



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA ENERGIAS RENOVÁVEIS

VANESSA COSTA MORORÓ

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E EMISSÕES DE CALDEIRAS DE VAPOR
HÍBRIDAS APLICADA À BIOMASSA

FORTALEZA

2016

VANESSA COSTA MORORÓ

AValiação de desempenho e emissões de caldeiras de vapor
híbridas aplicada à biomassa

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energias Renováveis do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. William Magalhães Barcellos

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- M855a Mororó, Vanessa Costa.
Avaliação de desempenho e emissões de caldeiras de vapor híbridas aplicada à biomassa /
Vanessa Costa Mororó. – 2016.
76 f. : il. color.
- Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de
Engenharia Mecânica e de Produção, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. William Magalhães Barcellos.
1. Biomassa. 2. Caldeiras de vapor. 3. Avaliação de desempenho. I. Título.

CDD 621.042

VANESSA COSTA MORORÓ

AValiação de desempenho e emissões de caldeiras de vapor
híbridas aplicada à biomassa

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energias Renováveis do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Energias Renováveis.

Aprovada em ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. William Magalhães Barcellos (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Mônica Albuquerque (Examinadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Maria Aleksandra de Sousa Rios (Examinadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, meu Criador, doador de toda inteligência, sabedoria e discernimento necessários em mais esta conquista. A Ti toda honra, toda glória e todo louvor por mais esta etapa cumprida e mais este sonho realizado.

A Nossa Senhora, amiga fiel para todas as horas, pela graça de não desistir.

Ao Professor William Magalhães Barcellos pelo suporte, empenho e paciência ao longo de toda graduação, pelos valiosos e incontáveis orientações e mesmo nos períodos de greve e recesso não mediu esforços para conquistarmos este objetivo.

Ao meu pai, Edson, e à minha mãe Angela, que mesmo na simplicidade se abnegaram e me proporcionaram a oportunidade de me graduar em Engenharia de Energias Renováveis e me incentivaram a sempre continuar lutando e buscando novos desafios na caminhada desta vida.

Aos meus queridos irmãos, Anderson, Andressa e Edson Filho, que torceram por mim em todos os momentos e me apoiaram totalmente na constante luta pelos meus objetivos.

Ao meu namorado, João Paulo, pelo apoio diário nas dúvidas, incertezas e dificuldades e pelo encorajamento nos momentos de desânimo.

A minha avó, Mocinha, pelo testemunho de força e dedicação.

A minha amiga Daiane, pelos anos de amizade e de lealdade que não se abateram com distância.

Aos amigos Cleber, Lana e Bernardo pelo apoio e orações.

A todos os professores e amigos da Universidade Federal do Ceará.

As empresas Engetérmica, Loriso Engenharia, por ter vivenciado a rotina dos profissionais de engenharia em conjunto com JBS S/A por ter contribuído com desenvolvimento do meu trabalho de conclusão de curso.

“Nada te perturbe, nada te espante, tudo passa!
Só Deus não passa. A paciência, por fim, tudo
alcança. Quem a Deus tem, nada lhe falta, pois
só Deus basta.” (Santa Tereza D’Ávila)

RESUMO

A utilização de caldeiras híbridas, resultante da conjunção de projeto do modelo flamotubular com o aquatubular, tem se difundido no meio industrial, como uma alternativa tecnológica adequada à combustão da biomassa sólida, assim a eficiência e diminuindo a emissão de poluentes. Entretanto, poucos dados estão disponíveis sobre as reais condições de funcionamento desse tipo de caldeira no meio industrial, quanto ao desempenho e quanto às emissões, tais como: do monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos não-queimados e material particulado, dentre outros. Por essa razão, há o interesse na avaliação dessa questão *in loco*, focando especialmente o desempenho e as emissões, mas também, os aspectos de segurança operacional, a luz de normas regulamentadoras aplicáveis. Neste contexto, esse Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Energias Renováveis se presta a identificar as não-conformidades de uma instalação térmica a vapor operante, como estudo de caso, onde se aplicam alguns fundamentos da Termodinâmica Clássica, como base de conceituação para análise de processo, e Normas de Construção e Operação de Caldeiras (NRs), como referência para caracterização da instalação térmica, enquanto ativo empresarial. Por essa razão, decidiu-se por um levantamento minucioso de dados sobre o uso desses equipamentos na indústria, dividido em duas partes: i) visitas a várias instalações térmicas, verificando quando possível sistemas montados e desmontados, para análise das condições estruturais; e ii) estudo de um sistema térmico de geração de vapor a biomassa em uma instalação relativamente moderna, pertencente a uma grande organização empresarial, para servir como parâmetro de referência para avaliação comparativa. A partir desse trabalho, foi possível ter uma visão relativamente consistente sobre os problemas operacionais e os riscos, que estão presentes nesse tipo de instalação industrial voltada à utilização da biomassa sólida, incorporando os acessórios componentes da instalação, no âmbito do Estado do Ceará. Destacam-se as irregularidades detectadas especialmente quanto à rotina de manutenção preventiva e ao cumprimento da NR-13, particularmente a respeito da calibração de instrumentos e, ainda, percebeu-se emissões de NO_x e CO superiores às especificações do próprio fabricante e às normas internacionais com base na norma ISO.

