

N. CLASS. M 662.88
CUTTER P 419 g
ANO/EDIÇÃO 2015

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA MECÂNICA
GUILHERME APARECIDO PENTO

**GERAÇÃO DE VAPOR NA INDÚSTRIA, ESTUDO DA VIABILIDADE DA
SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS PARA BIOMASSA,
COMBUSTÍVEL RENOVÁVEL.**

Varginha
2015

GUILHERME APARECIDO PENTO

**GERAÇÃO DE VAPOR NA INDÚSTRIA, ESTUDO DA VIABILIDADE DA
SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS PARA BIOMASSA,
COMBUSTÍVEL RENOVÁVEL.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Me. Luiz Carlos Vieira Guedes.

Varginha

2015

GUILHERME APARECIDO PENTO

**GERAÇÃO DE VAPOR NA INDÚSTRIA, ESTUDO DA VIABILIDADE DA
SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS PARA BIOMASSA,
COMBUSTÍVEL RENOVÁVEL.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: / /

Prof. Me. Luiz Carlos Vieira Guedes

Prof.

Prof.

OBS.:

Dedico este trabalho a minha mãe, meu pai (em memória) e em especial a minha esposa pela compreensão e incentivo, que muito contribuíram para sua conclusão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido sabedoria para a execução deste trabalho.

Ao meu orientador Alexandre de Oliveira Lopes pelos conselhos e direcionamentos.

Ao Eder Douglas de Moraes e Nádía Rios Fontoura pelo conhecimento que adquiri e adquire até hoje.

Aos amigos e colegas de turma pelo apoio durante toda a jornada do curso.

*"Enquanto os vencedores comemoram,
os perdedores se justificam."*

Roberto Shinyashiki

RESUMO

Este trabalho consiste de um estudo da viabilidade para substituição de combustível como fonte de energia na geração de vapor para indústria, substituição dos combustíveis fósseis para biomassa, energia renovável. Onde que apresenta um breve histórico do vapor, tipos de geradores de vapor, emissões de gases, características da biomassa e combustíveis fósseis.

A queima de combustíveis fósseis gera gases, CO₂, SO_x e NO_x, estes gases são prejudiciais ao planeta, já a biomassa é um combustível ecologicamente correto e renovável.

Neste estudo será comparado uma caldeira queimando gás natural x cavaco de madeira, onde que apresentaremos layout demandado para implantação, custo de investimento, consumo de combustíveis, consumo de energia elétrica e o principal, o impacto ambiental dos gases gerado pela combustão. As informações foram obtidas de uma empresa fabricante de caldeiras, localizada na cidade de Varginha-MG.

Palavras-chave: Biomassa. Gerador de Vapor.

ABSTRACT

This work consists of a study of the feasibility of fuel switching as a source of energy in steam generation for industry, replacement of fossil fuels to biomass, renewable energy. Where it presents a brief history of steam, types of steam generators, components, accessories and belongings of steam generators, gas emissions, biomass and fossil fuels characteristics.

The burning of fossil fuels produces gases, CO₂, SO_x and NO_x, these gases are harmful to the planet, since biomass is an environmentally friendly and renewable fuel.

In this study will be compared a boiler burning natural gas x wood chips, where we will present respondent layout for deployment, investment cost, fuel consumption, electric energy consumption and the principal, the impact of the gases generated by the combustion. The information was obtained from a manufacturer of boilers, located in Varginha-MG.

Keywords: Biomass. Steam Generator.

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: CONAMA nº436 / queima de Óleo.....	38
Tabela 02: CONAMA nº436 / queima de gás natural.....	38
Tabela 03: CONAMA nº436 / queima de cana de açúcar.....	39
Tabela 04: CONAMA nº436 / queima de derivados de madeira.....	39
Tabela 05: SEMA nº16 / queima de combustível gasoso, fonte nova.....	40
Tabela 06: SEMA nº16 / queima de combustível gasoso, fonte existente	520
Tabela 07: SEMA nº16 / queima de combustível líquido, fonte nova	41
Tabela 08: SEMA nº16 / queima de combustível líquido, fonte existente.....	41
Tabela 09: SEMA nº16 / queima de combustível derivado de madeira, fonte nova.....	42
Tabela 10: SEMA nº16 / queima de combustível derivado de madeira, fonte existente.....	43
Tabela 11: Equipamentos Elétricos Modelo A.....	49
Tabela 12: Equipamentos Elétricos Modelo B.....	50
Tabela 13: Formula para consumo de combustível	51
Tabela 14: Consumo de Combustível do gerador de vapor modelo A	52
Tabela 15: Consumo de Combustível do gerador de vapor modelo B	52
Tabela 16: Custo dos Equipamentos para o gerador de vapor modelo A.....	53
Tabela 17: Custo dos Equipamentos para o gerador de vapor modelo B.....	54
Tabela 18: Custo do combustível para gerador de vapor modelo A.....	55
Tabela 19: Custo do combustível para gerador de vapor modelo B.....	55
Tabela 20: Custo da Energia Elétrica para o Gerador de Vapor modelo A	56
Tabela 21: Custo da Energia Elétrica para o Gerador de Vapor modelo B.....	57
Tabela 22: Vazão dos Gases de Combustão para o Gerador de Vapor modelo A	58
Tabela 23: Vazão dos Gases de Combustão para o Gerador de Vapor modelo B	59
Tabela 24: Diferença de Custos Entre os Geradores de Vapor	59

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVO	13
3 METODOLOGIA.....	14
4 JUSTIFICATIVA	15
5 GERAÇÃO DE VAPOR.....	16
5.1 Definição e História.	16
5.2 Conceito de Caldeiras.....	21
5.3 Classificação de Caldeiras.....	22
5.4 Tipo de Caldeiras.....	22
6 COMBUSTÍVEIS	25
6.1 Definição.	25
6.2 Biomassa.	25
6.2.1 Fontes.....	26
6.2.2 Composição química.	27
6.3 Combustível fóssil, Gás natural.....	32
6.3.1 Origem.	33
6.3.2 História no brasil.....	34
6.3.3 Composição.	34
6.4 Poluição atmosférica.....	36
6.4.1 Biomassa.....	36
6.4.2 Combustíveis fosseis.	36
6.4.3 Normas ambientais.	37
6.4.3.1 Órgão nacional.....	37
6.4.3.2 Órgão regional.	39
7 INDICADORES PARA ANÁLISE DOS PRODUTOS ESTUDADOS.....	43
7.1 Layout de Implantação do Gerador de Vapor – Modelo A.....	43
7.2 Layout de Implantação do Gerador de Vapor – Modelo B.....	46
7.3 Consumo de Energia Elétrica.	48
7.4 Consumo de Energia Elétrica do Gerador de vapor – Modelo A.....	48
7.5 Consumo de Energia Elétrica do Gerador de vapor – Modelo B.....	49
7.6 Consumo de Combustível.....	50

7.7 Consumo de combustível do Gerador de vapor – Modelo A	51
7.8 Consumo de combustível do Gerador de vapor – Modelo B	52
7.9 Custo do produto.	53
7.10 Custo do produto para gerador de vapor – Modelo A.	53
7.11 Custo do produto para gerador de vapor – Modelo B.	53
7.12 Custo do combustível.....	54
7.13 Custo do combustível para gerador de vapor – Modelo A.	54
7.14 Custo do combustível para gerador de vapor – Modelo B.....	55
7.15 Custo da energia elétrica.....	56
7.16 Custo da energia elétrica para gerador de vapor – Modelo A.	56
7.17 Custo da energia elétrica para gerador de vapor – Modelo B.....	56
7.18 Emissões de gases.....	57
7.19 Emissões de Gases para gerador de vapor – Modelo A.	57
7.20 Emissões de Gases para gerador de vapor – Modelo B.....	58
8 RESULTADOS E DISCUÇÕES.....	59
8.1 Custo final do produto.....	59
8.2 Payback.....	60
8.3 Impacto Ambiental.	60
9 CONCLUSÃO.....	60
10 REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

A preocupação mundial com a redução das emissões atmosféricas, devido ao aquecimento global, é um assunto que vem sendo bastante discutido. Um parâmetro que avalia o impacto ambiental da emissão de CO₂, SO_x, NO_x.

Com o compromisso de preservar o meio ambiente, o objetivo é a redução das emissões de gases, tais como o CO₂ e a extinção do SO_x e NO_x.

A relevância neste princípio de século e de milênio, para o uso energético das biomassa.

Vive-se atualmente uma problemática marcada pelo binômio energia-meio ambiente. Por um lado, há uma crescente preocupação com o fim da era do petróleo barato, com o impacto de seus gases poluentes, que provocam o efeito estufa, e com um crescente consumo energético no mundo, aquecido ainda mais pela entrada no mercado de grandes players, com a China e a Índia. Por outro lado, as alternativas não são fáceis nem tampouco econômicas.

Mas entre as possíveis opções para reduzir a emissão de gases de efeito estufa encontra-se a biomassa. Para o Brasil, isso se reveste de uma importância maior, dado que em praticamente todo o território nacional a biomassa pode ser produzida em abundância devido ao clima tropical e o solo fértil.

No Brasil, a biomassa na definição de biomassa para a geração de energia excluem-se os tradicionais combustíveis fósseis, embora estes também sejam derivados da vida vegetal (carvão mineral) ou animal (petróleo e gás natural), mas são resultado de várias transformações que requerem milhões de anos para acontecerem. A biomassa pode considerar-se um recurso natural renovável, enquanto que os combustíveis fósseis não se renovam a curto prazo.

1 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo estudar a viabilidade da substituição dos combustíveis fósseis por biomassa, na geração de vapor na indústria. Apresentando uma análise teórica técnica e econômica sobre o assunto, descrevendo os impactos ambientais.

E por último, será analisado, as vantagens e desvantagens referente a características de cada caldeira para utilização de combustíveis fósseis e biomassa, tais como área física para implantação, consumo de energia elétrica, gastos com combustíveis, mão de obra para operação, custo do investimento para implantação da caldeira de biomassa e “payback”.

2 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho será feito através de pesquisas sobre caldeiras e combustão de combustíveis fósseis e biomassa em, livros e sites confiáveis.

Sua comprovação será através de caldeiras instaladas e onde foram coletados dados de campo.

3 JUSTIFICATIVA

Com o aquecimento global devido as emissões de gases efeito estufa e o potencial energético de biomassa que o Brasil predomina, a utilização de biomassa como fonte de energia e a redução das emissões de gases poluentes.

4 GERAÇÃO DE VAPOR

4.1 Definição e História.

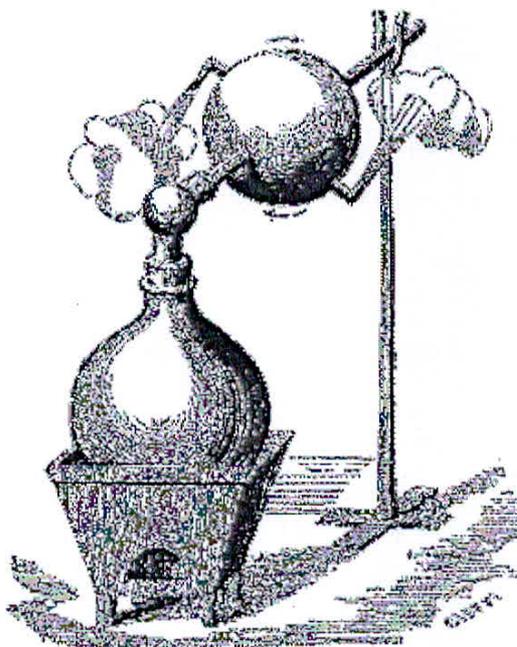
Segundo Pera (1990), *“Gerador de vapor é um trocador de calor complexo que produz vapor a partir de energia térmica (combustível), ar e fluido vaporizante, constituído por diversos equipamentos associados, perfeitamente integrados, para permitir a obtenção do maior rendimento térmico possível”*.

Segundo Oddone (2001), *“As formas de energia mais frequentes são a energia mecânica e a térmica. A energia mecânica pode ser utilizada diretamente no atendimento das necessidades de calor para o processo, ou indiretamente na produção de vapor ou na produção de frio”*.

No primeiro século da era cristã, portanto há mais de 1900 anos, um estudioso chamado Heron de Alexandria, construiu uma espécie de turbina a vapor, chamada eolípila (**Figura 1**).

Nesse engenho, enchia-se uma esfera de metal com água que produzia vapor que se expandia e fazia a esfera girar quando saía através de dois bicos, colocados em posições diametralmente opostas. Todavia, embora isso movimentasse a esfera, nenhum trabalho útil era produzido por esse movimento e o sábio não conseguiu ver nenhuma utilidade prática para seu invento.

