese levantada de que a umidade age de forma negativa no consumo específico da caldeira.

Para a mensuração dos cálculos foi utilizado uma caldeira flamotubular com capacidade de produção de vapor de 12 T/h, a uma pressão de 10 kgf/cm², que utiliza como combustível de cavaco de 20% a 50% de umidade, e com eficiência térmica de 85%.

Os resultados obtidos através do experimento de desumidificação do cavaco que se encontrava em local não coberto, exposto ao tempo, e cálculos matemáticos, confirmou a hipótese de que a umidade agiria de forma negativa no consumo da caldeira.

Fazendo a consideração de que a umidade ideal para uma biomassa é de 32%, valor este retirado do ponto de saturação das fibras, PSF, e comparando com a umidade média das amostras de 48,74%, houve uma queda no poder calorífico útil de 29,89%. Houve um salto no consumo específico de 42,63%, que representa um montante de R\$ 95.903,27/mês, valor este que representa a quantidade de cavaco a mais gasta para desprender a água do cavaco e fazer a mudança de fase, e manter a produção de vapor constante.

Em resumo o estudo se mostrou válido, pois evidencia a interferência da umidade no rendimento da caldeira, e quanto isso custa para a empresa, dessa forma conscientizar que o cavaco feito de árvores recém cortadas, não deve ser utilizado primeiramente, mas sim deixar a água capilar escoar, para posteriormente ser utilizado.

Outro ponto é a armazenagem da biomassa que não deve ser feita ao tempo, mas sim em ambiente coberto, que esteja protegido contra chuva e sereno, pois essas intempéries climáticas aumentam a umidade do cavaco.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.

- Viabilidade econômica de uma cobertura para proteger a biomassa de intempéries climáticas.
- Análise do rendimento indireto da caldeira com auxílio do programa EES.
- Sistema de pagamento do cavaco de madeira por poder calorífico útil.
- Comparativo entre cavaco de eucalipto e pinus, levando em consideração o poder calorífico e consumo específico.
- Análise comparativa com mais fornecedores
- Análise comparativa com outras fontes energéticas
- Elaborar uma fórmula que determine o ranking de fornecedores através do custo final por kg de vapor gerado, levando em consideração a umidade, densidade, poder calorífico por tipo, custo do cavaco, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL, **A produção de energia elétrica a partir de biomassa**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2008. Disponível em: <www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf>. > Acessado em 29/08/2018.
- ANEEL, **Atlas de energia elétrica do Brasil** / Agência Nacional de Energia Elétrica. 2. ed. – Brasília: Aneel, 2005. Disponível em:<<http://www.aneel.gov.br/livros>>. Acessado em 01/10/2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929**: Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos. Rio de Janeiro, 2004.
- BAZZO, Edson. **Geração de vapor**. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.
- BIZZO, Waldir A. **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Campinas: FEM/Unicamp, 2003.
- BRASIL. NR-13 - **Manual Técnico de Caldeiras e Vasos de Pressão**. ed. Comemorativa 10 anos da NR-13(da Portaria nº 23/94). Brasília: Ministério do Trabalho, 2006.
- BUECKER, B.**Basics of Boiler and HRSG Design**.Oklahoma: Penn Well Corporation, 2002
- DINIZ, Iuri Sousa. **Estudo da influência da umidade no consumo específico do cavaco de madeira para geração de vapor saturado em caldeira de biomassa**. 2014
- FOELKEL, Celso. **Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade**. *Eucalyptus Online Book & Newsletter*, 2009.
- JANKOWSKY, Ivaldo Pontos; GALINA, Inês Cristina Martins. **Curso técnico de secagem de madeiras**. Piracicaba: PIMADS: Projeto Piso de Madeira Sustentável. 2013.
- KLAUTAU, J. V. P. **Análise Experimental de uma Fornalha a lenha de Fluxo Cocorrente Para Secagem de Grão**. 2008. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) PPGERHA, UFPR. Curitiba: 2008.
- LEITE, Nilson Ribeiro; MILITÃO, Renato de Abreu. **Tipos e aplicações de caldeiras**. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2008.
- MARQUES, Milton César Silva; HADDAD, Jamil; MARTINS, André Ramon Silva. **Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações**. Itajubá: Fupai, 2006.
- MENEZES, MJS **Poder calorífico e análise imediata da maravalha de Pinus (Pinus sp.) e Araucária (Araucaria angustifolia) de reflorestamento como resíduos de madeireira**. Cascavel, PR: UNIOESTE, 2013.