Palavras-chave: Caldeira de vapor. Combustão de biomassa. Emissões.

ABSTRACT

The use of hybrid boilers, resulting from the conjunction of the flame-tube design model with the water-tube one, has been widely spread in the industrial environment as a technological alternative proper to solid biomass combustion to be more efficient and for producing lower emission of pollutants. However, few data are available on the actual operating conditions of this type of boiler in the industrial environment, concerning the performance and emissions, such as: carbon monoxide, nitrogen oxides, unburned hydrocarbons and particulate matter, among others. For this reason, there exist interest in evaluating this question on the spot, especially focusing the performance and emissions, but also on operational safety aspects, the light of applicable regulatory standards. In this context, this Completion Work of Renewable Energy Engineering Course lends itself to identify non-compliances of a steam thermal facilities, through case study, where it is possible to apply some principles of Classical Thermodynamics to the process analysis and Standards of Building and Operation for steam boiler (NRs) as a reference to characterize the facility conditions, in terms of assets. For this reason, it was opted by a detailed data survey on the use of such equipment in the industry, divided into two parts: i) visits to several heating systems, checking if possible the assembled and disassembled systems for analysis of structural conditions; and ii) study of a thermal system of steam generation biomass into a relatively modern facility, owned by a large business organization, to serve as a benchmark for comparative assessment. From this work, it was possible to have a relatively consistent view on operational problems and risks, which are present in this type of industrial facility, focused on the use of solid biomass, encompassing the components of the installation accessories, on scope of Ceará province. Some irregularities were checked out, especially concerning the preventive maintenance routine and compliance with NR-13, particularly regarding instrument calibration, as well as CO and NO_x emissions exceeding the specifications of the manufacturer and international standards were detected, based on ISO standard.

Keywords: Steam boiler. Biomass combustion. Emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático de caldeira híbrida a biomassa	17
Figura 2 - Desenho esquemático da fornalha que constitui a caldeira híbrida	17
Figura 3 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.....	19
Figura 4 - Consumo Final por Fonte Renovável	19
Figura 5 - Caldeira Híbrida.....	25
Figura 6 - Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa	31
Figura 7 - Algumas expectativas de emissões de CO, NOx e Particulado em função da razão ar-combustível na fornalha	33
Figura 8 - Potencial de geração de energia elétrica a partir da casca de castanha de caju	35
Figura 9 - Esquema da análise energética do processo de combustão	51
Figura 10 - Imagem de satélite de instalação das caldeiras a óleo e a biomassa.....	55
Figura 11 - Caldeira óleo	56
Figura 12 - Caldeira Biomassa	57
Figura 13 - Micrografias do bio-carvão obtidos sob fluxo de ar	62
Figura 14 - Armazenamento da Casca da Castanha de Caju	78
Figura 15 - Armazenamento do BPF	78
Figura 16 - Chaminé da Caldeira de Biomassa	79
Figura 17 - Histograma.....	81
Figura 18 - Corrosão da Caldeira	82
Figura 19 - Caldeira de Vida Remanescente	82
Figura 20 - Nível de água apresentando coloração amarelada	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios para Classificação das Caldeiras de Vapor.....	24
Tabela 2 - Classificação dos combustíveis segundo a origem	30
Tabela 3 - Classificação dos combustíveis segundo o estado físico	30
Tabela 4 - Relação entre Fontes e seus Poluentes Característicos	36
Tabela 5 - Ar requerido para queima de combustíveis	43
Tabela 6 - Lista de Verificações segundo a NR-13	53
Tabela 7 - Caracterização da biomassa.....	63
Tabela 8 - Demonstrativo de Custo Operacional para Produção de Vapor.....	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Pontos de Dados	55
Quadro 2 - Características Técnicas da Caldeira Óleo	57
Quadro 3 - Características Técnicas Caldeira Biomassa	58
Quadro 4 - Dados Técnicos	59
Quadro 5 - Comparativo dos Valores Calculados para Casca da Castanha de Caju	73
Quadro 6 - Caracterização das Caldeiras	74
Quadro 7 - Aspectos Técnicos Comparativos da Biomassa e, Óleos e Gases.....	76
Quadro 8 - Aspectos Econômicos, diferenciando os combustíveis sólidos, dos líquidos e gasosos.....	76
Quadro 9 - Aspectos Ambientais Comparativos da Biomassa e, Óleos e Gases	77
Quadro 10 - Aspectos Sociais, diferenciando os combustíveis sólidos, líquidos e gasosos	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEM - Balanço Energético Nacional
BPF - Baixo Ponto de Fluidez
C - Carbono
CCC - Casca de Castanha de Caju
CO - Monóxido de Carbono
CO₂ - Dióxido de Carbono
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
H - Hidrogênio
H₂O - Água
HC - Hidrocarbonetos
LCC - Líquido da Casca de Castanha de Caju
MP - Material Particulado
N - Nitrogênio
N₂O - Óxido Nitroso
NO - Monóxido de Nitrogênio
NO₂ - Dióxido de Nitrogênio
NO_x - Óxidos de Nitrogênio
NR - Norma Regulamentadora
O₂ - Oxigênio
PCI - Poder Calorífico Inferior
PCS - Poder Calorífico Superior
S - Enxofre
SO₂ - Dióxido de Enxofre
TON - Tonelada
VOC's - Compostos Orgânicos Voláteis