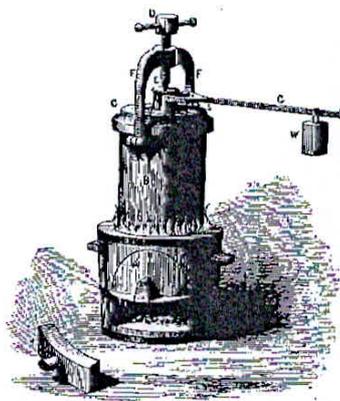
Figura 1: Ilustração da eolípila de Heron de Alexandria



Fonte: Do autor.

No século XVIII um estudioso Frances chamado Denis Papin (1647-1712), através de uma experiência feita com uma panela, onde ele percebeu que a pressão do vapor acumulado e a temperatura subiam na mesma proporção, daí surge a panela de pressão ou marmitta de Papin (Figura 2). Papin percebeu também que ao esfriar a panela na água ela formava vácuo onde havia ar, fez então um cilindro com um pistão móvel e uma haste fixa a este que chamou de êmbolo, então o êmbolo se moveu com a pressão do vapor formado, esfriou n'água e notou que este voltava à posição inicial, notou ainda que a força com que o embolo se movia era maior que a força humana, a partir daí dar-se então início há estudos e criações de geradores de vapor cada vez mais potentes (BAZZO, 1995).

Figura 2: Marmita de Pepin

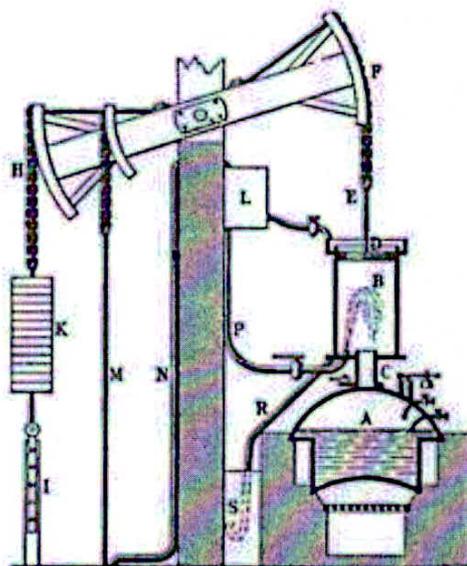


Fonte: Do autor.

Thomas Newcomen (1663 – 1729) e James Watt (1736 – 1819) aperfeiçoaram as ideias de Pepin. Em 1712 Newcomen cria seu primeiro motor, chamado motor de Newcomen, que utilizava os mesmos princípios de Pepin, mas era lento e desenvolvia apenas 5 HP, mas era suficiente para bombear as águas das minas para serem utilizadas (Figura 3).

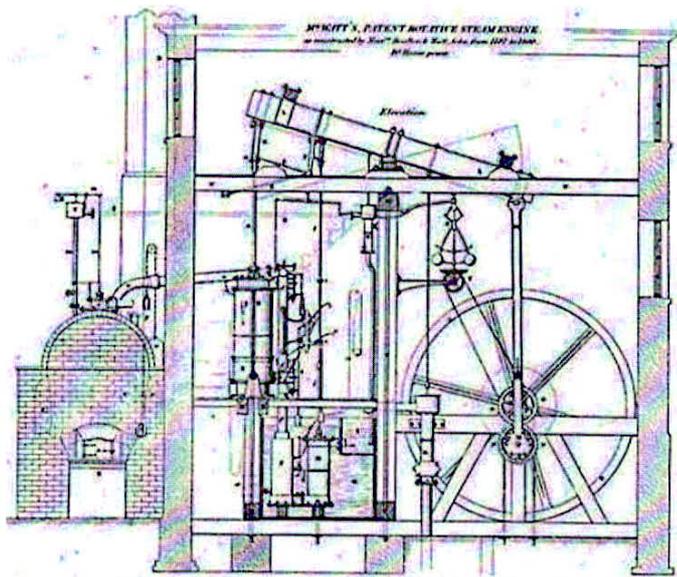
Em 1763 James Watt, já conhecido pelas suas máquinas a vapor e pelo seu bom rendimento, foi chamado para reparar uma máquina de Newcomen, Watt reparou que o arrefecimento do vapor dentro do cilindro levava ao arrefecimento desnecessário de toda a máquina, então começou estudos para melhorar a máquina e torná-la mais eficiente. A adição de uma câmara de condensação separada do pistão, evitaria as perdas de energia verificadas por meio do resfriamento do cilindro para a condensação do mesmo, melhorando a eficiência do motor, que passou a gerar 1000 HPs (BAZZO, 1995, BIZZO, 2003).

Figura 3: Máquina a vapor de Newcomen



Fonte: Do autor.

Figura 4: Máquina a vapor de James Watt



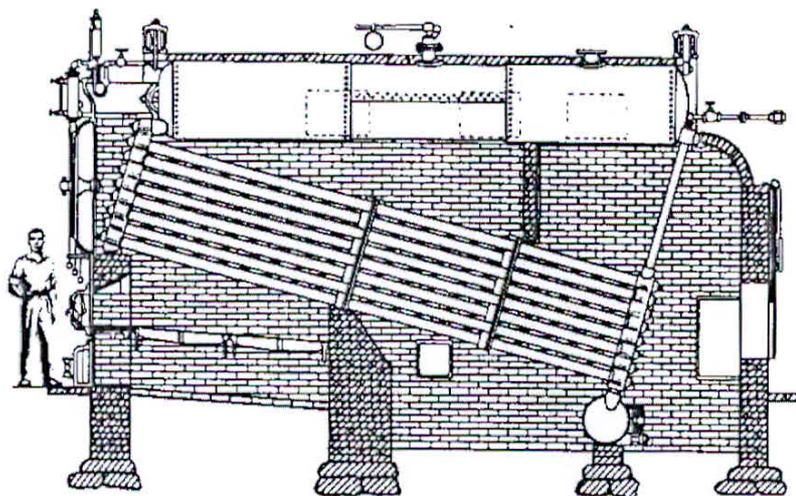
Fonte: Do autor.

Mas todos estes modelos provocaram desastrosas explosões, devido a utilização de fogo direto e ao grande acúmulo de vapor no recipiente. A ruptura do vaso causava grande liberação de energia na forma de expansão do vapor contido.

Em 1802, John Stevens (1749-1838), construiu o primeiro barco a vapor, screw-driven, onde foi desenvolvida uma das primeiras caldeiras com tubos de água. Em 1856, Stephen Wilcox (1830 - 1893) criou uma caldeira com tubos inclinados, e se associou com George Herman Babcock (1832 - 1893), melhoraram e criaram uma caldeira de tubos inclinados de alta pressão mais segura e eficiente, com essa parceria, em 1867 fundaram a *Companhia Babcock & Wilcox*, foram criadores dos mais recentes modelos de geradores de vapor, caldeira, usados até hoje. Atualmente a Babcock & Wilcox, é líder fornecimento projeto, manutenção e sistemas de energia de geração de vapor no mundo inteiro (BAZZO, 1995, BIZZO, 2003).

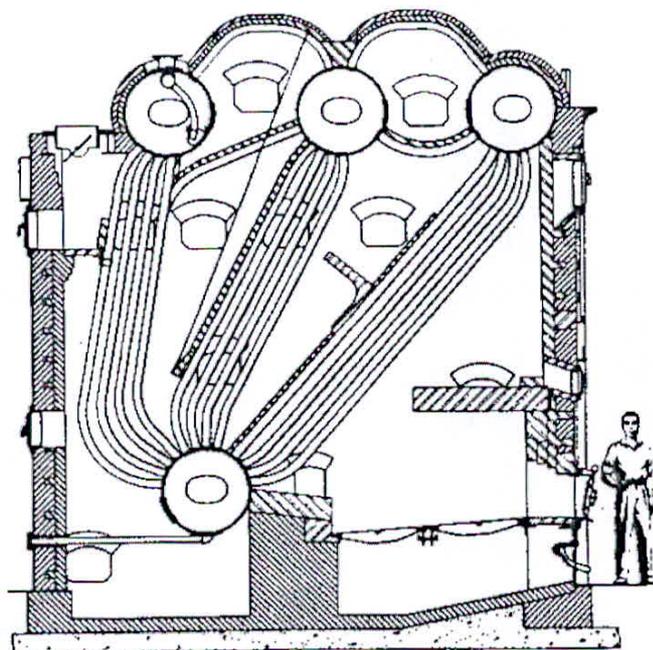
Em 1880, Alan Stirling desenvolveu uma caldeira de tubos curvados, cuja concepção básica é ainda hoje utilizada nas grandes caldeiras de tubos de água (Figura 6).

Figura 5: Caldeira de Tubos Retos, Babcock e Wilcox.



Fonte: Peres, 1982

Figura 6: Caldeira de Tubos Curvados, Stirling.



Fonte: Peres, 1982

4.2 Conceito de Caldeiras

É um equipamento que produz vapor a partir do aquecimento de um flúido vaporizante, através da queima de um combustível. De acordo com as necessidades do consumo o vapor pode ser produzido nas condições de saturação ou superaquecido. Na prática adotam-se alguns nomes, a saber (PERA, 1990):

- Caldeiras de vapor: são os geradores de vapor mais simples, queimam algum tipo de combustível como fonte geradora de calor;
- Caldeira de recuperação: são aqueles geradores que não utilizam combustíveis como fonte geradora de calor, aproveitando o calor residual de processos industriais (gás de escape de motores, gás de alto forno, de turbinas, etc.).
- Caldeiras de água quente: são aqueles em que o fluido não vaporiza, sendo o mesmo aproveitado em fase líquida (calefação, processos químicos.);

- Geradores reatores nucleares: são aqueles que produzem vapor utilizando como fonte de calor a energia liberada por combustíveis nucleares (urânio enriquecido).

4.3 Classificação de Caldeiras

A escolha do tipo de caldeira a ser utilizada se faz principalmente em função do tipo de serviço a ser executado, do tipo de combustível disponível, da capacidade de produção e de fatores de caráter econômico. De acordo com as classes de pressão, as caldeiras foram classificadas, segundo a NR-13 (Caldeiras e Vasos de Pressão – Norma NBR) em:

- Categoria A: caldeiras cuja pressão de operação é superior a 1960 kpa (19,98 kgf/cm²);
- Categoria C: caldeiras com pressão de operação igual ou inferior a 588 kpa (5,99 kgf/cm²) e volume interno igual ou inferior a 100 litros;
- Categoria B: caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores.

De acordo com o grau de automação, as caldeiras podem ser classificadas em: manual, semi-automáticas e automáticas. De acordo com o tipo de energia empregada, elas podem ser do tipo: combustível sólido, líquido, gasoso, caldeiras elétricas e caldeiras de recuperação.

Há outras formas particulares de classificação, do tipo: quanto ao tipo de montagem, circulação de água, sistema de tiragem e tipo de sustentação.

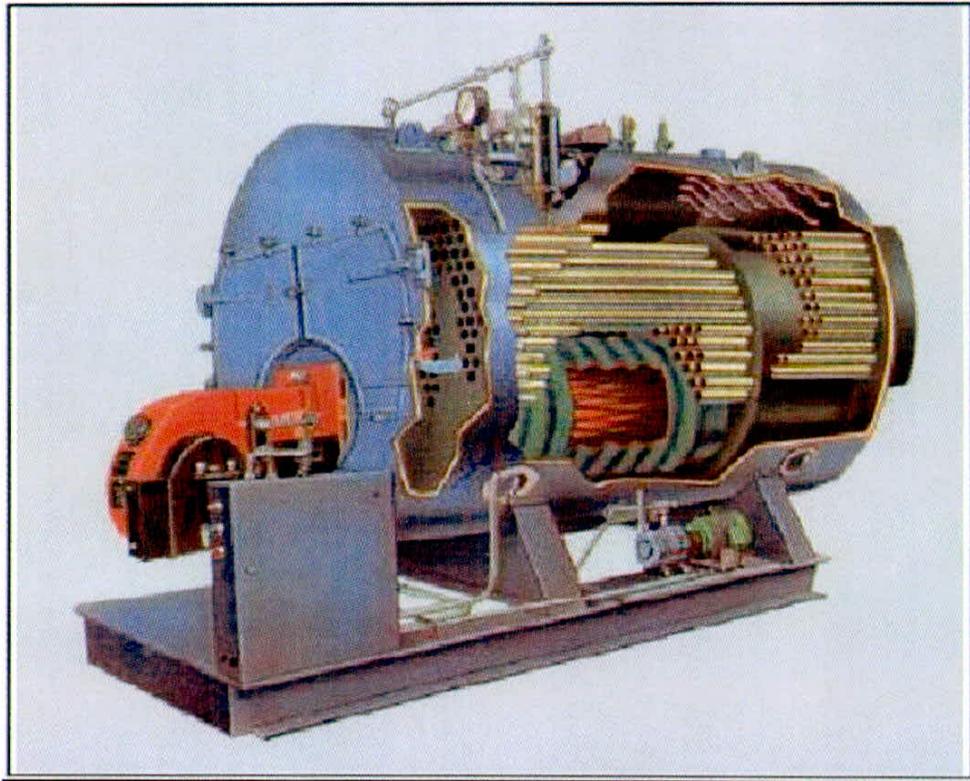
4.4 Tipo de Caldeiras

Atualmente podemos classificar as caldeiras, em dois tipos construtivos:

- **Flamotubulares ou Fogotubulares:** são aquelas onde os gases provenientes de combustão circulam em tubos, e o fluido (água) fica por fora para ser aquecido e/ou vaporizados, essas caldeiras são de menor porte, e pouco utilizadas para processos de produção de energia (Figura 7);
- **Aquatubulares:** são aquelas onde o fluido (água) circula dentro de tubos e os gases quentes circulam por fora, geralmente são caldeiras de maior porte e também conhecidas como caldeiras de parede d'água, é a mais utilizada no processo de

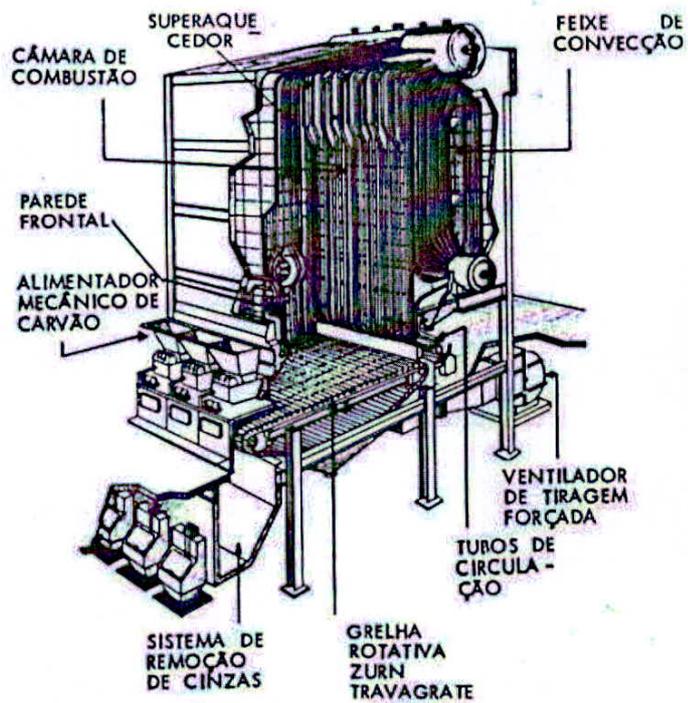
geração de eletricidade, onde se requer grandes vazões de vapor, altas pressões e altas temperaturas.

Figura 7: Caldeira Flamotubular



Fonte: Bazzo, 2005.

Figura 8: Modelo - Caldeira Aquatubular usada atualmente



Fonte: Peres, 1982.

5 COMBUSTÍVEIS

5.1 Definição.

“Combustível é toda substância, natural ou artificial, no estado sólido, líquido ou gasoso, capaz de reagir com o oxigênio do ar, mediante escorvamento, liberando energia calorífica e luminosa” (PERA, 1990).

O primeiro uso conhecido de combustível foi a combustão de madeira ou de varas pelo Homo erectus cerca de dois milhões de anos atrás. Durante a maior parte da história humana os derivados dos combustíveis foram as plantas ou gorduras animais, os únicos que eram usados pelos seres humanos. Carvão vegetal, um derivado de madeira, tem sido usada desde pelo menos 6 000 a.C. para os metais de fusão. Ele só foi suplantado pelo coque, derivado do carvão, como florestas europeias começaram a se esgotar em torno do século XVIII. Briquetes de carvão são comumente usados como combustível para cozinhar churrasco.

Entre os líquidos usados como combustível encontramos os de origem vegetal ou animal, como o álcool e o óleos vegetais de rícino e gorduras a partir do século XX surgem os combustíveis minerais, considerados fósseis, são os derivados do petróleo como óleo diesel, o querosene e a gasolina (ou nafta).

Entre os combustíveis gasosos estão o gás natural ou os GLP (Gases Liquefeitos de Petróleo), representados pelo Propano e o Butano. Gás de síntese ("gás pobre") historicamente, é empregado como alternativa em momentos de escassez de combustíveis convencionais e, é produzido a partir de matéria-prima líquida/sólida de origem fóssil ou biomassa. As gasolinas e até os gases são utilizados para os motores de combustão interna.

Os combustíveis fósseis são misturas de compostos orgânicos que se extraem do subsolo com o propósito de produzir energia por combustão. A origem desses compostos são seres vivos que morreram há milhões de anos. Consideram-se combustíveis fósseis o carvão, procedente de bosques do período carbonífero, o petróleo e o gás natural, procedente de outros organismos.

5.2 Biomassa.

Apenas há pouco mais de 100 anos a biomassa começou a perder cada vez mais sua liderança histórica para a energia do carvão, e depois, com o crescimento contínuo do petróleo

e do gás natural, a utilização da biomassa foi reduzida praticamente às residências particulares em regiões agrícolas.

Porém, hoje, em maior ou menor intensidade, a maioria dos países, sejam eles desenvolvidos ou não, está promovendo ações para as energias alternativas renováveis tenham participação significativa em suas matrizes energéticas. A motivação para essa mudança de postura é a necessidade de redução do uso de derivados do petróleo e, conseqüentemente, a dependência energética desses países em relação aos países exportadores de petróleo. Além disso, a redução no consumo dos derivados do petróleo também diminui a emissão de gases promotores do efeito estufa.

Analisando as tecnologias das fontes das fontes energéticas alternativas renováveis, já suficientemente maduras para serem empregadas comercialmente, somente a biomassa, utilizada em processos modernos com elevada eficiência tecnológica, possui a flexibilidade de suprir energéticos tanto para a produção de energia elétrica quanto para mover o setor de transportes.

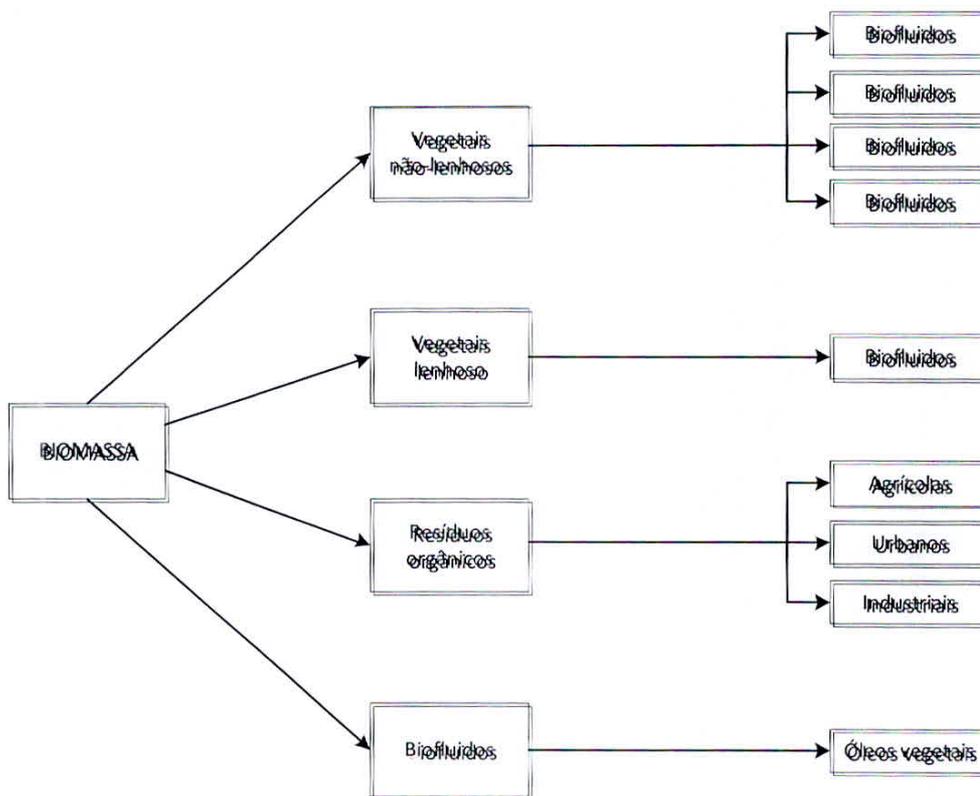
A Agência Internacional da Energia (AIE) calcula que dentro de aproximadamente 20 anos cerca de 30% do total da energia consumida pela humanidade será proveniente das fontes renováveis, que hoje representam 14% da energia produzida no mundo da energia produzida no mundo, em que a biomassa tem 11,4% na participação da oferta (Ministério de Minas e Energia - BEN).

5.2.1 Fontes.

A biomassa pode ser obtida de vegetais não-lenhosos, de vegetais lenhosos, como é o caso da madeira e seus resíduos, e também de resíduos orgânicos, nos quais encontramos os resíduos agrícolas, urbanos e industriais. Assim como também se pode obter biomassa dos biofluidos, como os óleos vegetais (por exemplo, mamona e soja).

A figura abaixo mostra um esquema das fontes de biomassa.

Figura 9: Fontes de biomassa



Fonte: Ministério de Minas e Energia, 1982

5.2.2 Composição química.

Para poder determinar a potencialidade de um combustível e, portanto, poder avaliar se este está sendo utilizado dentro de sua plena capacidade, deve-se primeiramente conhecer as suas características químicas e térmicas fundamentais, ou seja, sua composição química e seu potencial calórico. Essas características fundamentais são composição elementar, composição imediata e poder calorífico.

A composição elementar de uma amostra é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), umidade (W) e materiais residual (cinzas) (A). Determina-se utilizando a norma ASTM Standard Methods for the Ultimate Analysis of Coal and Coke, D 3176-14 (ASTM, 1983). É a característica técnica importante do combustível e constitui a base para análise dos processos de combustão, tais como cálculo dos volumes de ar, gases e entalpia, determinando o poder calorífico do combustível.

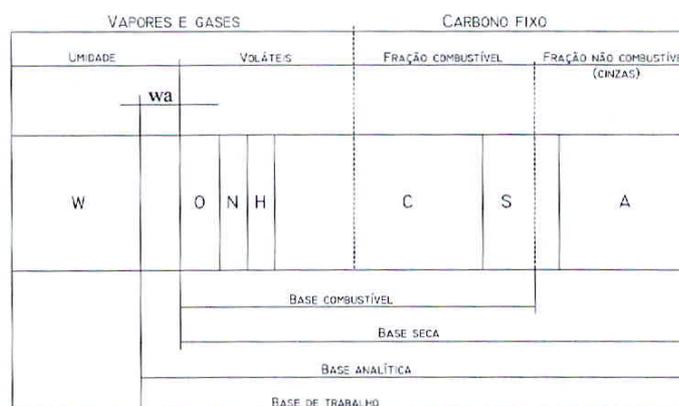
A composição imediata de uma amostra é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono fixo (F), voláteis (V), umidade (W) e cinzas (A). Determina-se utilizando as normas ASTM Standard Methods for the Ultimate Analysis of Coal and Coke, D 3172-73 a D 3175-73 (ASTM, 1983).

Os voláteis tem um papel importante durante a ignição e as etapas iniciais de combustão de biomassa.

Tanto no caso da composição elementar como no da composição imediata deve-se determinar o teor de umidade da amostra pela secagem da amostra, antes das respectivas análises. Nesta análise, coloca-se amostra até atingir peso constante em um estufa calibrada para 105 ± 4 °C, segundo o método ASTM D 3173-73 (ASTM, 1983).

Na figura 10 apresenta-se, de maneira gráfica, a relação entre a composição elementar e a composição imediata de um combustível qualquer.

Figura 10: Relação entre a composição elementar e imediata de um combustível.



Fonte: Cortez, Lora e Gómez, 2008

Os dados da composição elementar e imediata dos diferentes tipos de biomassa podem ser expressos das seguintes maneiras:

Base de trabalho (tal como se utiliza: úmido, com cinzas etc.):

$$C^t + H^t + O^t + N^t + S^t + A^t + W^t = 100\%$$

$$V^t + F^t + A^t + W^t = 100\%$$

Base analítica (tal como o combustível é analisado, sem umidade externa W^{ext}):

$$C^a + H^a + O^a + N^a + S^a + W^a = 100\%$$

$$V^a + F^a + A^a + W^a = 100\%$$

$$W^t = W^{ext} + W^a$$

Umidade externa W^{ext} é aquela que a mostra perde no trajetória até o laboratório, apenas sendo exposta ao ar ambiente de menor umidade.

Base seca (sem umidade):

$$C^s + H^s + O^s + N^s + S^s + A^s = 100\%$$

$$V^s + F^s + A^s = 100\%$$

Após ter sido colocada em uma estufa de acordo com o descrito anteriormente.

Na literatura técnica, geralmente os dados de composição elementar e imediata são apresentados em base seca, para torná-los de aplicação geral, independentemente da umidade.

Base combustível (sem umidade e sem cinzas)

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S^c = 100\%$$

$$V^c + F^c = 100\%$$

Considerando-se apenas os principais componentes a serem oxidados.

