

Eric Frederícson Ribeiro Resende

**O efeito da umidade do cavaco na geração
de vapor de uma caldeira aquatubular**

UBERLÂNDIA

2019

Eric Frederícson Ribeiro Resende

**O efeito da umidade do cavaco
na geração de vapor de uma
caldeira aquatubular**

Trabalho de Conclusão de Curso da
Engenharia de Controle e Automação da
Universidade Federal de Uberlândia - UFU -
Câmpus Santa Mônica, como requisito para
a obtenção do título de Graduação em
Engenharia de Con- trole e Automação

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Josué de Moraes

UBERLÂNDIA

2019

Resende, Eric Frederícson Ribeiro

O efeito da umidade do cavaco na geração de vapor de uma caldeira aquatubular/ **Eric Frederícson Ribeiro Resende.** - **UBERLÂNDIA, 2019**- 33 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Josué Silva de Moraes

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Faculdade de Engenharia Elétrica . **2019**.
Inclui bibliografia.

1. Cavaco de lenha 1. 2. Caldeira aquatubular 2. 2. Rendimento 3. I. Moraes, Josué Silva de. II. Universidade Federal de Uberlândia. III. Faculdade de Engenharia Elétrica. IV. Engenharia de Controle e Automação.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais e irmãos por estarem comigo nos momentos mais importantes da minha vida e por sempre terem confiança em meu sucesso.

À Universidade Federal de Uberlândia, por me proporcionar oportunidades únicas. De aprendizado, de vivência e convivência.

Aos amigos que conheci durante a graduação, que compartilharam comigo essas experiências e fizeram tudo ser mais leve.

Ao meu orientador Professor Dr. Josué de Moraes pela paciência e auxílio durante a redação desse trabalho.

*“Minha energia é o desafio,
Minha motivação é o impossível,
E é por isso que eu preciso ser,
à força e a esmo,
inabalável”,
(Augusto Branco)*

Resumo

O presente trabalho faz uma análise das propriedades físicas do cavaco de lenha, usado como combustível de alimentação de uma caldeira aquatubular de capacidade produtiva de 180 T/h.

Nele é feita uma análise do processo de combustão envolvido na transferência da energia calorífica existente na biomassa até o vapor de saída da caldeira, sendo apresentados todos os processos existentes no ambiente.

São apresentados, também, métodos para avaliação do desempenho da caldeira em função das energias de saída e de entrada, sendo esse rendimento, por fim, relacionado à umidade natural do cavaco.

Palavras-chave: Cavaco de lenha, Caldeira aquatubular, Rendimento.

Abstract

In this paper, an analysis is made of the physical properties of wood chip, used as fuel for an aquatubular boiler with the production capacity of 180 T / h.

A study of the combustion process that involves the transfer of heat energy existing in the biomass to the steam of the boiler is made, presenting all the existing processes in the environment.

Boiler performance evaluation methods are also presented as a function of the output and input energies, and this performance is finally related to the natural moisture of the wood chip.

Keywords: Wood Chip, Aquatubular Boiler, Yield.

Lista de ilustrações

Figura 1: Fluxograma de vapor do site	20
Figura 2: Tanque do processo.....	20
Figura 3: Filtro multimídia	21
Figura 4: Filtro cartucho.....	22
Figura 5: Membranas da osmose reversa	23
Figura 6: Tanque permeado	23
Figura 7: Tanque Desmi	24
Figura 8: Desaerador.....	25
Figura 9: Ciclo de ar e gases de combustão	28
Figura 10: Pátio da caldeira.....	31
Figura 11: Representação esquemática dos fluxos da caldeira – método direto	33
Figura 12: Representação esquemática dos fluxos da caldeira – método indireto.....	35
Figura 13: Gráfico representando a produção de vapor em T/h durante a realização do primeiro teste.....	38
Figura 14: Calculadora de entalpia de vapor superaquecido	40
Figura 15: Gráfico relacionando umidade x rendimento	42

Lista de tabelas

Tabela 1: Composição elementar dos diferentes tipos de combustível	15
Tabela 2: Reações básicas de combustão.....	16
Tabela 3: Dados dos testes	39
Tabela 4: Entalpia da água.....	39
Tabela 5: Resultados para taxa de evaporação	40
Tabela 6: Resultados para rendimento.....	41
Tabela 7: Umidade x rendimento	41

Sumário

1. Introdução.....	12
1.1. Justificativa	13
1.2. Objetivo.....	14
2. Referencial teórico	15
2.1. Combustão.....	15
2.2. Poder Calorífico	16
3. Metodologia	18
3.1. A caldeira	18
3.2. Teste de performance	32
4. Resultados e Discussões	37
5. Conclusão e trabalhos futuros	27
6. Referências	28

1.Introdução

A biomassa é todo recurso renovável proveniente da matéria orgânica, seja ela de origem animal ou vegetal, podendo ser utilizada para geração de energia. Através da fotossíntese, sua energia solar é convertida em energia química e armazenada na forma de matéria orgânica (ANEEL).

Há pouco mais de 100 anos atrás, a biomassa começou a perder espaço para as demais fontes de energia, primeiramente para a energia do carvão, e em seguida, com o crescimento contínuo e acelerado do uso de petróleo e gás natural, a utilização da biomassa caiu bruscamente e ficou reduzida basicamente apenas às residências particulares e indústrias em regiões agrícolas (CORTEZ et al., 2008).

Uma das principais vantagens do uso da biomassa, é que apesar de sua não tão alta eficiência energética comparado com outros combustíveis, o seu aproveitamento pode ser feito diretamente através da combustão em fornos e caldeiras. Mas, novas tecnologias estão sendo aprimoradas visando aumentar sua eficiência e a redução dos impactos ambientais, tais como a gaseificação, combustão e a pirólise (SILVA, 2009).

A geração de energia elétrica a partir da biomassa já é realidade em importantes setores e vem sendo cada vez mais comercialmente empregada. Analisando as características das fontes de energia renováveis, a biomassa vem sendo utilizada em processos modernos de alta eficiência tecnológica, dando a ela total flexibilidade para atender as necessidades tanto na produção de energia quanto para locomoção no setor de transportes (LEAL, 2005) Conforme nos orienta Leal (2005, p. 41), nas teses e dissertações: Em resumo, a biomassa dificilmente conseguirá substituir o petróleo, e muito menos todos os combustíveis fósseis, mas tem um enorme potencial de auxiliar na redução das emissões de gases de efeito estufa, no aumento da segurança energética de cada país e no aumento da oferta de empregos e renda no meio rural. A busca pela utilização da energia da biomassa, é justamente a necessidade que os países tem em buscar as energias alternativas renováveis para incrementar na suas matrizes energéticas. A grande motivação para essa mudança de postura, é a diminuição do uso dos derivados do petróleo

O cenário mundial hoje envolvendo geração de energia tende dessa forma, cada vez mais para o campo das energias renováveis, como a energia hidráulica, solar e a eólica.

Destaca-se, no entanto, o uso da biomassa.

A formação de biomassa a partir de energia solar é realizada pelo processo denominado **fotossíntese**, pelas plantas. Através da fotossíntese, as plantas que contêm **clorofila** transformam o **dióxido_de_carbono** e a **água** em materiais orgânicos com alto teor energético que, por sua vez, servem de **alimento** para os outros seres vivos. A biomassa através destes processos armazena a curto prazo a energia solar sob a forma de **hidratos de carbono**. A energia armazenada no processo fotossintético pode ser posteriormente transformada em calor, liberando novamente o dióxido de carbono e a água armazenados. Esse calor pode ser usado para mover **motores** ou esquentar água para gerar **vapor** e mover uma turbina, gerando energia elétrica.