LISTA DE SÍMBOLOS

AC - Razão ar-combustível

T_{ar} - Temperatura do ar de entrada

Φ - Razão de equivalência

\dot{m}_{ar} - Vazão mássica de ar

\dot{m}_{comb} - Vazão mássica de combustível

$\dot{m}_{produtos}$ - Vazão mássica dos produtos que saem na exaustão

$\dot{Q}_{químico}$ - Taxa de calor gerada pela queima do combustível

$\dot{Q}_{extraído}$ - Taxa de calor extraída pelo trocador de calor do reator

$\dot{Q}_{convectivo}$ - Taxa de calor perdida na exaustão

\dot{Q}_{parede} - Taxa de calor perdida pelas paredes do reator

PCI_{comb} - Poder calorífico inferior do combustível

$\dot{m}_{água}$ - Vazão mássica de água

h_e, h_s - Entalpias de entrada e saída, respectivamente

$c_{p,água}$ - Calor específico da água

x_v - Porcentagem da massa de vapor na mistura líquido-vapor

$\eta_{extração}$ - Eficiência de extração

v - Volume específico

\bar{R} - Constante universal dos gases ideais

CA - Razão combustível-ar

Σ - Somatório

q_d - Energia disponível na câmara de combustão

c_p - Calor específico

T_{ref} - Temperatura de referência

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	21
3. CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS SOBRE CALDEIRAS A BIOMASSA	22
3.1. Conceitos Básicos sobre Caldeiras	22
3.2. Características de Projetos de Caldeiras Híbridas	24
3.3. Princípios Norteadores sobre Construção e Operação de Caldeiras	27
3.4. Combustíveis	29
3.5. Biomassa	30
3.5.1. <i>Propriedades das Biomassas Sólidas</i>	32
3.5.2. <i>Emissões de Caldeiras a Biomassa</i>	32
3.5.3. <i>Casca da Castanha de Caju</i>	34
4. POLUENTES ATMOSFÉRICOS E SEU CONTROLE	35
4.1. Poluentes Atmosféricos	35
4.2. Efeitos da Poluição Atmosférica na Saúde do Homem e no Ambiente	36
4.3. Equipamento de Medição e Controle de Emissões	37
5. FUNDAMENTOS DA COMBUSTÃO	38
5.1. Estequiometria da Combustão	40
5.2. Balanço de Massa na Combustão	43
5.3. A Primeira Lei da Termodinâmica Aplicada à Combustão. Entalpia da Reação	44
5.4. A Segunda Lei da Termodinâmica Aplicada à Combustão. Análise de Disponibilidade	45
5.5. Poder Calorífico, Temperatura Adiabática e Ar de Combustão	46
5.6. Balanço Térmico, Eficiência e Cálculo Térmico	50
6. METODOLOGIA	52
6.1. Critérios para Coleta de Informações de “Campo”	52
6.1.1. <i>Recomendações</i>	53
6.2. Descrição da Instalação Industrial	55
6.2.1. <i>Condições Operacionais das Caldeiras</i>	56
6.3. Análise da Emissão de Gases	58
6.4. Metodologia para Avaliação da Caldeira FAM-15 (Biomassa – CCC)	61
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
7.1. Aspectos Comparativo das Caldeiras	74
7.2. Aspectos de Segurança das Caldeiras	80
8. CONCLUSÃO	83
REFERÊNCIAS	85
ANEXO A – EFEITOS ASSOCIADOS COM POLUENTES ESPECÍFICOS	88
ANEXO B – LAUDO BIOMASSA	90