A tabela abaixo apresenta as relações entre as diversas bases. Deve-se notar que, para converter da base de trabalho para a base analítica, basta assumir que a amostra está mudando de teor de umidade, ou seja, aplicam-se as relações apresentadas pela equação $(100 - W^t/100 - W^a)$.

Figura 91: Expressões para o cálculo da composição elementar ao passar de uma base a outra.

Base do combustível que se tem como dada	Base do combustível que se deseja obter		
	de trabalho	seca	combustível
trabalho	1	$\frac{100}{100 - W^t}$	$\frac{100}{100 - W^t - A^t}$
seca	$\frac{100 - W^t}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^s}$
combustível	$\frac{100 - W^t - A^t}{100}$	$\frac{100 - A^s}{100}$	1

Fonte: Cortez, Lora e Gómez, 2008

Para converter a composição elementar e o valor calórico em base de trabalho de W^{t_1} para W^{t_2} , multiplica-se pelo fator calculado pela mesma equação:

$$100 - W^{t_2} / 100 - W^{t_1}$$

E de A^{t_1} para W^{t_2} :

$$100 - A^{t_2} / 100 - A^{t_1}$$

As tabelas 12, 13 e 14 apresentam alguns resultados de um extenso levantamento realizado por Jenkins (1.990), no qual foram obtidos dados referente às análises imediata, elementar e poder calorífico de 62 tipos de biomassa.

Figura 102: Composição elementar da biomassa.

Tipo de Biomassa	Composição elementar (%)					
	C	H	O	N	S	A
Pínus	49,25	5,99	44,36	0,06	0,03	0,30
Eucalípto	49,00	5,87	43,97	0,30	0,01	0,72
Casca de arroz	40,96	4,30	35,86	0,40	0,02	18,34
Bagaço de cana	44,80	5,35	39,55	0,38	0,01	9,79
Casca de coco	48,23	5,23	33,19	2,98	0,12	10,25
Sabugo de milho	46,58	5,87	45,46	0,47	0,01	1,40
Ramas de algodão	47,05	5,35	40,77	0,65	0,21	5,89

Fonte: Cortez, Lora e Gómez, 2008

Figura 13: Composição imediata da biomassa.

Tipo de Biomassa	Composição imediata (%)		
	V	A	F
Pínus	49,25	5,99	44,36
Eucalípto	49,00	5,87	43,97
Casca de arroz	40,96	4,30	35,86
Bagaço de cana	44,80	5,35	39,55
Casca de coco	48,23	5,23	33,19
Sabugo de milho	46,58	5,87	45,46
Ramas de algodão	47,05	5,35	40,77

Fonte: Cortez, Lora e Gómez, 2008

Figura 14: Poder calorífico superior da biomassa.

Tipo de Biomassa (PCS)	Poder calorífico superior
	(MJ/kg)
Pínus	20,02
Eucalípto	19,42
Casca de arroz	16,14
Bagaço de cana	17,33
Casca de coco	19,04
Sabugo de milho	18,77
Ramas de algodão	18,26
Resíduos sólidos urbanos	19,87
Excrementos de gado	17,36

Fonte: Cortez, Lora e Gómez, 2008

Para converter o poder calorífico superior de base seca para base de trabalho utiliza-se a seguinte equação:

$$PCS^t = PCS^s (100 - W^t)$$

Para converter da base seca para base de trabalho é necessário multiplicar o teor de cada elemento pela expressão:

$$100 - W^t / 100$$

A fórmula de Mendeliev para o cálculo do poder calorífico inferior (em kJ/kg) a partir dos dados da composição elementar do combustível é a seguinte:

$$PCI^t = 339 C^t + 1030 H^t - 109(O^t - S^t) - 24 W^t$$

5.3 Combustível fóssil, Gás natural.

O gás natural é um combustível fóssil, basicamente uma mistura de hidrocarbonetos leves, podendo estar associado ou não ao petróleo, ou seja, é composto por gases inorgânicos e hidrocarbonetos saturados, predominando o metano e, em menores quantidades, o propano e

o butano, entre outros. No estado bruto, apresenta também baixos teores de contaminantes, como o nitrogênio, o dióxido de carbono, a água e composto de enxofre. De acordo com a Lei n. 9.478/97 – Lei do petróleo, o gás natural é definido:

Gás natural é a porção do petróleo que existe na fase gasosa ou em solução no óleo, nas condições originais do reservatório, e que permanece no estado gasoso nas condições atmosféricas de pressão e temperatura.

O gás natural é, em essência, incolor e inodoro. É um combustível que, quando queimado, produz um considerável quantidade de energia. Diferentemente dos outros combustíveis fósseis, o gás natural tem uma combustão limpa, com baixa emissão no ar de subprodutos potencialmente perigosos. A necessidade da energia, particularmente pela indústria, tem elevado o gás natural a um alto grau de importância em nossa sociedade. Suas vantagens são múltiplas, tais como:

É mais leve que o ar, facilitando assim a dispersão em ambientes ventilados e minimizando o risco de incêndios e explosões;

Possui baixa massa molecular e não apresenta líquidos (condensados) que exigem critérios de purga e manutenção no sistema de manuseio e utilização;

Requer fácil adaptação das instalações existentes;

Possibilita melhor aproveitamento no uso do espaço da indústria;

Provoca menor incidência de corrosão e menor custo de manutenção;

Requer instalações de custo menor;

Tem combustão facilmente regulável.

O gás natural é um asfíxiante simples, mas pode sufocar, caso a pessoa fique muito tempo exposto.

5.3.1 Origem.

O gás natural é encontrado no subsolo, por acumulações em rochas porosas, isoladas do exterior por rochas impermeáveis, associadas ou não a depósitos petrolíferos. É o resultado da degradação anaeróbica (ausência de ar) da matéria orgânica que, em eras pré-históricas, acumulava-se nas águas litorâneas dos mares da época. Essa matéria orgânica foi soterrada a grandes profundidades e, por isso, sua degradação se deu sem contato com o ar, a grandes temperaturas e sob fortes pressões.

5.3.2 História no Brasil.

A história do gás canalizado começou no século XIX e se desenvolveu em um ritmo que pode ser considerado satisfatório até a primeira metade do século XIX, se for levada em conta a conjuntura econômica da época. A partir dos anos 1950 até a década de 1990, no entanto, o setor se estagnou, ou até mesmo regrediu, sendo que no fim desse período a distribuição se limitava aos estados do Rio de Janeiro e São Paulo. É importante ressaltar que já existiram redes de distribuição na primeira metade do século passado nas cidades de Porto Alegre, Salvador, Ouro Preto, Taubaté, Santos, Belém e Recife.

Em 1851, Irineu Evangelista de Souza, o Barão de Mauá, assinou um contrato para iluminação a gás do Rio de Janeiro, surgindo assim, de acordo com a CEG, em 1854, no Rio de Janeiro, com a denominação de companhia de iluminação a gás, mais tarde chamada de Companhia Estadual de Gás (CEG). Com a privatização, em julho de 1997, a empresa foi desmembrada em duas, a CEG e a Riogas, para o interior do estado.

Em São Paulo, a história da Companhia de gás de São Paulo (Comgás) começou oficialmente em 28 de agosto de 1872, quando a então denominada San Paulo Gas Company (empresa inglesa) recebeu a autorização do império para a prestação de serviços de distribuição de gás canalizado, de acordo com o Decreto n. 5071. Em 1974 ocorreu mudança do nome para a atual denominação companhia de gás de São Paulo. Em 14 de abril de 1999, o controle acionário da Comgás foi arrematada pelo consórcio formado pela British Gas e pela Shell, por R\$ 1,65 Bilhão. Nesse período foram utilizados para distribuição, entre outros, o gás de carvão (1872 a 1972), o gás manufaturado de nafta e, a partir de 1989, o gás natural. O processo de conversão do gás manufaturado para o gás natural ocorreu entre 1993 e 1997. Esse último evento criou as condições necessárias para o crescimento desse mercado.

Em 1996, a Petrobras assinou um contrato de compra e venda de gás natural boliviano. O volume inicial de 4 milhões de metros cúbicos/dia atingiu em 2008 a quantidade de 8,1 milhões de metros cúbicos/dias.

5.3.3 Composição.

O gás natural é uma mistura diversificada de hidrocarbonetos. A tabela 15, a seguir, ilustra a sua composição típica. O C4+ representa os elementos butano, pentano, hexano e superiores.

Figura 115: Composição típica do gás natural

Composição química	% volume
Metano	89,0
Etano	6,0
Propano	1,8
C4+	1,0
CO ₂	1,5
N ₂	0,7

Fonte: Monteiro, Silva, 2009

Figura 126: Especificação do gás natural no Brasil

Características	Unidade	Limite		
		Norte	NE	CO, SE, Sul
Poder calorífico superior	Kwh/m ³	9,47 a 10,67	9,72 a 11,94	
Índice de Wobbe	kJ/m ³	40.500 a 45.000	46.500 a 53.500	
Oxigênio, máx.	% mol	0,8	0,5	
Inertes (N ₂ + CO ₂)	% mol	18,0	8,0	6,0
CO ₂ , máx.	% mol	3,0		
Enxofre total, máx.	mg/m ³	70		
Gás Sulfídrico (H ₂ + S), máx.	mg/m ³	10	13	10
Ponto de orvalho de água a 1 atm, máx.	°C	-39	-39	-45
Ponto de orvalho de hidrocarbonetos a 4,5 Mpa, máx.	°C	15	15	0

Fonte: Monteiro, Silva, 2009

Figura 137: Valores típicos de poder calorífico do gás natural

	Base volumétrica (p = 1 atm)								Base mássica	
	Condição normal		Condição padrão ou standard							
	0 °C		15,6 °C		20,0 °C		25,0 °C			
	kJ/m ³	Kcal/m ³	kJ/m ³	Kcal/m ³	kJ/m ³	Kcal/m ³	kJ/m ³	Kcal/m ³	kJ/kg	kcal/kg
PCS	42.660	10.189	40.354	9.639	39.748	9.494	30.081	9.335	52.215	1.247
PCI	38.536	9.204	36.453	8.707	35.906	8.576	35.303	8.432	47.168	11.266

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)

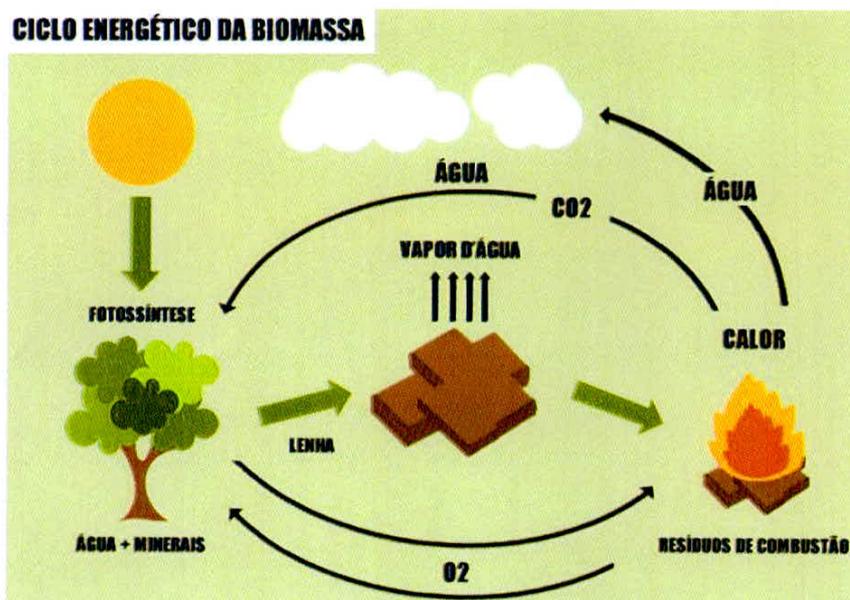
5.4 Poluição atmosférica.

5.4.1 Biomassa.

A utilização da biomassa com fins industriais e com combustível tem provocado o desmatamento de vastas zonas do planeta. Isso tem um efeito global que constitui um das causas do incremento do teor de CO₂ na atmosfera e, conseqüentemente, do efeito estufa.

“O uso da biomassa como combustível não incrementa o teor de CO₂ na atmosfera, já que este é produzido durante a combustão equilibrando-se com o CO₂ consumido ou sequestrado durante a fotossíntese. A figura x ilustra o ciclo de CO₂ durante a utilização da biomassa como combustível.” (Cortez, Lora e Gómez, 2008)

Figura 148: Ciclo energético da biomassa.



Fonte: Autor

5.4.2 Combustíveis fósseis.

Os poluentes atmosféricos podem ser diferentemente emitidos pelas fontes e também ser formados na atmosfera por reações químicas entre estes e os constituintes normais do ar.

Os combustíveis fósseis ao serem liberados e queimados produzem óxidos, tais como carbono, nitrogênio e enxofre, que são prejudiciais à saúde de todo ser vivo.