Existe uma forte tendência dentro do meio industrial para o uso de queima da biomassa, e preferencialmente cavaco de lenha, no lugar de derivados do petróleo, como combustível para caldeiras devido tanto a fatores ambientais como de eficiência de geração de vapor.

Dessa forma, o trabalho atual objetiva mostrar o funcionamento de uma caldeira, e como as características específicas da madeira podem influenciar nos diferentes processos existentes dentro do equipamento.

1.1 Justificativa

O principal motivo da escolha do tema de estudos se deve ao fato de que meu estágio me proporciona uma oportunidade diária de absorção de conteúdo teórico e prático envolvendo o contexto estudado. Além disso, a previsão inicial é de que várias disciplinas encontradas ao longo da graduação serão aplicadas. Consigo enxergar aplicação das seguintes: Sistemas Realimentados; Sistemas de Controle Hidráulico e Pneumático; Química Tecnológica; Controle Aplicado em Automação e Processos Contínuos, Controladores Lógico Programáveis e Dispositivos Industriais.

1.2 Objetivo

- Realizar estudo teórico das propriedades do cavaco de lenha com enfoque na umidade
- Analisar o funcionamento de uma caldeira aquatubular, observando as etapas do processo produtivo que são desenvolvidas em seu espaço
- Realizar testes práticos a nível industrial de modo a analisar os efeitos das propriedades do cavaco de lenha nos parâmetros físicos da caldeira e traçar uma curva que relaciona a umidade do cavaco e o desempenho da caldeira

2. Referencial teórico

2.1 Combustão

A combustão é uma reação de oxidação na qual um determinado combustível libera a sua energia química em calor (ÇENGEL, 2013). Segundo Bizzo (2003), os principais elementos químicos que constituem um combustível são o carbono, o hidrogênio e o enxofre, aonde após reação com o oxigênio liberam calor para uso industrial.

Composição Típica dos Combustíveis

Os combustíveis podem ser encontrados nos estados sólido, líquido e gasoso. Entre os combustíveis sólidos, se destacam o carvão mineral, o carvão vegetal, o xisto, a turfa e as biomassas. Nos combustíveis líquidos se destacam a gasolina, o querosene, o diesel e os óleos combustíveis. Finalmente, nos combustíveis gasosos tem-se, entre os mais importantes, o gás natural, o GLP e o biogás (BAZZO, 1995). Cada combustível apresenta uma base elementar própria, conforme observado na Tabela 1.

Tabela 1: Composição elementar dos diferentes tipos de combustível

	C	H	O	N, S e outros
Gás Natural	~75	~25	-	-
Petróleo	84 a 86	11 à 14	0 à 3	0 à 5
Carvão Mineral	78 a 95	~7	1 a 15	1 a 5
Madeira (eucalipto)	49 a 51	~6	43 a 44	~1

Fonte: (BIZZO, 2003).

O gás de combustão liberado pelos combustíveis pode conter os seguintes

compostos: CO_2 , H_2O , SO_x e NO_x . A composição destes no gás de exaustão dependerá do teor dos elementos químicos do combustível e das condições nas quais acontece a queima do mesmo.

Análise Estequiométrica da Combustão

A partir do conhecimento das reações básicas de combustão (Tabela 2), pode-se estimar a necessidade requerida de ar para a queima do combustível. Esta quantidade também é influenciada pela análise imediata, que inclui a umidade do combustível e frações inertes ou cinzas.

Tabela 2: Reações básicas de combustão

Reagentes	Produtos	Energia Liberada
$\text{C} + \text{O}_2$	CO_2	+8100 kcal/kg C
$\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	CO	+ 2400 kcal/kg C
$2 \text{H}_2 + \text{O}_2$	$2 \text{H}_2\text{O}$	+34100 kcal/kg H_2
$\text{S} + \text{O}_2$	SO_2	+2200 kcal/kg S

Fonte: (ELETROBRÁS, 2005).

Nota-se que em cada uma das reações existe uma demanda particular de oxigênio e, em face disso, a combustão pode ser considerada “completa” quando a necessidade teórica de ar é satisfeita, obtendo-se produtos de combustão com o máximo aproveitamento térmico. A razão teórica da massa de ar requerida para a queima completa do combustível é conhecida como relação estequiométrica ar/combustível, podendo ser realizada em termos de base mássica ou molar (BAZZO, 1995).

2.2 Poder Calorífico

O valor calorífico de um combustível é a energia libertada por unidade de massa ou volume por unidade de combustível, quando o combustível é queimado completamente. O termo valor calorífico é sinônimo de poder calorífico. Unidades típicas para expressar

valor calorífico são MJ / kg em unidades SI ou Btu / lb em unidades inglesas. O valor de poder calorífico superior (PCS), refere-se a uma condição em que a água é condensada fora os produtos da combustão. Devido a esta condensação todo o poder calorífico do combustível incluindo calor sensível e calor latente são contabilizados. O poder calorífico inferior (PCI), por outro lado se refere à condição em que a água nos produtos finais da combustão permanece na forma de vapor (ou vapor), ou seja, o vapor não se condensa em água líquida e, portanto, o calor latente não é contabilizado.

3. Metodologia

Nesse capítulo serão apresentados os métodos utilizados para o teste de desempenho do cavaco, como também a caldeira aquatubular mencionada anteriormente.

3.1 A caldeira

A caldeira principal (ENGEVAP, EV-2-4500), comumente chamada de EV-200, é responsável pela total geração de vapor para o site (exceto durante as épocas de parada da mesma) e a partir do seu sistema de cogeração, é responsável também pela geração de parte da energia elétrica consumida no complexo Cargill Uberlândia. Esta energia produzida é atualmente utilizada nas fábricas do milho e do ácido cítrico, e a energia restante necessária, é proveniente da CEMIG.

Durante as paradas da caldeira EV-200, para manutenções periódicas que duram cerca de 15 dias ao ano, ou por algum imprevisto, a produção de vapor é substituída pelas demais caldeiras (ZANINI 180, CBC e Alboorg).

O principal objetivo do projeto COGEN é gerar energia elétrica para o site, o qual gera grande economia no consumo de energia proveniente da CEMIG, e ao mesmo tempo, mantém a distribuição de vapor para as fábricas.

Para garantir o sucesso do projeto, foi adquirida uma caldeira com as seguintes características, previstas em seu manual:

- Capacidade: 180 ton vapor/hora;
- Pressão: 67,0 kgf/cm²;
- Tipo: aquatubular;
- Fornalha vertical formada por paredes d'água do tipo aletada;
- Grelha plana refrigerada tipo Pin-Hole;
- Superaquecedor com dois passes de vapor e um passe de gás;
- Vapor de saída: superaquecido a 510°C;
- Combustível: cavaco de madeira ou bagaço de cana de açúcar.

Foi adquirido também um turbo-gerador para geração de energia elétrica com uma turbina de contra-pressão, acoplada a um gerador, com capacidade de gerar

25,75 MW.

Resumo do processo

Em uma caldeira comum (que não possua um sistema de cogeração de energia) o vapor produzido é SATURADO e vai direto para as fábricas, para realizar suas funções. No entanto, no caso de uma caldeira como a EV-200, que possui cogeração, este vapor tem que ser SUPERAQUECIDO, para certificar que não ocorra o arraste de umidade para a turbina. Para o vapor ser superaquecido, ele sai do tubulão (cerca de 67 kgf/cm² e 285°C) e passa pelo superaquecedor, para então ir diretamente para a turbina (ou válvula condicionadora quando não está se utilizando a turbina), com a pressão de cerca de 65 kgf/cm² e temperatura de 510° C. Na figura 1 tem-se um fluxograma geral de vapor do site.