1. INTRODUÇÃO

Nos primórdios, o homem usava energia proveniente dos seus próprios músculos, logo, a energia motriz era a humana. Com a utilização do fogo, como fonte de calor e de luz, tornou-se possível a exploração dos minerais, minérios e metais. Entretanto, originalmente, a madeira (lenha) foi, por muito tempo, a principal fonte energética, para posteriormente, serem utilizados os óleos provenientes de recursos diversos (renováveis ou não). Na Revolução Industrial (Séculos XVIII e XIX), com o advento da tecnologia a vapor, a biomassa passou a ter papel primordial para obtenção de energia mecânica, com aplicação em setores da indústria e nos transportes (CRUZ, 2015).

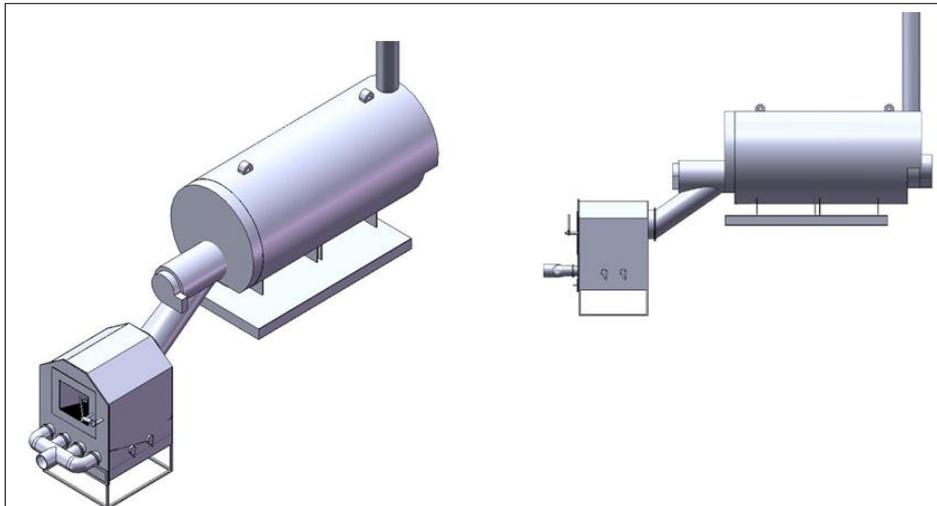
De acordo com AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), historicamente com o início da exploração dos combustíveis fósseis, que aparentemente eram intermináveis (em termos de disponibilidade de matéria prima), como: o carvão, o petróleo e, em seguida, o gás natural, a biomassa tornou-se preterida. Os combustíveis fósseis apresentaram preços e facilidade de exploração e de transporte, além de garantir maior densidade de energia, caracterizada pela razão do poder calorífico por unidade de volume, o que possibilitou a utilização desenfreada e em grandes sistemas de energias, o que passou a ser interpretado como sinônimo de “desenvolvimento”, na época e por um longo período da História.

Assim, a biomassa perdeu cada vez mais sua liderança, em comparação à energia do carvão e dos derivados do petróleo, mas continuou desempenhando papel importante, principalmente nos países tropicais, ditos “em Desenvolvimento”. Com a crise do petróleo, nos anos 70, tornou-se evidente a necessidade de retornar o uso das fontes renováveis, em particular a biomassa, como: bagaço da cana de açúcar (álcool), lenha, cascas de cultivares, e óleos vegetais, etc., além de biogás e gás de síntese a partir da transformação biológica ou termoquímica da biomassa, respectivamente; aplicando-os, de forma direta ou indireta, em caldeiras e motores de combustão interna, dentre outros.