Os poluentes são:

Materiais particulados;

Óxido de enxofre (SO₂ e SO₃)

Monóxido de carbono (CO)

Dióxido de carbono (CO₂)

Óxidos de nitrogênio (NO, N₂O e NO₂)

Gases sulfatos (SO), sua presença no ar pode ser responsável por uma série de distúrbios fisiológicos dos seres vivos. A inalação de SO₂, um dos mais frequentes contaminantes atmosféricos, mesmo em concentrações muito baixas, provoca espasmos dos músculos lisos dos bronquíolos pulmonares.

Óxido de nitrogênio (NO_x) são altamente tóxicos, provocando também dificuldades respiratórias ao passar do limite de 0,5 ppm. Uma exposição drástica ao NO₂ reduz a capacidade de oxigenação dos pulmões, provocando irritação das mucosas, enfisema pulmonar etc. Sobre os vegetais, os NO agem como inibidores da fotossíntese e podem também provocar lesões nas folhas.

Monóxido de carbono (CO) é produzido quando a combustão do carbono é incompleta. O CO é um gás altamente tóxico, quando inalado, sua molécula bloqueia irremediavelmente a hemoglobina, impedindo o transporte do oxigênio até o sangue, o que pode provocar danos fatais aos organismos vivos.

Dióxido de carbono (CO₂) é componente natural do ar e o principal gás do “efeito estufa”. A queima de combustíveis fósseis tem incrementado o teor de CO₂.

Material particulado, trata-se do conjunto de poluentes constituído por poeiras, fumaças e todo o tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera em função do seu tamanho reduzido.

5.4.3 Normas ambientais.

5.4.3.1 Órgão nacional.

CONAMA, resolução nº 436, de 22 de dezembro de 2011 estabelece os limites máximos de emissões de poluentes atmosféricos para fontes fixas no território Brasileiro.

A partir da combustão externa de óleo combustível

Ficam definidos os limites máximos de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão externa de óleo combustível para fontes instaladas ou com licença de instalação requerida antes de 2 de janeiro de 2007.

Tabela 01: CONAMA nº436 / queima de Óleo.

Potência térmica nominal (MW)	MP	NO _x (como NO ₂)	SO _x (como SO ₂)
MW < 10	300	1600	2700
10 ≤ MW ≤ 70	250	1000	2700
MW > 70	100	1000	1800

Fonte: CONAMA,2011

A partir da combustão externa de gás natural

Ficam definidos os limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor originalmente projetados para combustão externa de gás natural para fontes instaladas ou com licença de instalação requerida antes de 2 de janeiro de 2007.

Tabela 02: CONAMA nº436 / queima de gás natural.

Potência térmica nominal (MW)	NO _x (como NO ₂)
MW < 10	NA
10 ≤ MW ≤ 70	400
MW > 70	320

Fonte: CONAMA,2011

A partir da combustão externa de biomassa de cana-de-açúcar.

Ficam definidos os limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor, a partir da combustão de biomassa de cana-de-açúcar, para fontes instaladas ou com licença de instalação requerida antes de 2 de janeiro de 2007

Tabela 03: CONAMA nº436 / queima de cana de açúcar.

Potência térmica nominal (MW)	MP	NO _x (como NO ₂)
MW < 50	520	NA
50 ≤ MW ≤ 100	450	350
MW > 100	390	350

Fonte: CONAMA,2011

A partir da combustão externa de derivados da madeira.

Ficam definidos os limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor, a partir da combustão externa de derivados de madeira para as fontes instaladas ou com licença de instalação, requerida antes de 2 de janeiro de 2007.

Tabela 04: CONAMA nº436 / queima de derivados de madeira.

Potência térmica nominal (MW)	MP	NO _x (como NO ₂)
MW < 10	730	NA
10 ≤ MW ≤ 50	520	650
MW > 50	300	650

Fonte: CONAMA,2011

5.4.3.2 Órgão regional.

SEMA, resolução nº 16/2014 estabelece os limites máximos de emissões de poluentes atmosféricos para fontes fixas para o estado do Paraná.

Geração de calor ou energia utilizando combustível gasoso com exceção de fornos de padarias e pizzarias:

Padrões para fontes novas de combustão externa:

Tabela 05: SEMA nº16 / queima de combustível gasoso, fonte nova.

Potência Térmica Nominal MW	MP-total mg/Nm ³	CO mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	SO _x mg/Nm ³	Automonitoramento – Amostragem	
					Parâmetros	Frequência
Até 10	150 ¹⁾	500 ²⁾ 80 ³⁾	320	70 ¹⁾	MP-total ¹⁾ , CO, NO _x , SO _x ¹⁾ e O ₂	Semestral
Entre 10 e 50	125 ¹⁾	100 ²⁾ 80 ³⁾	320	70 ¹⁾		
Entre 50 e 70	50 ¹⁾	100 ²⁾ 80 ³⁾	320	70 ¹⁾		
Entre 70 e 100	50 ¹⁾	100 ²⁾ 80 ³⁾	200	70 ¹⁾		
Acima de 100	50 ¹⁾	100 ²⁾ 80 ³⁾	200	70 ¹⁾	MP-total ¹⁾ , SO _x ¹⁾ e O ₂	Semestral
					CO, NO _x e O ₂	Contínuo

Notas: 1) somente gás de refinaria, gás de xisto e gás de gaseificação de resíduos

2) válido até 25/12/2018

3) válido a partir de 26/12/2018

Fonte: SEMA, 2014.

Padrões para fontes existentes de combustão externa:

Tabela 06: SEMA nº16 / queima de combustível gasoso, fonte existente.

Potência Térmica Nominal MW	MP-total mg/Nm ³	CO mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	SO _x mg/Nm ³	Automonitoramento – Amostragem	
					Parâmetros	Frequência
Até 10	150 ¹⁾	500 ²⁾ 80 ^{3,4)}	400 ^{3,4)}	70 ^{1,5)}	MP-total ¹⁾ , CO, NO _x , SO _x ¹⁾ e O ₂	Semestral
Entre 10 e 50	125 ¹⁾	100 ²⁾ 80 ⁴⁾	400 ⁴⁾	70 ^{1,5)}		
Entre 50 e 70	50 ¹⁾	100 ²⁾ 80 ⁴⁾	320	70 ^{1,5)}		
Entre 70 e 100	50 ¹⁾	100 ²⁾ 80 ⁴⁾	320	70 ^{1,5)}		
Acima de 100	50 ¹⁾	100 ²⁾ 80 ⁴⁾	200	70 ^{1,5)}	MP-total ¹⁾ , SO _x ¹⁾ e O ₂	Semestral
					CO, NO _x e O ₂	Contínuo

Notas: 1) somente gás de refinaria, gás de xisto e gás de gaseificação de resíduos

2) válido até 25/12/2018

3) para a queima de gás natural ou GLP o órgão ambiental licenciador pode aceitar apenas o atendimento de CO ou apenas de NO_x

4) válido a partir de 26/12/2018

5) válido a partir de 26/12/2021

Fonte: SEMA, 2014.

Geração de calor ou energia utilizando combustível líquido mineral, vegetal ou animal e semelhantes:

Padrões para fontes novas de combustão externa:

Tabela 07: SEMA nº16 / queima de combustível líquido, fonte nova.

Potência Térmica Nominal MW	Densidade calorimétrica	MP-total mg/Nm ³	CO mg/Nm ³	NO _x		SO _x mg/Nm ³	Automonitoramento Amostragem	
				óleo até 1,0% N ¹⁾ mg/Nm ³	óleo acima de 1,0% N ¹⁾ mg/Nm ³		Parâmetros	Frequência
Até 10	20% equivalente ao Padrão 1 da Escala Ringelmann ²⁾	300	500 80 ³⁾	1.600	1.600	2.700	MP-total, CO, NO _x , SO _x e O ₂	Semestral
Entre 10 e 50		250	250	820	820 · (0,4+0,6N) ⁴⁾	1.800		
Entre 50 e 100		100	250	620	620 · (0,4+0,6N) ⁴⁾	1.800		
Acima de 100		75	175	620	620 · (0,4+0,6N) ⁴⁾	1.800	MP-total, CO, NO _x , SO _x e O ₂	Contínuo
		Ni: 1,0 V: 5,0					MP-inorgânico	Semestral

Notas: 1) % gravimétrico

2) exceto nas operações de aquecimento, modulação e ramagem, por um período que totalize 10 minutos, ao longo das 24 horas do dia

3) para a queima de óleo combustível o órgão ambiental licenciador pode aceitar apenas o atendimento de CO de 80 mg/Nm³

4) valor máximo independente do teor de N: 1000 mg/Nm³

Fonte: SEMA, 2014.

Padrões para fontes existentes de combustão externa:

Tabela 08: SEMA nº16 / queima de combustível líquido, fonte existente.

Potência Térmica Nominal MW	Densidade calorimétrica	MP-total mg/Nm ³	CO mg/Nm ³	NO _x		SO _x mg/Nm ³	Automonitoramento Amostragem	
				óleo até 1,0% N ¹⁾ mg/Nm ³	óleo acima de 1,0% N ¹⁾ mg/Nm ³		Parâmetros	Frequência
Até 10	20% equivalente ao Padrão 1 da Escala Ringelmann ²⁾	300 ³⁾	500 80 ⁴⁾	1.600 ³⁾	1.600 ³⁾	2.700 ³⁾	MP-total, CO, NO _x , SO _x e O ₂	Semestral
Entre 10 e 50		250	250	820	820 · (0,4+0,6N) ⁵⁾	1.800		
Entre 50 e 100		100	250	620	620 · (0,4+0,6N) ⁵⁾	1.800		
Acima de 100		75	175	620	620 · (0,4+0,6N) ⁵⁾	1.800	MP-total, CO, NO _x , SO _x e O ₂	Contínuo
		Ni: 1,0 V: 5,0					MP-inorgânico	Semestral

Notas: 1) % gravimétrico

2) exceto nas operações de aquecimento, modulação e ramagem, por um período que totalize 10 minutos, ao longo das 24 horas do dia

3) válido a partir de 26/12/2016

4) para a queima de gás natural ou GLP o órgão ambiental licenciador pode aceitar apenas o atendimento de CO de 80 mg/Nm³

5) a partir de 26/12/2016: valor máximo independente do teor de N: 1000 mg/Nm³

Fonte: SEMA, 2014.

Geração de calor ou energia utilizando derivados de madeira como combustível com exceção de fornos de pão, pizza a lenha e churrasqueiras:

Padrões para fontes novas de combustão externa:

Tabela 09: SEMA nº16 / queima de combustível derivado de madeira, fonte nova.

Potência Térmica Nominal MW	Densidade colorimétrica	MP-total mg/Nm ³	CO ⁴⁾ mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	SO _x mg/Nm ³	Automonitoramento – Amostragem	
						Parâmetros	Frequência
Até 0,05	20% equivalente ao Padrão 1 da Escala Ringelmann ²⁾	560 ¹⁾	5.000 ¹⁾	NA	NA	CO ou MP-total, O ₂	Anual
Entre 0,05 e 0,15		560 ¹⁾	2.500 ¹⁾	NA	NA		Anual
Entre 0,15 e 1,0		560 ¹⁾	1.300 ¹⁾	NA	NA		Anual
Entre 1,0 e 10		560 ¹⁾	1.000 ¹⁾	NA	NA		Semestral
Entre 10 e 30		400	2.000 ⁵⁾ 1.000 ³⁾	500	NA	MP-total, CO, NO _x e O ₂	Semestral
Entre 30 e 50		200	2.000 ⁵⁾ 1.000 ³⁾	500	NA		Semestral
Entre 50 e 70		200	1.000	500	NA		Semestral
Entre 70 e 100		100	1.000	500	NA		Semestral
Acima de 100		100	500	500	NA	Contínuo	

Notas: 1) Na faixa até 10 MW, o controle das emissões poderá ser comprovado através do atendimento ao padrão de MP-total ou atendimento ao padrão de CO a critério do órgão ambiental licenciador;
2) exceto nas operações de aquecimento, modulação e ramonagem, por um período que totalize 10 minutos, ao longo das 24 horas do dia;
3) válido a partir de 26/12/2016;
4) padrões de CO aplicáveis para operação de plena carga;
5) válido até 25/12/2016.
NA: Não aplicável

Fonte: SEMA, 2014.

Padrões para fontes existentes de combustão externa:

Tabela 10: SEMA nº16 / queima de combustível derivado de madeira, fonte existente.