O vapor superaquecido produzido pela caldeira, pode ser enviado para a válvula condicionadora, onde sofrerá redução de pressão para 12 kgf/cm² (posteriormente redução de 6 kgf/cm² onde for necessário), seguindo então para as fábricas. A outra opção, é este vapor sair da caldeira e ir para a turbina, onde gera energia, partindo para as fábricas por duas tubulações distintas (linha de 6 kgf/cm² no escape da turbina e linha de 12 kgf/cm² na extração da turbina). Vale ressaltar que o vapor dessas duas tubulações passam por dessuperaquecedoras, onde ocorre a injeção de água, aumentando assim a vazão, e mantendo a temperatura do vapor de modo controlado (menor que 215°C por questões de segurança, devido à temperatura de autoignição da hexana, utilizada na extração da soja).

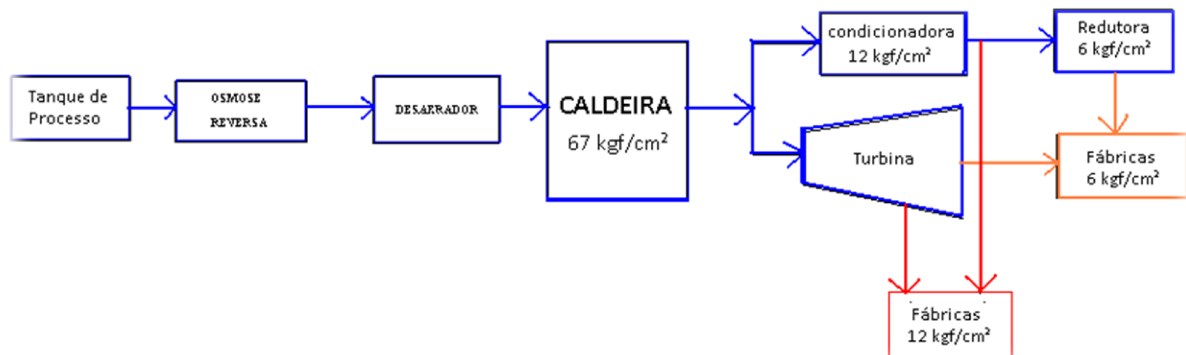
A água de alimentação passa por um processo de limpeza e desmineralização (para evitar incrustação), através do processo conhecido como Osmose Reversa, e de retirada de excesso de oxigênio dissolvido (para evitar corrosão), pelo desaerador. Essa água então passa por trocadores de calor (economizador e subcooler), para aumentar a eficiência da caldeira, e finalmente entra no tubulão da caldeira.

O cavaco usado na alimentação fica armazenado no pátio da caldeira, e através de pás carregadeiras, é levado à moega, e então transportado por um sistema de correias para o silo de armazenamento de cavaco.

3.1.1. CICLO DA ÁGUA / VAPOR

A água para ser utilizada pela caldeira, tem que ser tratada e limpa, para evitar incrustações e corrosões da caldeira. Por esse motivo, a água passa por vários processos de purificação que serão descritos a seguir:

Figura 1: Fluxograma de vapor do site



Fonte: O autor

Tanque de processo

A água deste tanque é proveniente dos 5 poços artesianos da Cargill (cerca de 60%) e o restante do DMAE.

Essa água então é bombeada para a Osmose Reversa, para realizar o seu processo de limpeza.

Figura 2: Tanque de processo



Fonte: O autor

Osmose reversa

A Osmose reversa é a etapa do processo onde a água é tratada. Dela são retiradas todas as impurezas, minérios e qualquer partícula que possa comprometer o bom funcionamento da caldeira (agentes oxidantes, encrustantes, etc.).

A osmose reversa se divide nas seguintes etapas:

Filtro multimídia

Primeiramente a água provinda do tanque de processo entra no filtro multimídia, onde são retidas as partículas maiores.

Figura 2: Filtro multimídia



Fonte: O autor

Filtro cartucho

Em seguida, a água segue para o filtro cartucho, o qual também tem a função de filtrar e retirar as partículas da água.

Figura 3: Filtro cartucho



Fonte: O autor

Membranas da osmose reversa

Após o filtro cartucho, a água é bombeada por uma bomba de alta pressão para as membranas, onde é realizada a osmose reversa.

As membranas são divididas em 2 estágios:

- No primeiro estágio (10 membranas), metade da água que atravessa o processo é mandada para o tanque de água permeada, e a outra metade (contendo os resíduos e partículas da água) segue para o segundo estágio.
- No segundo estágio (5 membranas), ocorre processo similar, onde metade desta água segue para o tanque de água permeada, e a outra metade, nesse caso, fica como rejeito.

Figura 4: Membranas da osmose reversa



Fonte: O autor

Tanque permeado

O saldo ao fim das membranas, é que cerca de 75% da água que veio do filtro cartucho segue para o tanque de permeado, e os 25% restantes, são rejeitos com grande quantidade de sais e minerais.

Vale ressaltar que, a maior parte desse rejeito, é hoje utilizada na torre de resfriamento do Amidos e Adoçantes.

A água contida no tanque permeado é então bombeada para o leito misto, onde, em contato com resinas próprias, são retirados os íons da água.

Figura 5: Tanque permeado



Fonte: O autor

Tanque DESMI

Essa água, segue para o tanque DESMI, assim conhecido, por se tratar de uma água desmineralizada.

Esse tanque possui um volume de 1000 m³. É importante salientar que como esse é o tanque que abastece a caldeira, quando o seu nível diminui, é necessário se ligar ambos os equipamentos da osmose reversa, para que o nível suba novamente.

Figura 6: Tanque Desmi



Fonte: O autor

Desaerador

A água é então bombeada do tanque DESMI para o desaerador. Este tem a função principal de retirar o oxigênio excedente da água, para evitar que ocorram corrosões no interior da caldeira.

Vale salientar que no desaerador ocorre o contato direto de vapor de 1,5 kgf/cm² com a água. Além de retirar o oxigênio, o desaerador concede grande quantidade de calor à água, a qual sai com cerca de 110°C.

Esse vapor de 1,5 kgf/cm² pode ser proveniente de 3 fontes diferentes:

- 1) Linha de 6 kgf/cm², onde passa por uma redutora e segue para o desaerador;
- 2) Escape da turbo-bomba, já saindo à pressão necessária de 1,5 kgf/cm²;
- 3) Tanques flash da área (retorno de condensado, e tanque de descarga contínua), levando esse vapor flasheado para o desaerador;

Figura 7: Desaerador



Fonte: O autor

Economizador

A água contida no desaerador, é bombeada (por uma das 3 bombas citadas abaixo) e prossegue para o trocador de calor chamado de economizador. Nele, a água ganha calor na troca por contato indireto com os gases de combustão.

Dentre as bombas utilizadas para este fim, temos as 3 abaixo:

- 1) Moto-bomba de 1200 cv – normalmente utilizada, supre a vazão normal de água para a caldeira.
- 2) Moto-bomba de 600 cv – utilizada somente quando a demanda de vapor está baixa. Quando ultrapassa cerca de 120 ton/h, esta bomba não é mais suficiente para garantir o fluxo. Vale ressaltar que ela é

utilizada quando possível (baixa vazão) por consumir menos energia que a de 1200 cv.

- 3) Turbo-bomba – é necessária, para que em caso de queda de energia, exista uma maneira segura de enviar água para a caldeira, até garantir que a mesma seja desligada de forma segura. Possui potência de 1300 cv, e ao contrário das demais que são acionadas por energia, ela é acionada pelo próprio vapor superaquecido proveniente da caldeira. Esse vapor sofre uma redução de 65 kg/cm^2 para cerca de 38 kgf/cm^2 e entra com uma temperatura de cerca de 410°C . Na saída da turbo-bomba, o vapor está com $1,5 \text{ kgf/cm}^2$ de pressão e é destinado ao desaerador.