MME (Brasil), Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, **Biomassa é a segunda maior fonte de energia em 2016**. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acessado em 03/09/2018.

NASCIMENTO, Mário Donizeti do. **Otimização do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria seropédica**. 2007. p. 15.

NOGUEIRA, L.A.H., LORA, E.E.S.; **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. (2008). **Caracterização Energética da Biomassa Vegetal**. BARRETO, Eduardo José Fagundes (Coord). **Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

QUIRINO, W. F. et al. **Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos**. Revista da Madeira, n.89. abr. 2005, p. 100-106. Disponível em: <<http://www.lippel.com.br/dados/download/05-05-2014-10-46poder-calorifico-da-madeira-e-de-materiais-ligno-celulosicos.pdf>>. Acesso em: 26/09/2018.

SENGER, Renan. **Análise do rendimento de uma caldeira alimentada com lenha em toras**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SCHURHAUS, Patric. **Propriedades e produtos energéticos da madeira**. União da Vitória, Centro Universitário de União da Vitória – UNIUV, 2008. <disponível em; www.eng.br> acessado em 11/09/2018.

SOUZA, Marina Moura de. **Caracterização e viabilidade econômica do uso energético de resíduos da colheita florestal e do processamento de Pinus Taeda L**. 2013.

TECCALOR, **Tabela do poder calorífico inferior**, Disponível em: <www.teccalor.com.br/PDF/TabelaPoderCalorifico.pdf>

VAN WYLEN, Gordon John; SONNTAG, Richard Edwin. **Fundamentos da termodinâmica**. Limusa:, 2009.

ANEXO A – TABELA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR

TABELA - PODER CALORÍFICO INFERIOR			
COMBUSTÍVEL	PCI	COMBUSTÍVEL	PCI
Álcool de cana	5.500 Kcal/l	Gás natural	8.600 Kcal/m ³
Aparas vinilo	6.300 Kcal/kg	Lascas de madeira	3.300 Kcal/kg
Bagaço de cana (20% água)	3.200 Kcal/kg	Lenha (40% água)	2.400 Kcal/kg
Bagaço de cana (50% água)	1.800 Kcal/kg	Lenha seca (12% água)	3.680 Kcal/kg
Bambú (10% água)	3.700 Kcal/kg	Madeira de caixotes	3.800 Kcal/kg
Borra de café	1.570 Kcal/kg	Madeira muito seca	4.800 Kcal/kg
Carvão de babaçu	7.000 Kcal/kg	Madeira pinho (seca ao ar)	3.500 Kcal/kg