Potência Térmica Nominal MW	Densidade colorimétrica	MP-total mg/Nm ³	CO ³⁾ mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	SO _x mg/Nm ³	Automonitoramento Amostragem	
						Parâmetros	Frequência
Até 0,5	20% equivalente ao Padrão 1 da Escala Ringelmann ²⁾	560 ¹⁾	6.000 ¹⁾	NA	NA	CO ou MP-total, O ₂	Anual
Entre 0,5 e 2,0		560 ¹⁾	3.000 ¹⁾	NA	NA		Anual
Entre 2,0 e 10		560 ¹⁾	2.500 ¹⁾	NA	NA		Semestral
Entre 10 e 50		400	2.000	500	NA	MP-total, CO, NO _x e O ₂	Semestral
Entre 50 e 100		200	1.000	500	NA		Semestral
Acima de 100		100	500	500	NA		Contínuo

Notas: 1) Na faixa até 10 MW, o controle das emissões poderá ser comprovado através do atendimento ao padrão de MP-total ou atendimento ao padrão de CO a critério do órgão ambiental licenciador e definido no Programa de Automonitoramento.

2) exceto nas operações de aquecimento, modulação e ramonagem, por um período que totalize 10 minutos, ao longo das 24 horas do dia.

3) padrões de CO aplicáveis para operação de plena carga

NA: Não aplicável

Fonte: SEMA, 2014.

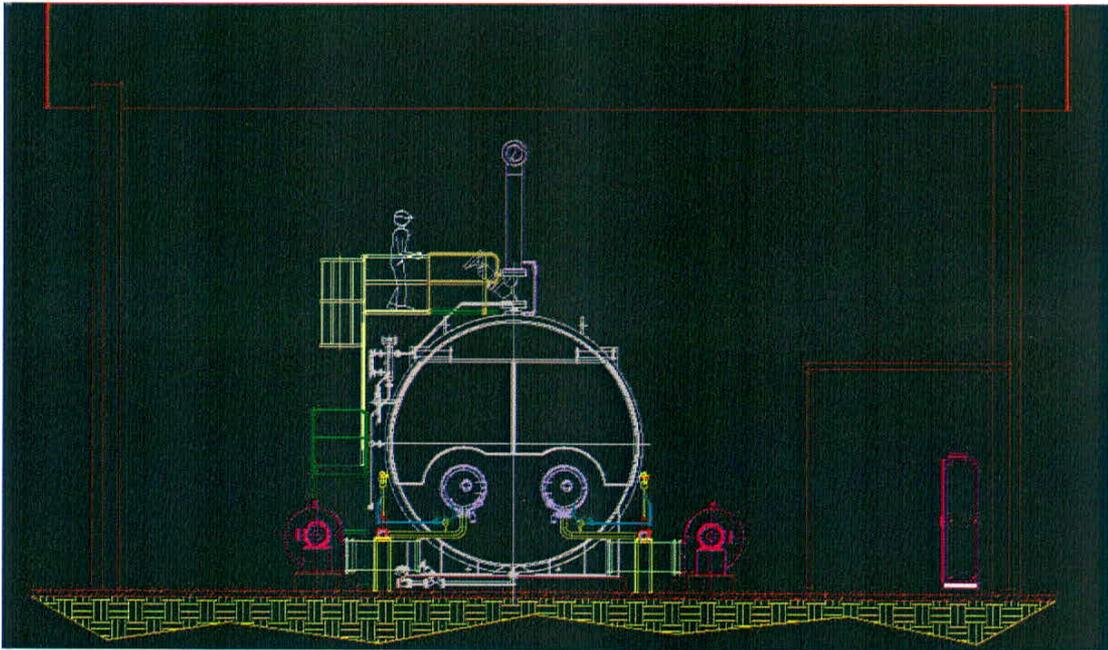
6 INDICADORES PARA ANÁLISE DOS PRODUTOS ESTUDADOS.

Neste estudo será analisado a viabilidade da substituição do combustível gás natural para cavaco de madeira (biomassa), onde que o equipamento é uma gerador de vapor de 30 tonelada de vapor por hora, PO de 12 Kgf/cm²(g) e PMTA de 14 Kgf/cm²(g), e sua instalação é existente, uma cervejaria localizada no estado do PARANÁ, onde que todas as informações necessárias para este estudo foi coletado de uma empresa fabricante de caldeira localizado na cidade de Varginha-MG.

6.1 Layout de Implantação do Gerador de Vapor – Modelo A.

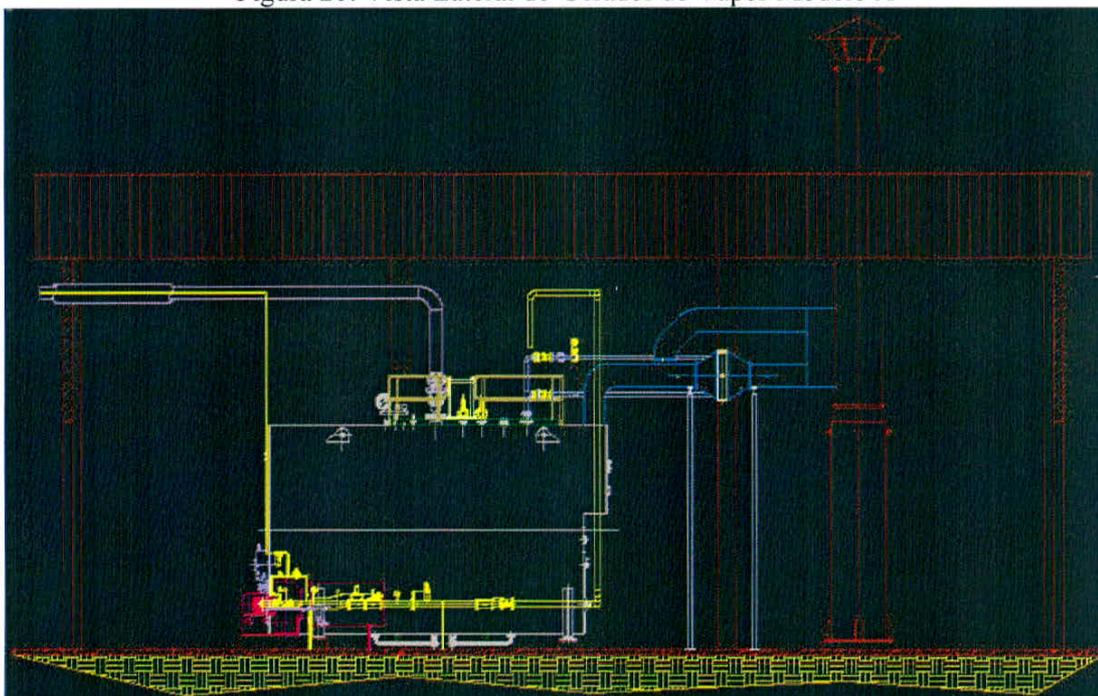
Para o Modelo A, caldeira tipo flamotubular para queima de gás natural, a casa de caldeira é menor, pois não requer de muitos equipamentos, este layout requer um área de 22 x 16m.

Figura 159: Vista Frontal do Gerador de Vapor Modelo A



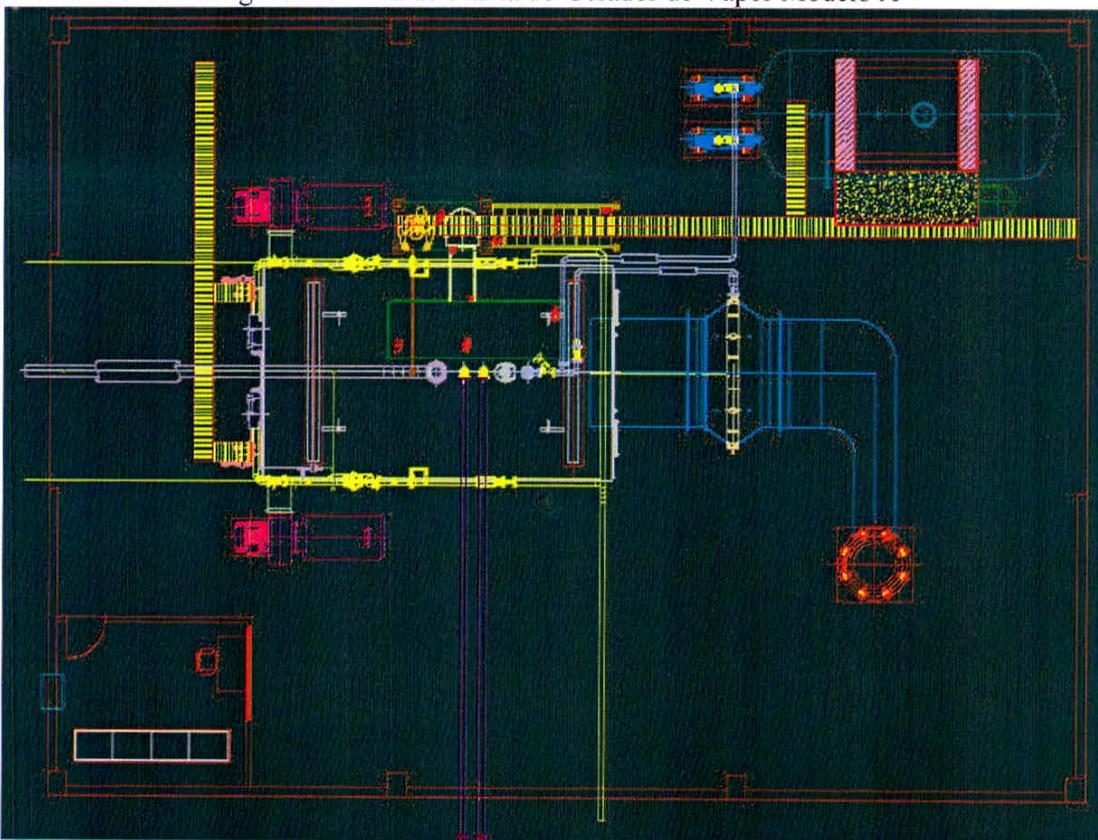
Fonte: A Empresa Pesquisada.

Figura 20: Vista Lateral do Gerador de Vapor Modelo A



Fonte: A Empresa Pesquisada

Figura 21: Vista de Planta do Gerador de Vapor Modelo A



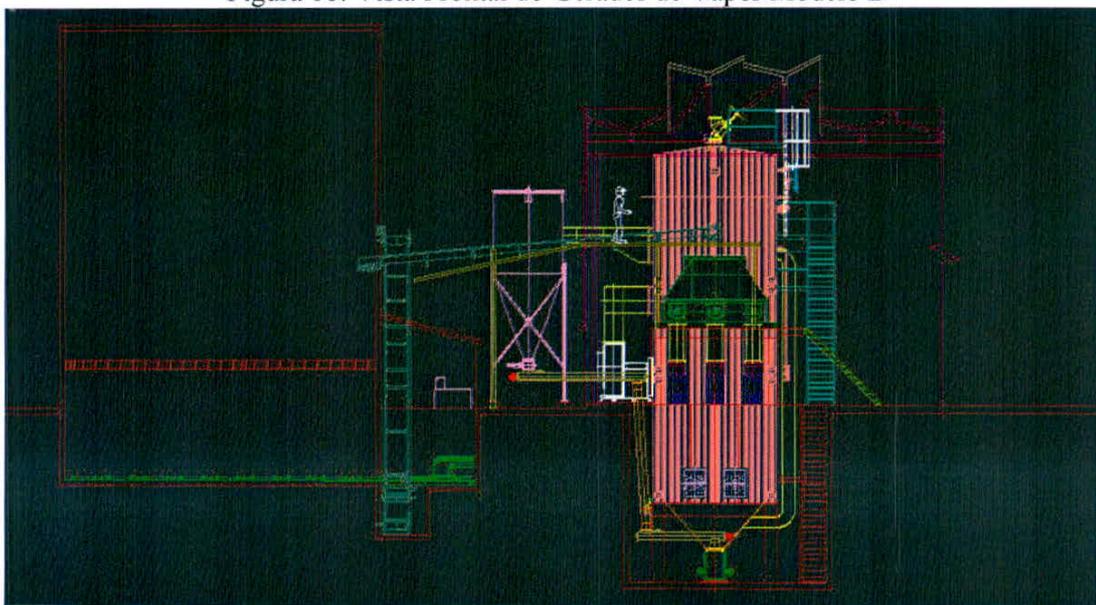
Fonte: A Empresa Pesquisada

As figuras 19, 20 e 21 demonstra a área necessária para implantação do gerador de vapor modelo A, contemplando caldeira, dois queimadores, dois ventiladores de tiragem forçada, duas rampa de gás, economizador, dutos de gases, chaminé e painel elétrico.