Vale ressaltar que o economizador é uma boa medida de aumentar a eficiência da caldeira, pois provê cerca de 45°C a mais para a água na alimentação, entrando a 105°C e saindo a aproximadamente 150°C .

Subcooler

Antes de partir para o tubulão da caldeira, a água passa por mais uma etapa de troca térmica. Essa troca ocorre no subcooler, por contato indireto com o vapor provindo do tubulão superior. Nesta etapa a água de alimentação aumenta em cerca de 20°C , melhorando a eficiência da caldeira. A água provinda do economizador, passa por dentro de tubulações no subcooler, trocando calor com o vapor na parte de fora, que veio do tubulão. Parte desse vapor condensa, e é utilizado na alimentação das dessuperaquecedoras. Caso esse condensado não seja suficiente para suprir a demanda das válvulas dessuperaquecedoras, o restante é enviado pelo desaerador.

Caldeira geral

Após receber calor no subcooler, a água de alimentação entra no tubulão superior da caldeira. Neste tubulão o vapor se encontra saturado. Essa água por processo de convecção (água fria é mais densa, e desce), vai então para o tubulão inferior, por meio da ligação entre esses tubulões, chamada de feixe tubular. O tubulão inferior possui duas funções principais: descarga de fundo em um período de tempo pré-definido (atualmente a cada 3000 minutos), para retirar todo o material decantado;

e a segunda função é distribuir a água pelos downcomers (tubulações de escoamento descendente), os quais levam a água para os distribuidores, presentes por fora de cada lado da fornalha. Esses distribuidores, como o próprio nome diz, distribuem a água para as paredes d'água da caldeira. A título de curiosidade, as paredes d'água, nada mais são que tubos verticais, postos lado a lado no interior da fornalha, cobrindo as paredes laterais da fornalha.

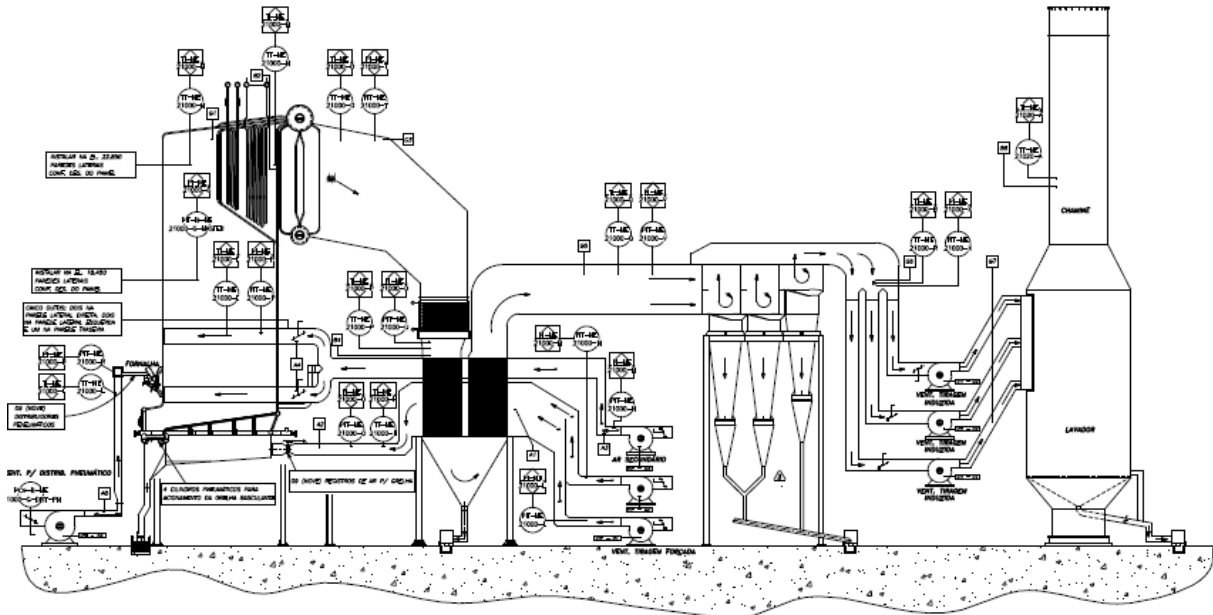
Com a queima do combustível (cavaco de madeira ou bagaço de cana) no interior da fornalha, libera-se grande quantidade de calor, que é passada para as paredes d'água principalmente por meio da irradiação térmica (ondas emitidas na combustão). A água presente na parede d'água é então aquecida, se tornando vapor saturado à uma pressão de cerca de 67 kgf/cm^2 e uma temperatura próxima de 285°C , e finalmente alcançando o tubulão superior. Após chegar ao tubulão superior, o vapor saturado passa pela serpentina de troca de calor, que está dentro da caldeira (conhecida como superaquecedor), onde ganha grande quantidade de energia, se tornando vapor superaquecido, a uma temperatura de cerca de 510°C .

Finalmente, o vapor está pronto, ou para seguir para a válvula condicionadora, onde sofrerá redução para 12 kgf/cm^2 (e outra redução para onde utilizar 6 kgf/cm^2) e ir para as fabricas, ou então para seguir direto para a turbina, gerando energia, e tendo duas saídas (uma no escape da turbina à 6 kgf/cm^2 e outra na extração da turbina à 12 kgf/cm^2) seguindo então para as fábricas.

É importante ressaltar que o superaquecedor citado é chamado de superaquecedor de 2 passes de vapor e um passe de gás, pois consiste em uma troca térmica onde os gases de combustão passam direto pelas tubulações trocando calor (1 passe), enquanto que o vapor que passa por dentro dessas tubulações possui dois estágios (2 passes), separados por uma dessuperaquecedora, que controla a temperatura desse vapor.

3.1.2. CICLO DO AR /GASES DE COMBUSTÃO

Figura 8: Ciclo de ar e gases de combustão



Fonte: Adaptado do projeto da caldeira

Ar primário

Para acontecer a combustão são necessários tanto o combustível (no caso é o cavaco de madeira ou o bagaço de cana) quanto o comburente (oxigênio presente no ar). Sem o oxigênio, a combustão se interrompe imediatamente. Dessa forma é necessário um sistema de alimentação de ar, para garantir que sempre haja oxigênio no interior da fornalha. Inclusive para garantir que a combustão seja mais completa, é importante que exista uma pequena quantidade de oxigênio em excesso (cerca de 4 a 5%). Esse ar é alimentado pela parte de baixo da fornalha, por meio de dois ventiladores primários. O ar é retirado da atmosfera à temperatura ambiente, e passa pelo pré-ar, onde troca calor por contado INDIRETO com os gases de combustão, alcançando temperaturas em cerca de 190 °C, e então parte para a fornalha. Um dos fatores importantes para o operador de caldeira controlar, é não deixar que a fumaça dos gases de combustão saia escura. Quando isso ocorre, é sinal de que não existe oxigênio suficiente para a queima daquela quantidade de combustível, tendo portanto que aumentar a quantidade de oxigênio, ou diminuir a quantidade de cavaco na

alimentação.