Carvão mineral - Cambui/PR	6.200 Kcal/kg	Madeira verde	2.500 Kcal/kg
Carvão mineral - Charqueadas/RS	3.100 Kcal/kg	Óleo combustível 1 ^A	9.800 Kcal/kg
Carvão mineral - Mina do Leão/RS	4.200 Kcal/kg	Óleo combustível 1 ^B	9.800 Kcal/kg
Carvão mineral - Tubarão/SC	4.500 Kcal/kg	Óleo combustível 2 ^A	9.000 Kcal/kg
Carvão vegetal	7.500 Kcal/kg	Óleo combustível 2 ^B	9.000 Kcal/kg
Casca de árvore	2.200 Kcal/kg	Óleo combustível 3 ^A	3.000 Kcal/kg
Casca de algodão	3.000 Kcal/kg	Óleo combustível 3 ^B	9.000 Kcal/kg
Casca de amêndoa dende	4.800 Kcal/kg	Óleo de algodão	8.050 Kcal/l
Casca de arroz (20% água)	3.300 Kcal/kg	Óleo de amendoim	8.000 Kcal/l
Casca de babaçu	4.000 Kcal/kg	Óleo de babaçu	7.770 Kcal/l
Casca de cacau (8% água)	3.900 Kcal/kg	Óleo de soja	8.125 Kcal/l
Casca de café	3.800 Kcal/kg	Óleo diesel	8.620 Kcal/l
Casca de cajú	4.700 Kcal/kg	Palha de amendoim (12% água)	3.100 Kcal/kg
Casca de côco	4.000 Kcal/kg	Palha de trigo (20% água)	3.200 Kcal/kg
Casca de eucalipto	3.750 Kcal/kg	Papel	4.200 Kcal/kg
Casca de tanino úmido (68% água)	800 Kcal/kg	Piche alcatrão	8.600 Kcal/kg
Casca de soja	3.300 Kcal/kg	Pó de linho	4.000 Kcal/kg
Cavaco (eucalipto)	4.300 Kcal/kg	Pó de madeira fino (seco)	4.000 Kcal/kg
Cavacos de pinho	2.500 Kcal/kg	Pó de madeira grosso (seco)	4.200 Kcal/kg
Coque de gás	5.400 Kcal/kg	Pó de tabaco	2.300 Kcal/kg
coque de lenha	7.600 Kcal/kg	Querosene	8.300 Kcal/l
Coque metalúrgico	7.200 Kcal/kg	Recortes de couro (14% água)	4.400 Kcal/kg
Fibras de palmeira (48% água)	2.000 Kcal/kg	Resíduos de juta	3.800 Kcal/kg
Fibras de palmito	3.800 Kcal/kg	Restos de borracha	4.000 Kcal/kg
Filme polietileno	5.600 Kcal/KG	Sementes de girassol (9,5% água)	4.300 Kcal/kg
Gás de água	4.000 Kcal/m ³	Serragem de pinho (40% água)	2.000 Kcal/kg
Gás de água carburetado	6.000 Kcal/m ³	Serragem seca (20% água)	3.500 Kcal/kg
Gás de alto forno	700 Kcal/m ³	Serragem + Cepilho (seco)	4.600 Kcal/kg
Gás de biodigestor (biogás)	5.000 Kcal/m ³	Sisal (11% água)	3.400 Kcal/kg
Gás de coqueira	4.300 Kcal/m ³	Sobra de serraria (pinho)	4.160 Kcal/kg
Gás de gasogênio	1.260 Kcal/m ³	Tecido nailon	7.300 Kcal/kg
Gás de nafta	4.750 Kcal/m ³	Trapos de pano	4.200 Kcal/kg
Gás de GLP (50%)	10.800 Kcal/kg	Trufa (seca ao ar) (25 a 6% água)	3.0000-5.000 Kcal/kg