6.2 Layout de Implantação do Gerador de Vapor – Modelo B.

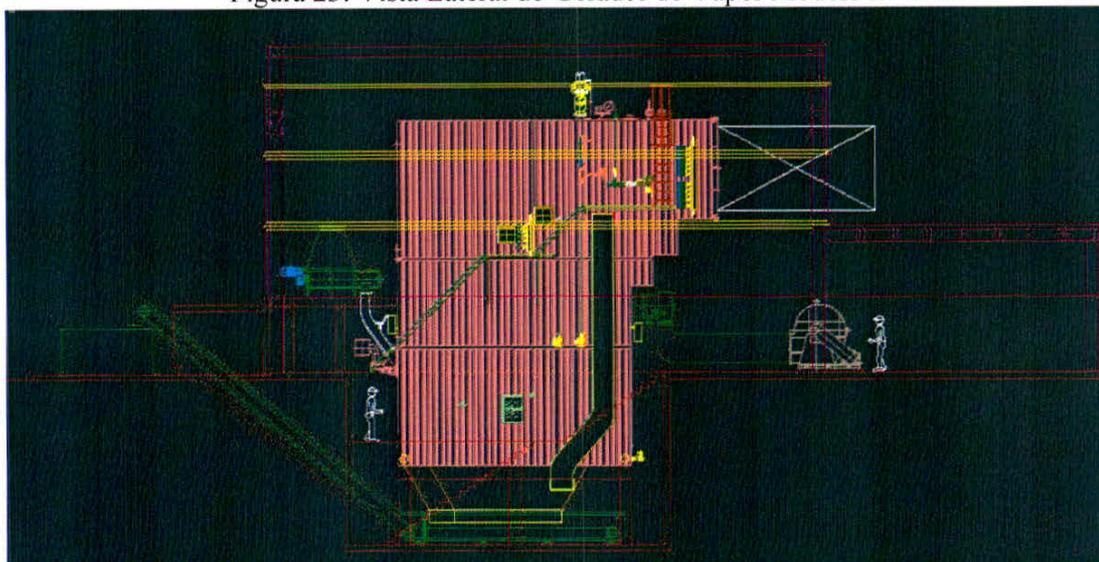
Para o Modelo A, caldeira tipo mista, onde que a fornalha é externa e tipo aquatubular e o corpo é tipo flamotubular para queima de cavaco de madeira, biomassa, a casa de caldeira é bem maior, pois requer muitos equipamentos, este layout requer um área de 43 x 32m.

Figura 16: Vista Frontal do Gerador de Vapor Modelo B



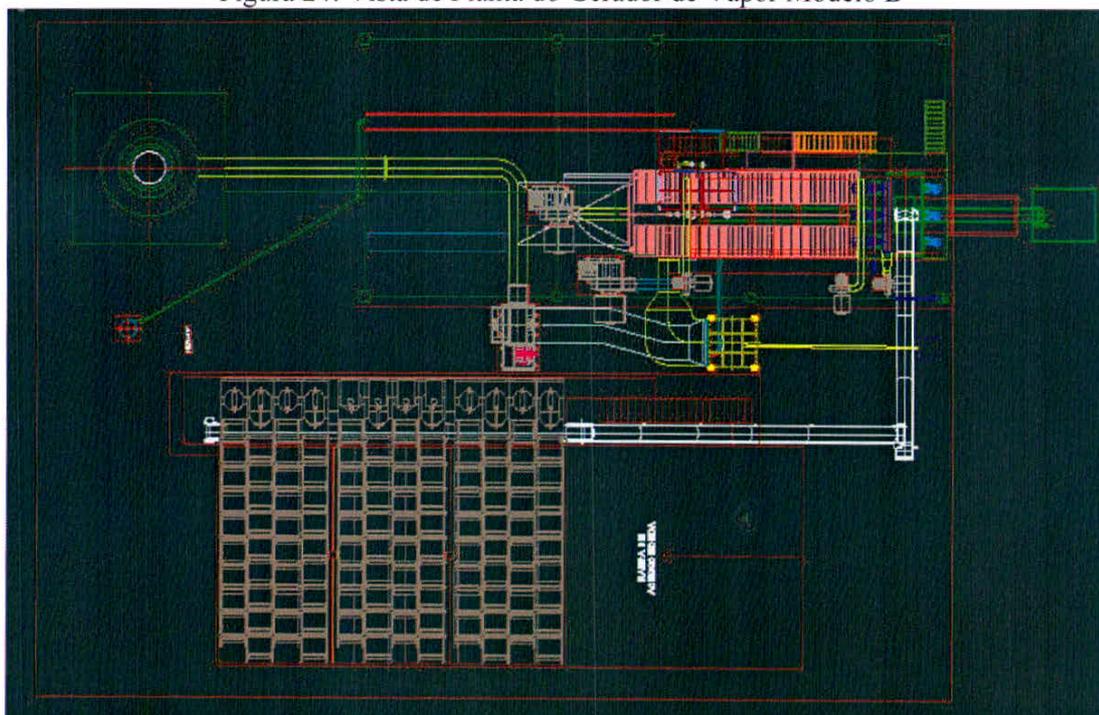
Fonte: A Empresa Pesquisada

Figura 23: Vista Lateral do Gerador de Vapor Modelo B



Fonte: A Empresa Pesquisada

Figura 24: Vista de Planta do Gerador de Vapor Modelo B



Fonte: A Empresa Pesquisada

As figuras 22, 23 e 24 demonstra a área necessária para implantação do gerador de vapor modelo B, contemplando caldeira, fornalha, grelha, pré aquecedor de ar, ventilador de tiragem induzida, ventilador de ar primário, ventilador para ar secundário, ventilador para espargidor, alimentador de biomassa, filtro multiciclone, sistema de extração de cinzas, silo de recepção e transporte de biomassa, dutos para gases / ar, chaminé e painel elétrico.

6.3 Consumo de Energia Elétrica.

Para a análise dos consumos de energia elétrica para os modelos A e B, faz-se necessário um levantamento de cada equipamento por produto estudado, que consome energia elétrica.

Segundo Mamede (2010, p 552, 553) [...] “Antes de desenvolver quaisquer ações de eficiência energética que impliquem custos, deve-se inicialmente realizar um levantamento dos aparelhos elétricos instalados nos diferentes segmentos da indústria, conforme anteriormente indicado. Após obtidos esses resultados, é necessário realizar medições de parâmetros elétricos, tais como energia, demanda ativa e reativa, corrente, tensão e fator de potência”.[...] “No caso de motores com potência acima de 5 cv mas que operam de forma contínua e com carga uniforme, basta obter uma leitura instantânea ou de pequena duração em torno de quatro horas.”

Após identificação do consumo de cada equipamento, foi identificado a potência em cavalo-vapor (cv).

Para efeito de cálculo de energia elétrica e melhor visualização posteriormente, há necessidade de transformar para quilowatts (Kw).

Para transformação será considerado: $1\text{ cv} = 0,736\text{ kw}$.

Para análise do consumo de energia elétrica e efeito de cálculos, a potência utilizada será a consumida, ou seja, é aquela que realmente está sendo utilizada durante o funcionamento do gerador de vapor.

Os dois modelos de gerador de vapor que são objetos de estudos deste trabalho são compostos por duas bombas de alimentação d'água, tanto para o modelo A, quanto para o modelo B. Portanto seu funcionamento é utilizado apenas uma bomba, sendo que a outro é reserva. Portanto para o consumo de energia elétrica será utilizado apenas uma bomba.

6.4 Consumo de Energia Elétrica do Gerador de vapor – Modelo A

Os equipamentos que consomem energia elétrica para o gerador de vapor modelo A, estão indicados na tabela 11.

Tabela 11: Equipamentos Elétricos Modelo A

PAINEL	TAG	DESCRIÇÃO	Nº POLOS	TENSÃO (V)	Nº FASES	TIPO DE PARTIDA	NOTAS
CCM-01	MIT-04A	Ventilador de tiragem forçada A	2	380	3	I	
CCM-01	MIT-04B	Ventilador de tiragem forçada B	2	380	3	I	
CCM-01	MB-01A	Bomba d'água A	2	380	3	I	
CCM-01	MB-01B	Bomba d'água B	2	380	3	I	
POTÊNCIA TOTAL INSTALADA (KW)			139,71				

LEGENDA:
I = INVERSOR DE FREQUÊNCIA
S= SOFT START
D= PARTIDA DIRETA

Fonte: Autor

6.5 Consumo de Energia Elétrica do Gerador de vapor – Modelo B

Os equipamentos que consomem energia elétrica para o gerador de vapor modelo B, estão indicados na tabela 12.

Tabela 12: Equipamentos Elétricos Modelo B

PAINEL	TAG	DESCRIÇÃO	Nº POLOS	TENSÃO (V)	Nº FASES	TIPO DE PARTIDA	NOTAS
CCM-01	MIT-03A	Ventilador de tiragem induzida	4	380	3	I	
CCM-01	MIT-04A	Ventilador de ar primário	4	380	3	I	
CCM-01	MB-01A	Bomba d'água 01	2	380	3	I	
CCM-01	MB-01B	Bomba d'água 02	2	380	3	I	
CCM-01	MIT-06G	Bomba da Unidade Hidraulica 01 - SILO	4	380	3	I	
CCM-01	MIT-06H	Bomba da Unidade Hidraulica 02 - SILO	4	380	3	I	
CCM-01	MIT-06J	Bomba da Unidade Hidraulica 03 - SILO	4	380	3	I	
CCM-01	MIT-06K	Bomba da Unidade Hidraulica 04 - SILO	4	380	3	I	
CCM-01	MIT-04B	Ventilador de ar secundário 01	2	380	3	I	
CCM-01	MIT-04C	Ventilador de ar secundário 02	2	380	3	I	
CCM-01	MIT-04D	Ventilador do espargidor	2	380	3	I	
CCM-01	MIT-06D	Correia transportadora 01	4	380	3	I	
CCM-01	MIT-06A	Rosca do alimentador 01	4	380	3	I	
CCM-01	MIT-06B	Rosca do alimentador 02	4	380	3	I	
CCM-01	MIT-06C	Rosca do alimentador 03	4	380	3	I	
CCM-01	MIT-06E	Correia transportadora 02	4	380	3	I	
CCM-01	MIT-06F	Correia transportadora 03	4	380	3	I	
CCM-01	MIT-07D	Redler extrator de cinzas	4	380	3	D	
CCM-01	MIT-07B	Rosca transportadora de cinzas 01 MC	4	380	3	D	
CCM-01	MIT-07C	Rosca transportadora de cinzas 02 MC	4	380	3	D	
CCM-01	MIT-07A	Válvula rotativa MC	4	380	3	D	
CCM-01	MIT-04G	Distribuidor pneumático	4	380	3	I	
POTÊNCIA TOTAL INSTALADA (KW)			353,09				

LEGENDA:
I = INVERSOR DE FREQUÊNCIA
S = SOFT START
D = PARTIDA DIRETA

Fonte: Autor

6.6 Consumo de Combustível.

Neste será abordado o consumo de combustível referente aos dois modelos de gerador de vapor, levando em consideração as variáveis que contribuem para o consumo.

Os fatores para o cálculo do consumo de combustível são:

- **Produção de Vapor:** Capacidade do gerador de vapor em produzir uma massa de vapor por um determinado tempo.
- **Diferença de Entalpia:** Entalpia é a quantidade de energia contida em uma determinada substância que sofre reação, ela calcula o calor de um sistema, é a forma

mais usada de expressar o conteúdo calorífico de um componente em uma reação química. Conforme pressão do vapor de operação do gerador (PO), verifica-se sua entalpia do vapor através de uma tabela, e a temperatura da água de alimentação no gerador de vapor obtém-se a entalpia da água através da tabela. A diferença de entalpia é a do vapor menos a da água.

- **PCI do Combustível:** Poder calorífico é a quantidade de energia por unidade de massa liberada na oxidação de um determinado combustível, o PCI é dado apenas pela energia liberada na forma de calor. “[...] É o calor liberado pela combustão da unidade de massa do combustível, na pressão constante de 1 atm, permanecendo a água formada na combustão no estado gasoso (vapor) [...]” (PERAGALLO, 1995 p.363)
- **Rendimento do Gerador de Vapor:** O rendimento térmico de um gerador de vapor, varia de fabricante para fabricante e também do modelo do produto.

O cálculo para obtenção do consumo de combustível, é dada pela seguinte equação conforme figura 13.

Tabela 13: Formula para consumo de combustível

$$C = \frac{Q \times (Ev - Ea)}{PCI \times \eta}$$

Fonte: A Empresa Pesquisada

Onde: C = Consumo de Combustível (kg/h)

Q = Produção de Vapor (kg/h)

Ev = Entalpia do Vapor (kcal/kg)

Ea = Entalpia da Água (kcal/kg)

PCI = Poder Calorífico Inferior do Combustível (kcal/kg)

η = Rendimento do Gerador de Vapor (%)

6.7 Consumo de combustível do Gerador de vapor – Modelo A

Apresentaremos através da tabela 14 o consumo de combustível mediante as variáveis apresentada.

Tabela 14: Consumo de Combustível do Gerador de Vapor do Modelo A

Variáveis	Valor	Unidade
Produção de vapor	30.000	kg/h
Qualidade do vapor	Saturado	
Combustível	Gas natural	
Pressão de operação do vapor	12	kgf/cm ² (g)
Temperatura de alimentação d'água	105	°C
Entalpia do vapor	665,04	Kcal/kg
Entalpia da água	105,06	Kcal/kg
PCI do gás natural	9.204	Kcal/Nm ³
Rendimento do gerador	95	%
Consumo de combustível	1.921	Nm ³ /h

Fonte: O autor

6.8 Consumo de combustível do Gerador de vapor – Modelo B

Apresentaremos através da tabela 15 o consumo de combustível mediante as variáveis apresentada.