Ar secundário

Além dos dois ventiladores responsáveis pela alimentação do ar primário, existe também um ventilador responsável pela alimentação do ar chamado de secundário. Este passa também por dentro do pré-ar para trocar calor por contato INDIRETO com os gases de combustão, entrando à temperatura ambiente, e partindo para a fornalha à temperatura de cerca de 240 °C (temperatura maior que a do ar primário, pois ocorre a troca antes, quando a temperatura dos gases de combustão ainda estão mais elevadas). Ao contrário do ar primário que é alimentado na parte inferior da fornalha, o secundário é alimentado pelas laterais, com o principal objetivo de garantir que a queima no interior da fornalha, ocorra de forma mais HOMOGÊNEA e DISTRIBUÍDA.

Distribuidor pneumático

Esse dispositivo consiste em um ventilador, com o objetivo de distribuir melhor o CAVACO da alimentação. Ele portanto, em palavras usuais, serve para espalhar o cavaco melhor, no interior da fornalha, o que ajuda, assim como o ar secundário, a manter uma combustão mais homogênea na fornalha.

Gases de combustão

Após ocorrer a queima do combustível, são liberados os gases de combustão. Estes possuem uma temperatura muito elevada (a fornalha se encontra a cerca de 700°C), a qual pode ser aproveitada para trocas de calor por contato INDIRETO (para não ocorrer contaminação), antes de ser liberada na atmosfera pela chaminé. No caminho desses gases, ela realiza os seguintes passos:

- 1) Saída dos gases do interior da fornalha após a queima (cerca de 700 °C)
- 2) Troca de calor com o vapor no superaquecedor (sai a cerca de 515 °C)
- 3) Passa pelos feixes tubulares (sai a cerca de 380°C)
- 4) Troca de calor com a água de alimentação no economizador (sai a cerca de 280°C)

- 5) Troca de calor com o ar secundário e primário no pré-ar (sai a cerca de 165°C)
- 6) Passa pelo multiciclone para retirar cinzas dos gases (sai a cerca de 145°C)
- 7) Passa pelos exaustores e é levado ao lavador de gases, onde por contato com a névoa de água liberada pelos spray balls, ocorre limpeza final dos gases (sai a 85°C)
- 8) É liberado na atmosfera, através da chaminé.

3.1.3. CICLO DE ALIMENTAÇÃO COMBUSTÍVEL – CAVACO DE MADEIRA

Figura 9: Pátio da caldeira



Fonte: O autor

O cavaco utilizado na caldeira é comprado e recebido por meio de caminhões que são pesados para que se tenha o controle da quantidade da biomassa utilizada.

Esses caminhões são descarregados hora no pátio de cavaco hora na moega, onde, após fazer o percurso das esteiras transportadoras, é armazenado no silo de cavaco.

Algumas dessas cargas recebidas são selecionadas para que sejam recolhidas amostras para a realização de análise laboratorial.

O operador responsável faz a análise através do método NIR, no qual a umidade e o PCS da amostra são lidos e disponibilizados.

Para garantir que o cavaco seja depositado de forma uniforme no interior do silo, é utilizado um equipamento conhecido como tripper (acolpado à TC-4), o qual pode se movimentar ao longo do silo, e depositar o cavaco em suas diversas profundidades no interior do mesmo.

Para se retirar o cavaco de dentro do silo, e utilizar na alimentação da caldeira, tem-se o seguinte processo:

- Primeiramente as roscas extratoras, retiram o cavaco do silo, e depositam na correia TC-5.
- Em seguida, essa correia alimenta a chamada correia de alimentação da caldeira, TC-6.
- A TC-6 leva o cavaco até as 9 bicas injetoras, levando quantidade necessária para garantir que elas permaneçam cheias. Para auxiliar na distribuição do cavaco nas bicas, é utilizado um equipamento conhecido como redler.
- O excesso de cavaco que não entra nas bicas alimentadoras, retorna através da correia TC-7, desce através de uma bica de retorno, passa em outra moega, enfim retornando para a correia TC6.

3.2. Teste de performance

O desempenho da caldeira, medidos através de sua eficiência e de sua taxa de evaporação, pode ser reduzido com o tempo, através de um processo de combustão mal realizado, manutenções não frequentes ou ineficientes e uma operação mal sucedida. A qualidade da água e do combustível utilizados no processo também são críticos para uma boa eficiência da caldeira. Assim, para que se tenha uma noção bem estabelecida do quão distante o comportamento atual da caldeira está de sua melhor forma, é possível que sejam realizados testes de performance.

Dessa forma o teste tem dois propósitos:

1. Encontrar a eficiência da caldeira

$$\text{Sendo, } \eta = \frac{\text{Energia no vapor de saída}}{\text{Energia no combustível de entrada}} \times 100$$

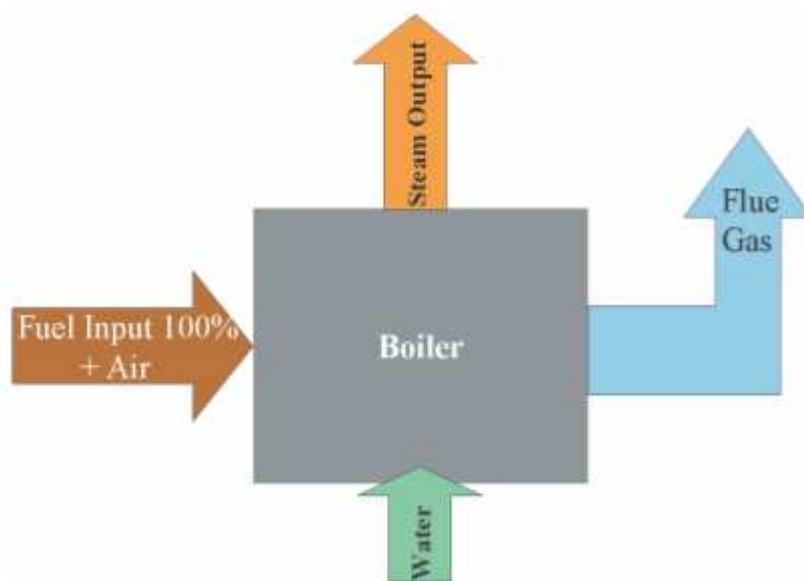
2. Encontrar a taxa de evaporação

$$\text{Taxa de evaporação} = \frac{\text{Massa de vapor gerado}}{\text{Massa do combustível consumido}}$$

Teste utilizando o método direto

Esse método é também conhecido como “método input-output” devido ao fato que é necessário apenas conhecer os parâmetros de saída (vapor) e entrada (combustível) para que seja calculada a eficiência.

Figura 10: Representação esquemática dos fluxos da caldeira – método direto



Fonte: Adapto de Bureau of Efficiency Energy

Para que seja calculada a energia na saída da caldeira, utilizaremos a vazão de saída da caldeira, a entalpia específica do vapor superaquecido na saída da caldeira, e a entalpia específica da água de alimentação:

$$\text{Energia no vapor de saída} = \text{Vazão do vapor} \times (\text{entalpia do vapor} - \text{entalpia da água de alimentação})$$

Para o cálculo da energia na entrada do processo, utilizamos a quantidade de combustível utilizado e a GCV – Gross Calorific Value, que é a taxa de energia por

unidade de massa de combustível.