Fonte: Teccalor (2018)

ANEXO B – TABELA DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DA ÁGUA

Tabela B.1 — Propriedades termodinâmicas da água

Tabela B.1.1
Água saturada: tabela em função da temperatura

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m ³ /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v _l	v _v	u _l	u _{lv}	u _v	h _l	h _{lv}	h _v	s _l	s _{lv}	s _v
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0,00	2375,33	2375,33	0,00	2501,35	2501,35	0,0000	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,27	2382,24	20,98	2489,57	2510,54	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,16	2389,15	41,99	2477,75	2519,74	0,1510	8,7498	8,9007
15	1,705	0,001001	77,925	62,98	2333,06	2396,04	62,98	2465,93	2528,91	0,2245	8,5569	8,7813
20	2,339	0,001002	57,7897	83,94	2318,98	2402,91	83,94	2454,12	2538,06	0,2966	8,3706	8,6671
25	3,169	0,001003	43,3583	104,86	2304,90	2409,76	104,87	2442,30	2547,17	0,3673	8,1905	8,5579
30	4,246	0,001004	32,8922	125,77	2290,81	2416,58	125,77	2430,48	2556,25	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,628	0,001006	25,2158	146,65	2276,71	2423,36	146,66	2418,62	2565,28	0,5052	7,8478	8,3530
40	7,384	0,001008	19,5229	167,53	2262,57	2430,11	167,54	2406,72	2574,26	0,5724	7,6845	8,2569
45	9,593	0,001010	15,2581	188,41	2248,40	2436,81	188,42	2394,77	2583,19	0,6386	7,5261	8,1647
50	12,350	0,001012	12,0318	209,30	2234,17	2443,47	209,31	2382,75	2592,06	0,7037	7,3725	8,0762
55	15,758	0,001015	9,56835	230,19	2219,89	2450,08	230,20	2370,66	2600,86	0,7679	7,2234	7,9912
60	19,941	0,001017	7,67071	251,09	2205,54	2456,63	251,11	2358,48	2609,59	0,8311	7,0784	7,9095
65	25,03	0,001020	6,19656	272,00	2191,12	2463,12	272,03	2346,21	2618,24	0,8934	6,9375	7,8309
70	31,19	0,001023	5,04217	292,93	2176,62	2469,55	292,96	2333,85	2626,80	0,9548	6,8004	7,7552
75	38,58	0,001026	4,13123	313,87	2162,03	2475,91	313,91	2321,37	2635,28	1,0154	6,6670	7,6824
80	47,39	0,001029	3,40715	334,84	2147,36	2482,19	334,88	2308,77	2643,66	1,0752	6,5369	7,6121
85	57,83	0,001032	2,82757	355,82	2132,58	2488,40	355,88	2296,05	2651,93	1,1342	6,4102	7,5444
90	70,14	0,001036	2,36056	376,82	2117,70	2494,52	376,90	2283,19	2660,09	1,1924	6,2866	7,4790
95	84,55	0,001040	1,98186	397,86	2102,70	2500,56	397,94	2270,19	2668,13	1,2500	6,1659	7,4158
100	101,3	0,001044	1,67290	418,91	2087,58	2506,50	419,02	2257,03	2676,05	1,3068	6,0480	7,3548
105	120,8	0,001047	1,41936	440,00	2072,34	2512,34	440,13	2243,70	2683,83	1,3629	5,9328	7,2958
110	143,3	0,001052	1,21014	461,12	2056,96	2518,09	461,27	2230,20	2691,47	1,4184	5,8202	7,2386
115	169,1	0,001056	1,03658	482,28	2041,44	2523,72	482,46	2216,50	2698,96	1,4733	5,7100	7,1832
120	198,5	0,001060	0,89186	503,48	2025,76	2529,24	503,69	2202,61	2706,30	1,5275	5,6020	7,1295
125	232,1	0,001065	0,77059	524,72	2009,91	2534,63	524,96	2188,50	2713,46	1,5812	5,4962	7,0774
130	270,1	0,001070	0,66850	546,00	1993,90	2539,90	546,29	2174,16	2720,46	1,6343	5,3925	7,0269
135	313,0	0,001075	0,58217	567,34	1977,69	2545,03	567,67	2159,59	2727,26	1,6869	5,2907	6,9777
140	361,3	0,001080	0,50885	588,72	1961,30	2550,02	589,11	2144,75	2733,87	1,7390	5,1908	6,9298
145	415,4	0,001085	0,44632	610,16	1944,69	2554,86	610,61	2129,65	2740,26	1,7906	5,0926	6,8832
150	475,9	0,001090	0,39278	631,66	1927,87	2559,54	632,18	2114,26	2746,44	1,8417	4,9960	6,8378
155	543,1	0,001096	0,34676	653,23	1910,82	2564,04	653,82	2098,56	2752,39	1,8924	4,9010	6,7934
160	617,8	0,001102	0,30706	674,85	1893,52	2568,37	675,53	2082,55	2758,09	1,9426	4,8075	6,7501
165	700,5	0,001108	0,27269	696,55	1875,97	2572,51	697,32	2066,20	2763,53	1,9924	4,7153	6,7078
170	791,7	0,001114	0,24283	718,31	1858,14	2576,46	719,20	2049,50	2768,70	2,0418	4,6244	6,6663
175	892,0	0,001121	0,21680	740,16	1840,03	2580,19	741,16	2032,42	2773,58	2,0909	4,5347	6,6256
180	1002,2	0,001127	0,19405	762,08	1821,62	2583,70	763,21	2014,96	2778,16	2,1395	4,4461	6,5857

Fonte: VAN WYLEN (2009)