Quanto às caldeiras a combustíveis sólidos, usualmente encontradas no meio industrial, sabe-se que, basicamente, o projeto construtivo foi o resultado do acoplamento de uma fornalha ao corpo de uma caldeira flamotubular, como um acessório a mais, em termos de equipamento, como mostra as Figuras 1 e 2. Evidentemente, essa adaptação muda significativamente os fenômenos de transferência de calor, por atenuar os efeitos de radiação no processo de aquecimento da câmara de combustão, pelo fato dessa fornalha estar acoplada, como fosse uma antecâmara. De fato, não é tão simples converter uma caldeira convencional

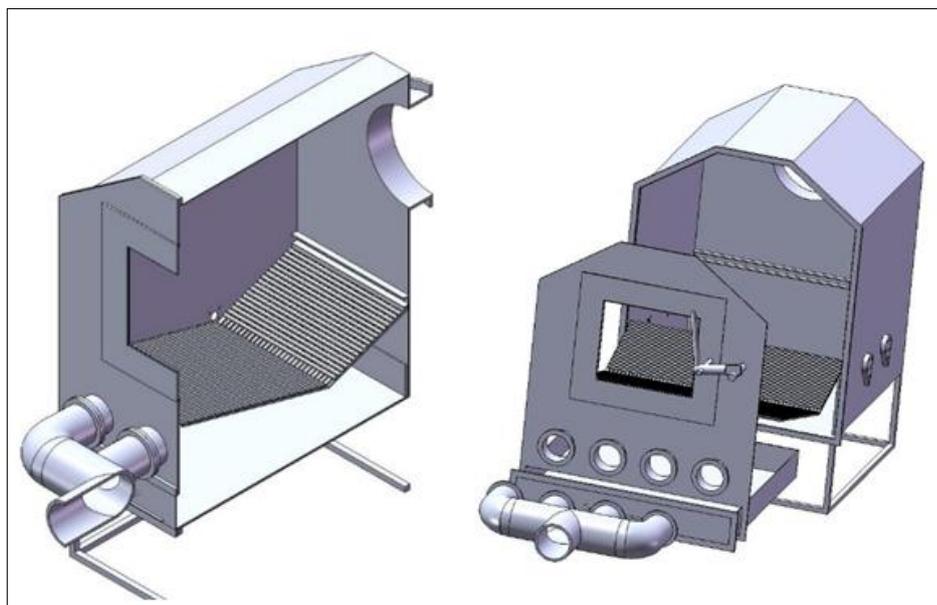
flamotubular com a finalidade de transformá-la em um sistema híbrido, capaz de operar com combustível sólido, em especial aqueles provenientes de processos agro-industrias. Entretanto, verifica-se um número significativo de instalações desse tipo operando atualmente em todo país, na grande maioria das vezes sem um processo fiscalizatório de operação e muito menos de projeto, fator esse que motivou a realização desse TCC para averiguar essa realidade *in loco*.

Figura 1 - Desenho esquemático de caldeira híbrida a biomassa



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 2 - Desenho esquemático da fornalha que constitui a caldeira híbrida



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto às emissões e aos impactos ambientais, o uso da biomassa em larga escala de forma inadvertida resulta, no entanto, na destruição da fauna e da flora, com extinção de certas espécies, contaminação do solo e mananciais de água por uso de adubos e outros meios de defesa, quando manejados inadequadamente. Conforme os dados do Balanço Energético Nacional de 2014, a capacidade total instalada de geração de energia elétrica distribuída no Brasil alcançou 133.914 MW, acréscimo de 7.171 MW em relação ao ano de 2013 (BEM, 2015).