Energia no combustível e entrada = *Massa do combustível x GCV*

Portanto o rendimento $\eta = \frac{\text{Vazão do vapor} \times (\text{entalpia do vapor} - \text{entalpia da água de alimentação})}{\text{Massa do combustível} \times \text{GCV}}$

Medições necessárias para o teste

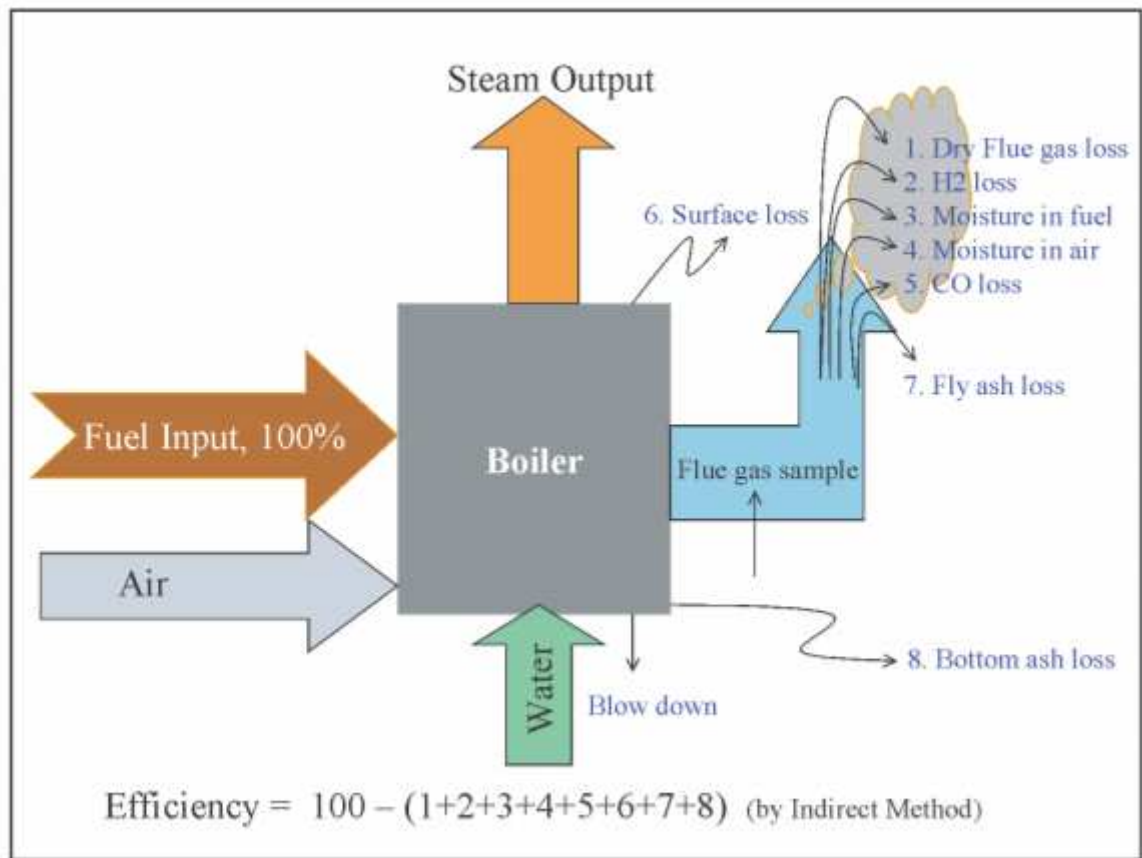
Para a energia de entrada, é necessário que se tenha conhecimento da massa do combustível e de sua taxa energética, no caso dos testes realizados nesse projeto, o combustível se trata de cavaco de lenha. Dessa forma é necessário que ele seja pesado anteriormente, e que sejam coletadas amostras da carga utilizada durante a realização do teste, para que eles sejam, então, analisadas em laboratório, sendo possível ter conhecimento do seu PCS.

Para a energia de saída é necessário que se tenha um instrumento de medição de vazão na saída da caldeira, os outros parâmetros necessários para o cálculo de energia podem ser obtidos através dos dados nominais de projeto da caldeira, ou, também através de instrumentos de medição, que foi a forma que utilizei nesse trabalho.

Teste utilizando o método indireto:

A eficiência também pode ser medida através das perdas existentes do processo da caldeira:

Figura 11: Representação esquemática dos fluxos da caldeira – método indireto



Fonte: Adaptado de Bureau of Efficiency Energy

- L1. Perda devido ao gás de combustão seco
- L2. Perda devido ao hidrogênio no combustível (H_2)
- L3. Perda devido à umidade no combustível (H_2O)
- L4. Perda devido à umidade no ar (H_2O)
- L5. Perda devido ao monóxido de carbono (CO)
- L6. Perda devido à superfície de radiação e convecção (perdas que são insignificantes e difíceis de serem medidas)
- L7. Perda devido à queima incompleta das cinzas (expelidas pela chaminé)
- L8. Perda devido à queima incompleta das cinzas (limpas nas grelhas)

Para o método indireto, rendimento $\eta = 100 - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8)$

Para a realização do método indireto os seguintes itens necessitam ser medidos:

a) Análise de gases de combustão:

1. Porcentagem de CO₂ ou O₂ no gás de combustão;
2. Porcentagem de CO no gás de combustão;
3. Temperatura dos gases de combustão

b) Medições de vazão para:

1. Combustível;
2. Vapor;
3. Água de alimentação;
4. Água condensada;
5. Ar de combustão

c) Medições de temperatura para:

1. Gás de combustão;
2. Vapor;
3. água de maquiagem;
4. Retorno condensado;
5. Ar de combustão;
6. Combustível;
7. Água de alimentação da caldeira

d) Medições de pressão para:

1. Vapor;
2. Combustível;
3. Ar de combustão, primário e secundário;
4. Draft

e) Condições da água:

1. Total de sólidos dissolvidos (TDS);
2. Ph;
3. Taxa e quantidade de blowdown.

4 Resultados e Discussões

Sendo apresentados os dois métodos para realização dos testes de desempenho, façamos algumas ponderações:

O método direto é um método mais simples de medição do desempenho da caldeira, é necessário uma quantidade bem menor de instrumentos e medidas e é mais acessível para a realização, de modo que com um passo a passo bem explicado, qualquer pessoa consegue fazer.

Entretanto é um método que não dá ideia para o executante de onde podem ser os pontos de perda de eficiência, e por não considerar várias variáveis do processo, não é um método muito preciso.

Dessa forma, o método indireto se revela o melhor método para medição da eficiência, porém para esse trabalho utilizamos o método direto devido ao número limitado de instrumentos de medição. Para o uso do método indireto seria necessário um sensor de análise de gases, e durante a realização dos testes esse instrumento apresentava falhas e foi levado para manutenção.

Dito isso, vamos aos resultados dos testes:

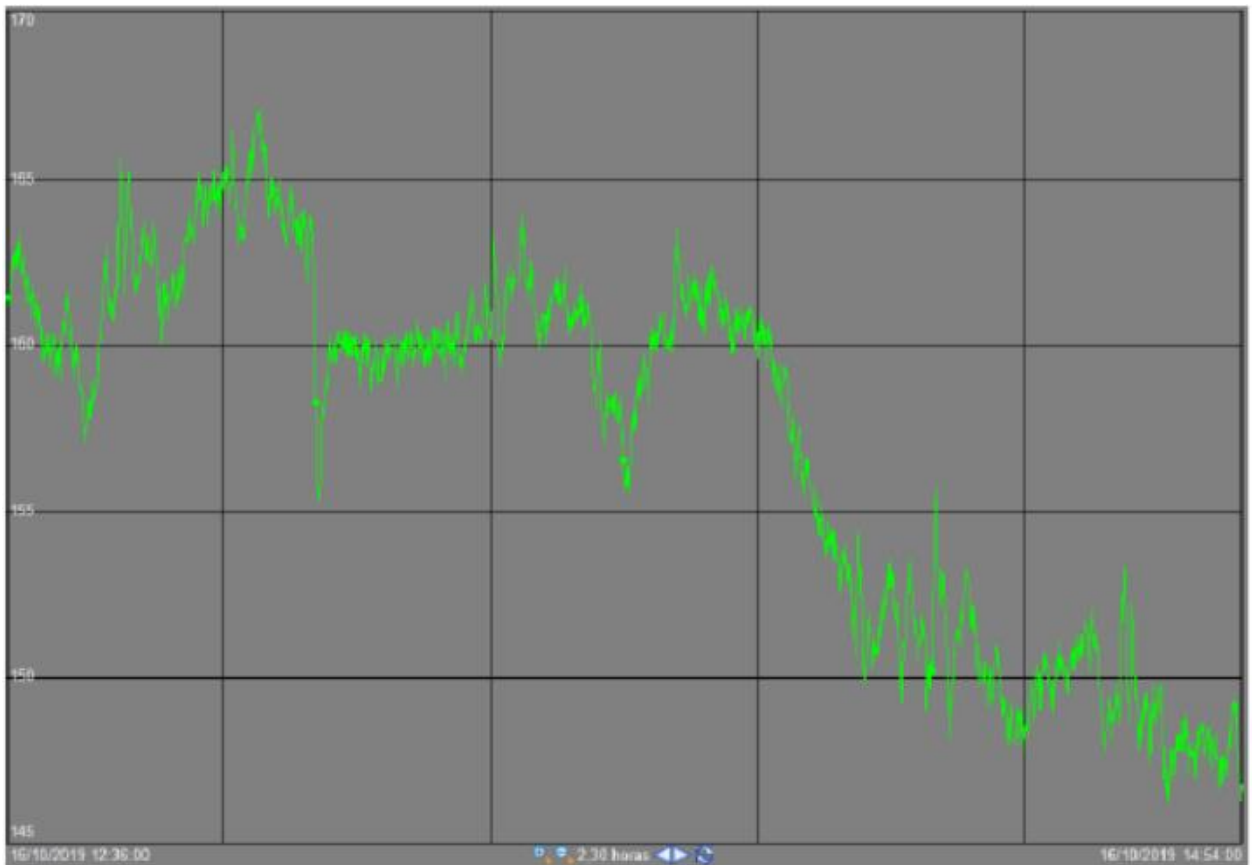
Foram realizados até o momento 4 testes de rendimento, sendo estes realizados nos dias 16 de outubro, 06 de novembro, 27 de novembro e 10 de dezembro do ano de 2019.

Para contabilização da massa utilizada de cavaco, as cargas de caminhão foram pesadas antes e depois de serem descarregados no pátio de cavaco, sendo a diferença entre as pesagens, o peso da própria carga. Foram analisadas 3 amostras de cavaco em cada teste, usando um equipamento apropriado para esse fim, esse teste revela o PCS e a umidade da biomassa.

Os outros parâmetros encontrados foram obtidos através de instrumentos instalados em campo e com o auxílio de um software: PI Processbook.

Através do PI Processbook é possível acessar o histórico de todas as variáveis dos processos existentes na planta e traçar gráficos com intervalos determinados. Segue exemplo de gráfico traçado na realização do primeiro teste, para taxa de produção de vapor:

Figura 12: Gráfico representando a produção de vapor em T/h durante a realização do primeiro teste



Fonte: PI Processbook

Usando um suplemento no Excel denominado PI DataLink, é possível realizar cálculos envolvendo essas variáveis, como pontos de máximo e mínimo, médias e totalizadores. Sendo possível, dessa forma, construir a tabela a seguir com os dados que nos interessam para os cálculos de rendimento e taxa de evaporação:

Tabela 3: Dados dos testes

Teste	1	2	3	4
Início	16/10/2019 12:36	06/11/2019 14:43	27/11/2019 08:58	10/12/2019
Fim	16/10/2019 14:54	06/11/2019 16:12	27/11/2019 11:00	10/12/2019
Duração	02:18:00	01:29:00	02:01:48	01:47:45
Total de cavaco consumido (T)	102,1	71,9	78,1	75,3
Total de Vapor Gerado (T)	362,1	254,7	319,3	242,7
Produção Média (T/h)	157,3	110,6	138,7	135,1
PCS da biomassa (MJ/KG)	15,9	13,3	14,6	13,7
Temperatura da água de alimentação	171,2	171,1	171,1	171,2
Temperatura do vapor na saída da caldeira	499,4	505,8	490,4	498,4
Pressão de vapor na saída da caldeira (Kgf/cm ²)	67,8	65,2	66,7	67,1

Fonte: O autor

Como mencionado anteriormente, para o cálculo de rendimento, é necessária a utilização da entalpia da água de alimentação e do vapor superaquecido.

A entalpia é encontrada em função de sua pressão e temperatura, dessa forma utilizamos a tabela a seguir para nos auxiliar a encontrar entalpia da água de alimentação:

Tabela 4: Entalpia da água

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
0,6113	0,01	0,001000	206,132	0	2375,3	2375,3	0,00	2501,30	2501,30	0,0000	9,1562	9,1562
1	6,98	0,001000	129,20802	29,29	2355,69	2384,98	29,29	2484,89	2514,18	0,1059	8,8697	8,9756
1,5	13,03	0,001001	87,98013	54,70	2338,63	2393,32	54,70	2470,59	2525,30	0,1956	8,6322	8,8278
2	17,50	0,001001	67,00385	73,47	2326,02	2399,48	73,47	2460,02	2533,49	0,2607	8,4629	8,7236
2,5	21,08	0,001002	54,25385	88,47	2315,93	2404,40	88,47	2451,56	2540,03	0,3120	8,3311	8,6431
3	24,08	0,001003	45,66502	101,03	2307,48	2408,51	101,03	2444,47	2545,50	0,3545	8,2231	8,5775
4	28,96	0,001004	34,80015	121,44	2293,73	2415,17	121,44	2432,93	2554,37	0,4226	8,0520	8,4746
5	32,88	0,001005	28,19251	137,79	2282,70	2420,49	137,79	2423,66	2561,45	0,4763	7,9187	8,3950
7,5	40,29	0,001008	19,23775	168,76	2261,74	2430,50	168,77	2406,02	2574,79	0,5763	7,6751	8,2514
10	45,81	0,001010	14,67355	191,79	2246,10	2437,89	191,81	2392,82	2584,63	0,6492	7,5010	8,1501
15	53,97	0,001014	10,02218	225,90	2222,83	2448,73	225,91	2373,14	2599,06	0,7548	7,2536	8,0084
20	60,06	0,001017	7,64937	251,35	2205,36	2456,71	251,38	2358,33	2609,70	0,8319	7,0766	7,9085
25	64,97	0,001020	6,20424	271,88	2191,21	2463,08	271,90	2346,29	2618,19	0,8930	6,9383	7,8313
30	69,10	0,001022	5,22918	289,18	2179,22	2468,40	289,21	2336,07	2625,28	0,9439	6,8247	7,7686
40	75,87	0,001026	3,99345	317,51	2159,49	2477,00	317,55	2319,19	2636,74	1,0258	6,6441	7,6700
50	81,33	0,001030	3,24034	340,42	2143,43	2483,85	340,47	2305,40	2645,87	1,0910	6,5029	7,5939
75	91,77	0,001037	2,21711	394,29	2112,39	2496,67	384,36	2278,59	2662,96	1,2129	6,2434	7,4563
100	99,62	0,001043	1,69400	417,33	2088,72	2506,06	417,44	2258,02	2675,46	1,3025	6,0568	7,3593
125	105,99	0,001048	1,37490	444,16	2069,32	2513,48	444,30	2241,05	2685,35	1,3739	5,9104	7,2843
150	111,37	0,001053	1,15933	466,92	2052,72	2519,64	467,08	2226,46	2693,54	1,4335	5,7897	7,2232
175	116,06	0,001057	1,00363	486,78	2038,12	2524,90	486,97	2213,57	2700,53	1,4848	5,6868	7,1717