**ANEXO B – (CONTINUAÇÃO) TABELA DAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS
DA ÁGUA**

Tabela B.1.1 (continuação)
Água saturada: tabela em função da temperatura

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m ³ /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v_f	v_g	u_f	u_{fg}	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
185	1122,7	0,001134	0,17409	784,08	1802,90	2586,98	785,36	1997,07	2782,43	2,1878	4,3586	6,5464
190	1254,4	0,001141	0,15654	806,17	1783,84	2590,01	807,61	1978,76	2786,37	2,2358	4,2720	6,5078
195	1397,8	0,001149	0,14105	828,36	1764,43	2592,79	829,96	1959,99	2789,96	2,2835	4,1863	6,4697
200	1553,8	0,001156	0,12736	850,64	1744,66	2595,29	852,43	1940,75	2793,18	2,3308	4,1014	6,4322
205	1723,0	0,001164	0,11521	873,02	1724,49	2597,52	875,03	1921,00	2796,03	2,3779	4,0172	6,3951
210	1906,3	0,001173	0,10441	895,51	1703,93	2599,44	897,75	1900,73	2798,48	2,4247	3,9337	6,3584
215	2104,2	0,001181	0,09479	918,12	1682,94	2601,06	920,61	1879,91	2800,51	2,4713	3,8507	6,3221
220	2317,8	0,001190	0,08619	940,85	1661,49	2602,35	943,61	1858,51	2802,12	2,5177	3,7683	6,2860
225	2547,7	0,001199	0,07849	963,72	1639,58	2603,30	966,77	1836,50	2803,27	2,5639	3,6863	6,2502
230	2794,9	0,001209	0,07158	986,72	1617,17	2603,89	990,10	1813,85	2803,95	2,6099	3,6047	6,2146
235	3060,1	0,001219	0,06536	1009,88	1594,24	2604,11	1013,61	1790,53	2804,13	2,6557	3,5233	6,1791
240	3344,2	0,001229	0,05976	1033,19	1570,75	2603,95	1037,31	1766,50	2803,81	2,7015	3,4422	6,1436
245	3648,2	0,001240	0,05470	1056,69	1546,68	2603,37	1061,21	1741,73	2802,95	2,7471	3,3612	6,1083
250	3973,0	0,001251	0,05013	1080,37	1522,00	2602,37	1085,34	1716,18	2801,52	2,7927	3,2802	6,0729
255	4319,5	0,001263	0,04598	1104,26	1496,66	2600,93	1109,72	1689,80	2799,51	2,8382	3,1992	6,0374
260	4688,6	0,001276	0,04220	1128,37	1470,64	2599,01	1134,35	1662,54	2796,89	2,8837	3,1181	6,0018
265	5081,3	0,001289	0,03877	1152,72	1443,87	2596,60	1159,27	1634,34	2793,61	2,9293	3,0368	5,9661
270	5498,7	0,001302	0,03564	1177,33	1416,33	2593,66	1184,49	1605,16	2789,65	2,9750	2,9551	5,9301
275	5941,8	0,001317	0,03279	1202,23	1387,94	2590,17	1210,05	1574,92	2784,97	3,0208	2,8730	5,8937
280	6411,7	0,001332	0,03017	1227,43	1358,66	2586,09	1235,97	1543,55	2779,53	3,0667	2,7903	5,8570
285	6909,4	0,001348	0,02777	1252,98	1328,41	2581,38	1262,29	1510,97	2773,27	3,1129	2,7069	5,8198
290	7436,0	0,001366	0,02557	1278,89	1297,11	2575,99	1289,04	1477,08	2766,13	3,1593	2,6227	5,7821
295	7992,8	0,001384	0,02354	1305,21	1264,67	2569,87	1316,27	1441,78	2758,05	3,2061	2,5375	5,7436
300	8581,0	0,001404	0,02167	1331,97	1230,99	2562,96	1344,01	1404,93	2748,94	3,2533	2,4511	5,7044
305	9201,8	0,001425	0,01995	1359,22	1195,94	2555,16	1372,33	1366,38	2738,72	3,3009	2,3633	5,6642
310	9856,6	0,001447	0,01835	1387,03	1159,37	2546,40	1401,29	1325,97	2727,27	3,3492	2,2737	5,6229
315	10547	0,001472	0,01687	1415,44	1121,11	2536,55	1430,97	1283,48	2714,44	3,3981	2,1821	5,5803
320	11274	0,001499	0,01549	1444,55	1080,93	2525,48	1461,45	1238,64	2700,08	3,4479	2,0882	5,5361
325	12040	0,001528	0,01420	1474,44	1038,57	2513,01	1492,84	1191,13	2683,97	3,4987	1,9913	5,4900
330	12845	0,001561	0,01300	1505,24	993,66	2498,91	1525,29	1140,56	2665,85	3,5506	1,8909	5,4416
335	13694	0,001597	0,01186	1537,11	945,77	2482,88	1558,98	1086,37	2645,35	3,6040	1,7863	5,3903
340	14586	0,001638	0,01080	1570,26	894,26	2464,53	1594,15	1027,86	2622,01	3,6593	1,6763	5,3356
345	15525	0,001685	0,00978	1605,01	838,29	2443,30	1631,17	964,02	2595,19	3,7169	1,5594	5,2763
350	16514	0,001740	0,00881	1641,81	776,58	2418,39	1670,54	893,38	2563,92	3,7776	1,4336	5,2111
355	17554	0,001807	0,00787	1681,41	707,11	2388,52	1713,13	813,59	2526,72	3,8427	1,2951	5,1378
360	18651	0,001892	0,00694	1725,19	626,29	2351,47	1760,48	720,52	2481,00	3,9146	1,1379	5,0525
365	19807	0,002011	0,00599	1776,13	526,54	2302,67	1815,96	605,44	2421,40	3,9983	0,9487	4,9470
370	21028	0,002213	0,00493	1843,84	384,69	2228,53	1890,37	441,75	2332,12	4,1104	0,6868	4,7972
374,1	22089	0,003155	0,00315	2029,58	0,00	2029,58	2099,26	0,00	2099,26	4,4297	0,0000	4,4297

Fonte: VAN WYLEN (2009)