Tabela 15: Consumo de Combustível do Gerador de Vapor do Modelo B

Variáveis	Valor	Unidade
Produção de vapor	30000	kg/h
Qualidade do vapor	Saturado	
Combustível	Cavaco de Madeira, Pínus	
Pressão de operação do vapor	12	kgf/cm ² (g)
Temperatura de alimentação d'água	105	°C
Entalpia do vapor	665,04	Kcal/kg
Entalpia da água	105,06	Kcal/kg
Umidade do combustível	45	%
PCI do gás natural	2109	Kcal/kg
Rendimento do gerador	86	%
Consumo de combustível	9.262	kg/h

Fonte: O autor

6.9 Custo do produto.

Será abordado o custo do produto para os modelo A e B, considerando todos os equipamentos necessários para o bom funcionamento do gerador de vapor no qual é submetido.

Os valores apresentados a seguir foram fornecido pela empresa fabricante do gerador, os valores serão expressos em reais (R\$) para melhor entendimento da análise.

6.10 Custo do produto para gerador de vapor – Modelo A.

Na tabela 16 apresentaremos o custo de investimento para instalação do gerador de vapor modelo A, com equipamentos, pertences, acessórios e instrumentação necessária para um bom funcionamento do gerador, tais como montagem geral de campo e bases/obra civil.

Tabela 16: Custo dos Equipamentos para o gerador de vapor modelo A.

Descrição	Valor (R\$)
Conjunto gerador de vapor	R\$ 1.537.363,00
Queimadores	R\$ 284.140,00
Economizador	R\$ 55.490,00
Instrumentação	R\$ 535.242,00
Bases e obra civil	R\$ 795.000,00
Montagem de campo	R\$ 789.000,00
Total =	R\$ 3.996.235,00

Fonte: O autor

6.11 Custo do produto para gerador de vapor – Modelo B.

Na tabela 17 apresentaremos o custo de investimento para instalação do gerador de vapor modelo B, com equipamentos, pertences, acessórios e instrumentação necessária para um bom funcionamento do gerador, tais como montagem geral de campo e bases/obra civil.

Tabela 17: Custo dos Equipamentos para o gerador de vapor modelo B.

Descrição	Valor (R\$)
Conjunto gerador de vapor	R\$ 2.750.000,00
Pré aquecedor de ar	R\$ 345.000,00
Filtro multiciclones	R\$ 237.280,00
Alimentador de biomassa	R\$ 178.000,00
Silo de recepção e transporte de biomassa	R\$ 545.000,00
Instrumentação	R\$ 1.347.855,00
Bases e obra civil	R\$ 1.850.000,00
Montagem de campo	R\$ 1.800.000,00
Total =	R\$ 9.053.135,00

Fonte: O autor

6.12 Custo do combustível.

Será abordado o custo do combustível para os modelo A e B, onde que apresentaremos o custo gasto com combustível, por hora, dia, mês e ano.

O gerador de vapor opera 24 horas por dia, 31 dias por mês e 355 dias por ano.

Os valores apresentados a seguir foram fornecido pela empresa onde será instalado o gerador e com impostos inclusos, os valores serão expressos em reais (R\$) para melhor entendimento da análise.

6.13 Custo do combustível para gerador de vapor – Modelo A.

Na tabela 18 apresentaremos o custo da energia elétrica, custo por hora, dia, mês e ano.

Tabela 18: Custo do combustível para gerador de vapor modelo A.

Variáveis	Valor	Unidade
Produção de vapor	30.000	kg/h
Qualidade do vapor	Saturado	
Combustível	Gas natural	
Consumo de combustível	1.921	Nm ³ /h
Custo do combustível	R\$ 1,90	R\$/Nm ³
	R\$ 3.649,90	Por hora
	R\$ 87.597,60	Por dia
	R\$ 2.715.525,60	Por mês
	R\$ 31.097.148,00	Por ano

Fonte: O Autor

6.14 Custo do combustível para gerador de vapor – Modelo B.

Na tabela 19 apresentaremos o custo da energia elétrica, custo por hora, dia, mês e ano.

Tabela 19: Custo do combustível para gerador de vapor modelo B.

Variáveis	Valor	Unidade
Produção de vapor	30.000	kg/h
Qualidade do vapor	Saturado	
Combustível	Cavaco de Madeira, Pínus	
Consumo de combustível	9.262	kg/h
Custo do combustível	R\$ 150,00	R\$/ton
	R\$ 1.389,30	Por hora
	R\$ 33.343,20	Por dia
	R\$ 1.033.639,20	Por mês
	R\$ 11.836.836,00	Por ano

Fonte: O autor

6.15 Custo da energia elétrica.

Será abordado o custo da energia elétrica para os modelo A e B, onde que apresentaremos o custo gasto com energia elétrica, por hora, dia, mês e ano.

O gerador de vapor opera 24 horas por dia, 31 dias por mês e 355 dias por ano.

Os valores apresentados a seguir foram fornecido pela empresa onde será instalado o gerador e com impostos inclusos, os valores serão expressos em reais (R\$) para melhor entendimento da análise.

6.16 Custo da energia elétrica para gerador de vapor – Modelo A.

Na tabela 02 apresentaremos o custo da energia elétrica, custo por hora, dia, mês e ano.

Tabela 20: Custo da energia elétrica para gerador de vapor modelo A.

Variáveis	Valor	Unidade
Produção de vapor	30.000	kg/h
Qualidade do vapor	Saturado	
Combustível	Gas natural	
Consumo de energia elétrica	139,71	Kwh
Custo da energia elétrica	R\$ 0,522	Kwh
	R\$ 72,93	Por hora
	R\$ 1.750,29	Por dia
	R\$ 54.258,89	Por mês
	R\$ 621.351,84	Por ano

Fonte: O autor

6.17 Custo da energia elétrica para gerador de vapor – Modelo B.

Na tabela 02 apresentaremos o custo da energia elétrica, custo por hora, dia, mês e ano.

Tabela 21: Custo da energia elétrica para gerador de vapor modelo B.

Variáveis	Valor	Unidade
Produção de vapor	30.000	kg/h
Qualidade do vapor	Saturado	
Combustível	Cavaco de Madeira, Pínus	
Consumo de energia elétrica	353,09	Kwh
Custo da energia elétrica	R\$ 0,522	Kwh
	R\$ 184,31	Por hora
	R\$ 4.423,51	Por dia
	R\$ 137.128,86	Por mês
	R\$ 1.570.346,59	Por ano

Fonte: O autor

6.18 Emissões de gases.

Será abordado as emissões de gases emitido para atmosférica dos geradores de vapor modelo A e B, onde que vamos demonstrar o quantitativo de CO₂, NO_x, os valores apresentados a seguir foram fornecido pela empresa fabricante dos geradores de vapor, caso deste estudo.

6.19 Emissões de Gases para gerador de vapor – Modelo A.

Na tabela 02 apresentaremos os índices de vazão de gases de combustão para o gerador modelo A.

Tabela 21: Vazão dos gases de combustão para gerador de vapor modelo A.

Variáveis	Valor	Unidade
Produção de vapor	30.000	kg/h
Qualidade do vapor	Saturado	
Combustível	Gas natural	
Vazão de gases	30.306	kg/h
Emissão de CO2	10,50	%
	3,182	ton/h
	76,371	ton/dia
	2.368	ton/mês
	27.112	ton/ano
Emissão de Nox	5,35	%
	1,621	ton/h
	38,913	ton/dia
	1.206	ton/mês
	13.814	ton/ano

Fonte: O autor

6.20 Emissões de Gases para gerador de vapor – Modelo B.

Na tabela 02 apresentaremos os índices de vazão de gases de combustão para o gerador modelo B.

Tabela 23: Vazão dos gases de combustão para gerador de vapor modelo B.

Variáveis	Valor	Unidade
Produção de vapor	30.000	kg/h
Qualidade do vapor	Saturado	
Combustível	Cavaco de Madeira, Pínus	
Vazão de gases	53.570	kg/h
Emissão de CO2	12,00	%
	6,428	ton/h
	154,282	ton/dia
	4.783	ton/mês
	54.770	ton/ano

Fonte: O autor

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Neste capítulo será abordada a análise dos indicadores levantados no desenvolvimento deste trabalho, para alguns indicadores, tais como o custo do produto, consumo de combustível, consumo de energia elétrica e impacto ambiental, serão convertidos em valor monetário, para que se tenha uma melhor visualização das diferenças entre os dois modelos de geradores de vapor.

7.1 Custo final do produto.

Com base nos dados das tabelas 16, 17, 18, 19, 20 e 21 apresentaremos o resultado final mediante a apresentação das diferenças de valores entre os geradores de vapor modelo A e B.

Tabela 24: Diferença de custo entre os geradores de vapor.

Variáveis	Valor produto A	Valor produto B	Diferença
Custo do produto instalado	R\$ 3.996.235,00	R\$ 9.053.135,00	R\$ 5.056.900,00
Custo do combustível por mês	R\$ 2.715.525,60	R\$ 1.033.639,20	R\$ 1.681.886,40
Custo da energia elétrica por mês	R\$ 54.258,89	R\$ 137.128,56	R\$ 82.869,67

Fonte: O autor

7.2 Payback.

Considerando a aplicação do gerador de vapor modelo B, teremos uma economia mensal entre consumo de combustível e energia elétrica de R\$-1.599.016,73. Sendo que o custo do produto instalado, o modelo B é R\$-5.056.900,00 mais caro do que o modelo A, onde que o retorno do investimento demandaria pouco mais de 3 meses.

7.3 Impacto Ambiental.

Com base nos estudos apresentado deste trabalho, podemos observar que a emissão do CO₂ do gerador de vapor modelo B é praticamente o dobro do gerador de vapor modelo A, porém o gerador de vapor modelo A gera NO_x e o gerador de vapor modelo B não gera.

Mediante aos números apresentado podemos afirmar que a utilização do gerador de vapor com combustível biomassa (modelo B) é vantajoso tanto na questão financeira quanto ambiental, pois não gera NO_x, que é altamente prejudicial a camada de ozônio, e quanto a alta emissão de CO₂, este é consumido pela própria arvores durante o processo de fotossíntese, conforme informado no item 6.4.

8 CONCLUSÃO.

Devido a atual situação ambiental do país e mundo, e principalmente ao aquecimento global, emissões descontroladas de gases poluentes tem provocado em nosso planeta um significativo aumento da temperatura global nas últimas décadas. Caso o homem não tome nenhuma medida para evitar estas mudanças climáticas, o meio ambiente pode apresentar uma série de problemas com consequências desastrosas para a vida em nosso planeta.

Em virtude disso, foi feito um estudo comprovando que a substituição dos combustíveis fosseis para biomassa, como fonte de energia na geração de vapor, é viável financeiramente e o principal, diminuiu drasticamente o impacto ambiental mediante aos gases emitidos oriundo de sua combustão.

Porém existe outros fatores que devem ser levados em consideração.

O layout para implantação é quase quatro vezes maior em relação ao gerador de vapor de combustível fóssil, pois muitas indústrias têm problemas de área.

O Consumo de energia elétrica é duas vezes e meia maior em relação ao gerador de vapor de combustível fóssil, será necessário um acréscimo na demanda de energia elétrica para indústria, onde que em algumas regiões, a concessionária de energia elétrica não disponibiliza esta nova demanda.

O custo do investimento do gerador de vapor de biomassa, é um pouco mais que o dobro do gerador de combustível fóssil, porém o “payback” é de apenas 3 meses.

O gerador de vapor de biomassa, emite muito menos gases poluentes.

9 REFERÊNCIAS.

- CORTEZ, LORA e GÓMEZ, **Biomassa para Energia**. Campinas-SP, 2008.
- PERA, H. **Geradores de vapor**. Escola Politécnica de São Paulo, 1982.
- SARCO, S – **The Steam And Condensate Loop**. Inglaterra, 2007.
- GARCIA, R. **Combustíveis e Combustão Industrial**. Rio de Janeiro, 2002.
- GARCIA, R. **Combustíveis e Combustão Industrial**. 2º edição, Rio de Janeiro, 2013.
- COMGÁS. **Gás Natural, aplicação á indústria e ao grande comércio**. São Paulo, 2010.
- TURNES, S. **Introdução á Combustão, conceitos e aplicações**. 3º edição, Porto Alegre, 2013.
- BAZZO, E. **Geração de Vapor**. UFSC, 1995.
- BIZZO, W. A. **Geração, Distribuição e Utilização de Vapor**, 2003.
- PERA, H. **Gerador de Vapor**. São Paulo: Fama, 1990.
- CONAMA, resolução nº 436, 2011.
- SEMA, resolução nº 16, 2014