Fonte: fundamentos da termodinâmica (2009)

Para encontrar a entalpia do vapor superaquecido foi utilizado uma calculadora disponível na seguinte URL: <https://www.tlv.com/global/BR/calculator/superheated-steam-table.html>

Figura 13: Calculadora de entalpia de vapor superaquecido

Dados de entrada

Unidades: SI(bar) ▼

Pressão do vapor: 67.1 kg/cm²G ▼

Temperatura do vapor [?]: 498.4 °C ▼

[Mostrar opções avançadas](#)

Resultado

Entalpia específica do vapor superaquecido	3411.14	kJ/kg ▼
Volume específico do vapor superaquecido	0.0504642	m³/kg ▼
Calor específico do vapor superaquecido	2.41261	kJ/kg·K ▼
Viscosidade do vapor superaquecido	0.0286754	mPa s ▼

Fonte: www.tlv.com

De posse desses dados, é possível construir a tabela com o resultado final dos teste de desempenho. Sendo:

Resultado para taxa de evaporação:

Tabela 5: Resultados para taxa de evaporação

Teste	1	2	3	4
Total de Vapor Gerado (T)	362,1	254,7	319,3	242,7
Total de cavaco consumido (T)	102,1	71,9	78,1	75,3
Taxa de evaporação	3,55	3,54	4,09	3,22

Fonte: O autor

Resultado para rendimento:

Tabela 6: Resultados para rendimento

Teste	1	2	3	4
Entalpia específica do vapor (KJ/Kg)	3412,74	3431,09	3392,28	3411,14
Entalpia da água de alimentação (KJ/kg)	487	487	487	487
Total de Vapor Gerado (T)	362,1	254,7	319,3	242,7
Total de cavaco consumido (T)	102,1	71,9	78,1	75,3
PCS da biomassa (MJ/KG)	15,9	13,3	14,6	13,7
Energia de saída (MJ)	1059410	749860	927656	709689
Energia de entrada (MJ)	1623390	956270	1140260	1031610
Rendimento	0,653	0,784	0,814	0,688
Rendimento (%)	65,3	78,4	81,4	68,8

Fonte: O autor

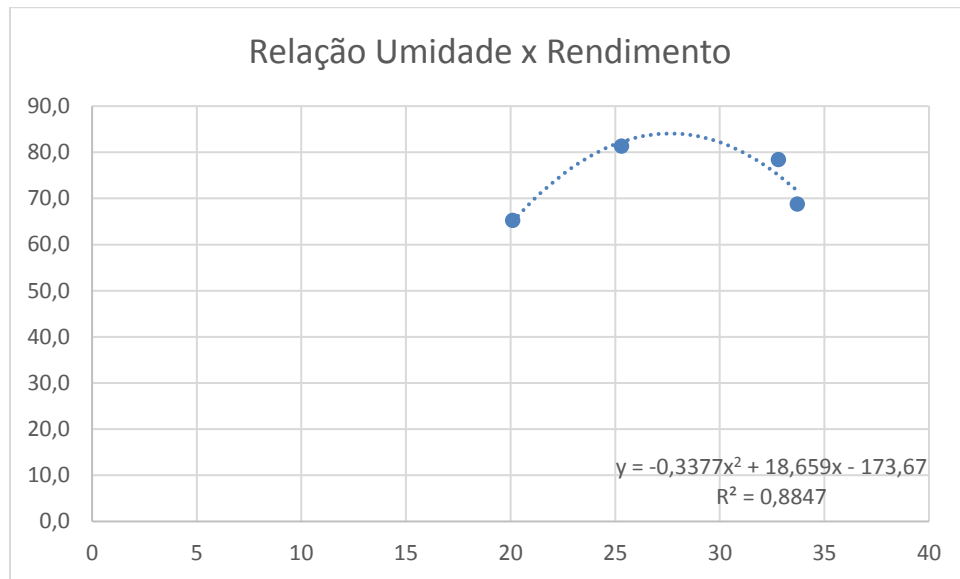
De posse desses dados, e utilizando o valor de umidade encontrado para cada teste, podemos construir uma regressão linear com a ajuda do excel, e traçar uma curva que relaciona a umidade do cavaco utilizado na alimentação com o rendimento da caldeira.

Tabela 7: Umidade x rendimento

Teste	1	2	3	4
Umidade (%)	20,1	32,8	25,3	33,7
Rendimento (%)	65,3	78,4	81,4	68,8

Fonte: O autor

Figura 14: Gráfico relacionando umidade x rendimento



Fonte: O autor

Com $R^2 = 0,8847$ temos uma curva que se aproxima dos valores amostrados. Com a equação da curva em mãos, podemos aplicar uma derivada para encontrarmos o ponto crítico da curva:

$$f'(x) = -0,6754x + 18,659$$

Igualando a derivada a 0, temos:

$$-0,6754x + 18,659 = 0$$

$$-0,6754x = -18,659$$

$$x = 27,63$$

Na equação da curva, para $x = 27,63$ temos $y = 84,07$. Sendo assim, a maior eficiência possível do sistema é de 84,07% onde ela é atingida com um cavaco que tenha umidade de 27,63%

Ressalvas a respeito dos testes serão abordadas no próximo capítulo.

5. Conclusão e trabalhos futuros

Sendo feitas essas ponderações, e analisando um trabalho como um todo, é possível dizer que de certa forma o objetivo do trabalho foi alcançado, já que foi possível estabelecer uma relação entre o rendimento da caldeira e a umidade da biomassa de alimentação.

Dito isso, são necessárias melhorias e profundidade em alguns pontos. Como mencionado anteriormente, o trabalho não levou em consideração o método indireto. Além disso, a quantidade de testes realizados foi baixa, de forma que a curva traçada ainda não está refinada a ponto de refletir de maneira adequada a relação umidade x desempenho.

Possíveis trabalhos futuros e melhorias também envolveriam o estudo da implementação de um instrumento de análise em tempo real da umidade do cavaco, ou então de vapor na saída dos gases, sendo implementada uma malha de controle que moldaria os processos da caldeira de acordo com essa umidade.

6. Referências

VAN WYLEN, Gordon John; SONNTAG, Richard Edwin; BORGNAKKE, C. Fundamentos da termodinâmica clássica. 4. ed. São Paulo: E.Blucher, 2008. iix, 589 p.

ELETROBRAS. Eficiência Energética no uso do vapor. Rio de Janeiro, 2005.

BAZZO, Edson, Geração de Vapor. 2. Ed. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 1995. 216p.: il.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14929: **Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa**. Rio de Janeiro, 2003.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis**. In: Seminário de Abastecimento Energético Industrial com Recursos Florestais, 2., 1982, São Paulo. Anais... São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 1982. p. 101 - 137.

LIMA, ABDALA e WENZEL, 2008: **Influência da Umidade no Poder Calorífico Superior da Madeira**, disponível em http://www.cnpf.embrapa.br/publica/comuntec/edicoes/com_tec220.pdf Acesso em Outubro de 2013.
Bureau of Energy Efficiency

CORTEZ; GOMEZ; LARA. **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008.

SILVA, M.J.M.; RUGGERO, P.A. **Efeitos da Utilização da Energia da Biomassa sobre o Meio Ambiente**. 2009. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br>>. Acesso em janeiro de 2017.

LEAL, Manoel. **O potencial de aproveitamento da energia da biomassa**. Campinas, v.1, n.3, p.40-41, nov. 2005.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre, RS:

AMGH, 2013. 1018 p.

BIZZO, W.A. **Apostila Geração, Distribuição e Utilização de vapor**. Unicamp, 2003.