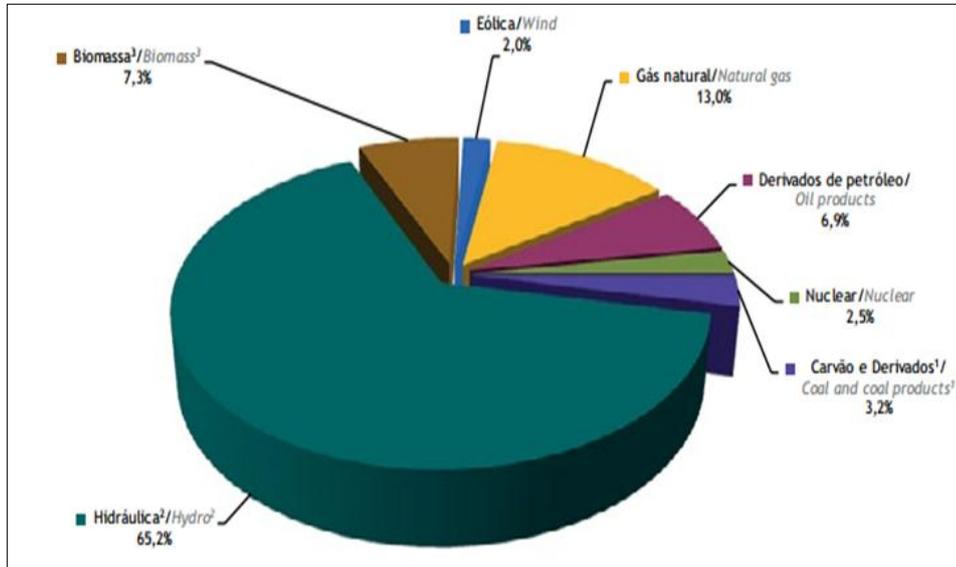
Em princípio, o Brasil dispõe de uma matriz elétrica predominante renovável, que representam 74,5% da oferta interna de eletricidade, em que as centrais hidrelétricas são as principais fontes de geração de energia, respondendo por 65,2% da oferta interna, sendo que a geração de energia elétrica atingiu 590,5 TWh em 2014. Nas instalações denominadas autoprodutoras (geração distribuída), em que a energia é produzida e consumida no mesmo local, atingiu um total de 52,2 TWh. Em geral, a própria instalação geradora não injeta na rede elétrica, mas agrega às mais diversas instalações industriais de produção de energia para o próprio consumo, a exemplo dos setores de papel e celulose, siderurgia, açúcar e álcool, química, entre outros (BEM, 2015).

Nas Figuras 3 e 4 estão apresentados os dados da matriz energética brasileira, verifica-se que no Brasil, a matriz energética total ainda tem muito de participação dos hidrocarbonetos. No entanto, nossa matriz elétrica conta com uma participação fundamental (65,2%) da fonte hidrelétrica, considerada limpa e renovável. Dos 34,8% restantes, temos grande participação da biomassa no sistema de cogeração para a produção de eletricidade, com destaque para o setor sucroalcooleiro. Logo, fica evidente a necessidade de se buscar avanços tecnológicos para um melhor aproveitamento do potencial energético dos recursos renováveis.

A análise dos dados apresentados permite uma visão mais clara sobre a importância da mudança da matriz energética nacional para utilização das fontes renováveis, onde a biomassa já ocupa uma posição destacada na oferta mas não utilizada. Entretanto, as tecnologias adequadas à utilização da biomassa não têm recebido investimentos significativos, tanto do setor público quanto do privado, para desenvolvimento tecnológico, visando desempenho, emissões e segurança das instalações. Por outro lado, cabe ressaltar que a crescente demanda de energia na atualidade é o fator que tem levado ao estudo e ao aperfeiçoamento de novos sistemas termodinâmicos de aproveitamento de fontes renováveis de energia, em detrimento dos combustíveis fósseis, visando manter as sustentabilidades técnica, econômica, ambiental e social. Neste contexto, as grandes reservas de biomassa,

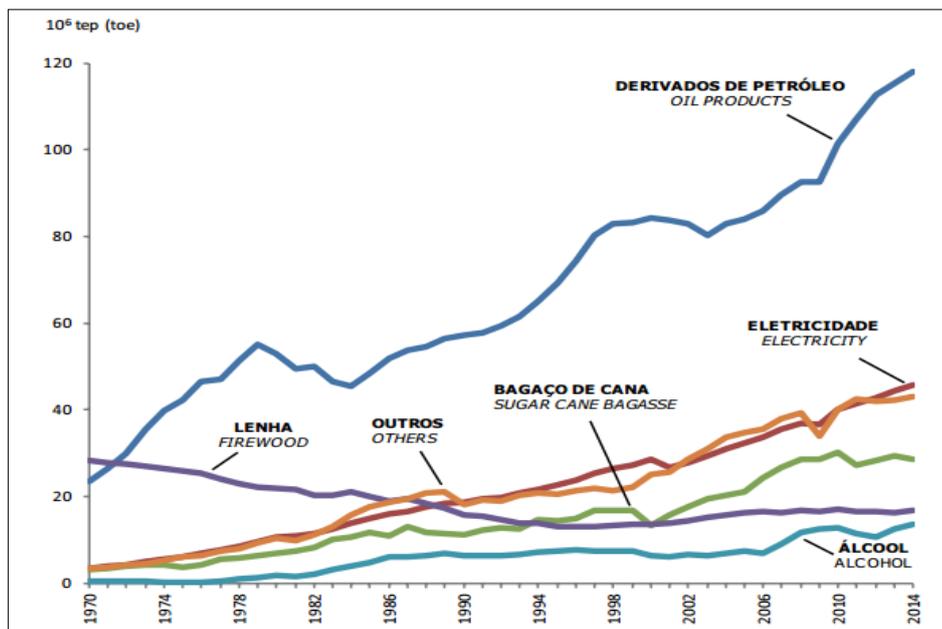
proveniente de resíduos agroindustriais, surgem como um elemento motivador para aplicação de tecnologias não-convencionais, que sejam adequadas ao aproveitamento da biomassa em sistemas de geração de energia, de forma sustentável.

Figura 3 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte



Fonte: Bem (2015).

Figura 4 - Consumo Final por Fonte Renovável



Fonte: Bem (2015).

Em contrapartida, o alto nível tecnológico dos equipamentos para queima de combustíveis líquidos e gasosos, bem como a necessidade do uso racional de recursos não renováveis, em particular os combustíveis fósseis, têm resultado em uma crescente demanda de exigências de ordem técnica, em termos de tecnologia e qualidade para produção de calor em caldeiras. Nesse elenco de exigências, ressaltam algumas metas buscadas por fabricantes mais bem estruturados tecnologicamente, tais como: queimar de forma barata e eficiente combustíveis de baixa qualidade (com impurezas e baixo teor calorífico); atingir uma alta eficiência de combustão; conseguir uma maior flexibilidade (multicombustível) das caldeiras; assegurar o uso alternativo de diferentes combustíveis num mesmo sistema térmico de combustão, sem grandes mudanças de projeto; e, por fim, prover atenuação efetiva dos impactos ambientais, com baixas emissões de poluentes, tais como: CO, SO_x, NO_x e material particulado (PIRES, 2005).

De certa forma, essas exigências se objetam como um fator dificultador para introdução de novas tecnologias em termos de caldeira operadas com combustível renovável, como é o caso da biomassa. Ou seja, a difusão de caldeira a biomassa já tem que trazer incorporadas tecnologias avançadas, em termos de funcionamento e segurança da instalação, para se impor perante os sistemas térmicos de combustão de combustíveis não-renováveis, os quais estão em contínua modernização no mercado.

Com base em todos esses aspectos acima abordados, identificou-se academicamente a necessidade de uma investigação dessa questão de forma cuidadosa e crítica, para verificar como caminham os avanços tecnológicos no meio industrial/agroindustrial, no que diz respeito ao desempenho e rigor dos aspectos de segurança praticados em caldeira a biomassa. Logo, este Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Energias Renováveis tem o intuito de contribuir para aproximação da Academia com o mercado de trabalho do setor industrial, onde se percebe mudanças contínuas, muitas vezes sem um direcionamento racional, que seja compatível com as potencialidades naturais em âmbito regional, em termos de apropriação do conhecimento para desenvolvimento de novas tecnologias, de forma adequada.

2. OBJETIVOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo geral a avaliar as condições operacionais das caldeiras híbridas a biomassa em operação industrial, quanto ao desempenho e às emissões e, também, quanto aos aspectos operacionais, com base em fundamentos termodinâmicos e normas aplicáveis, no sentido de conhecer as dificuldades de difusão dessa tecnologia em processos industriais que passaram a usar a biomassa em lugar dos combustíveis fósseis.

Quanto aos objetivos específicos desse trabalho, cabe ressaltar alguns aspectos operacionais de interesse, tais como:

➤ Controle de processo de combustão em caldeiras de biomassa sólida, quanto aos controles de qualidade, conteúdo de calor e umidade da biomassa.

➤ Determinação da razão ar-combustível (A/C) e vazões mássica de ar e combustível, verificando as dificuldades das empresas em lidar com os problemas de custo ou abastecimento de diferentes combustíveis.

➤ Identificação dos principais itens de segurança das instalações visitas, que mais têm sido negligenciados na indústria que podem por em risco a integridade física da instalação e a saúde das pessoas envolvidas na operação, como também, sujeitas a impactos ambientais.

➤ Conhecer a relação que a empresa, que contém uma instalação térmica a vapor, estabelece com os órgãos de fiscalização ambiental, no que tange as penalizações decorrentes dos impactos ambientais.

3. CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS SOBRE CALDEIRAS A BIOMASSA

Sob o ponto de vista do desenvolvimento tecnológico, a caldeira de vapor por muitos anos foi considerada como uma tecnologia antiga, fadada à obsolescência, sem perspectiva de modernização, dando a impressão que já tinha atingido a máxima eficiência possível e os limites de projeto. Neste sentido, a caldeira de vapor, que depende de processo de combustão, também tem sido considerada como um dos responsáveis pelos problemas de poluição atmosférica, juntamente com os veículos automotores (CASTRO, 2005).

Em princípio, boa parte da indústria utiliza em seus processos térmicos caldeiras operadas com óleo, sendo que essas produzem gases poluentes, tais como: NO_x, CO, HC, SO_x e, também, material particulado, dentre outros. A partir da década de 80, as indústrias converteram suas caldeiras para operarem com gás natural, o que trouxe alguns benefícios ambientais porque são menos poluentes, já que sua poluição fica mais ou menos restrita à produção de NO_x, CO, HC. Entretanto, a produção de CO₂ ainda é o grande problema para qualquer tipo de combustível por causa do efeito estufa (CASTRO, 2005).

Neste contexto, a investigação das caldeiras híbridas, resultante do acoplamento de projeto da caldeira flamotubular e com o da aquatubular (fornalha), torna-se interessante pela possibilidade de empregar combustíveis de fontes renováveis, que pode promover a mitigação dos impactos ambientais. Entretanto, quando se utiliza caldeiras queimando biomassa sólida, por exemplo, enfrenta-se problemas com a fiscalização governamental de controle de poluição, na esfera municipal ou estadual, com base nos regulamentos internacionais de emissões, cada vez mais rigorosos. E, com base nisso, torna-se importante tecer algumas considerações técnicas a respeito desse tipo de caldeira, no tocante aos projetos conceutivo e construtivo, como também, quanto aos aspectos normativos sobre operação e emissões (BAZZO, 1995).

3.1. Conceitos Básicos sobre Caldeiras

Para Lammers et al. (2004), uma caldeira é um recipiente fechado em que a água, sob pressão, é transformada em vapor pela aplicação de calor. Na fornalha, a energia química do combustível é convertida em calor, e é função da caldeira transferir esse calor para a água da maneira mais eficiente. Assim, a função principal de uma caldeira é gerar vapor a pressões

acima da pressão atmosférica, pela absorção do calor que é produzido pela queima de combustíveis. Ainda segundo Lammers et al. (2004), a caldeira ideal inclui:

I - Simplicidade na construção, excelente acabamento, materiais conducentes, manutenção de baixo custo, alta eficiência e alta disponibilidade.

II - Concepção e construção ideais para acomodar a expansão e contração dos materiais.

III - Uma fornalha de configuração favorável à combustão eficiente e que permita a máxima taxa de transferência de calor.

IV - Capacidade de resposta às demandas súbitas e condições adversas.

V - Acessibilidade para a limpeza e manutenção.

VI - Tenha um fator de segurança que atenda às exigências.

Componentes Principais de Caldeiras

a) cinzeiro: em caldeiras de combustíveis sólidos, é o local onde se depositam as cinzas ou pequenos pedaços de combustível não queimado.

b) fornalha com grelha ou queimadores de óleo ou gás.

c) seção de irradiação: são as paredes da câmara de combustão revestidas internamente por tubos de água.

d) seção de convecção: feixe de tubos de água, recebendo calor por convecção forçada; pode ter um ou mais passagens de gases.

e) superaquecedor: trocador de calor que aquecendo o vapor saturado transformo em vapor superaquecido.

f) economizador: trocador de calor que através do calor sensível dos gases de combustão saindo da caldeira aquecem a água de alimentação.

g) pré-aquecedor de ar: trocador de calor que aquece o ar de combustão também trocando calor com os gases de exaustão da caldeira.

h) exaustor: faz a exaustão dos gases de combustão, fornecendo energia para vencer as perdas de carga devido a circulação dos gases.

i) chaminé: lança os gases de combustão ao meio ambiente, geralmente a uma altura suficiente para dispersão dos mesmos.

Na Tabela 1 verificam-se os critérios para classificação das caldeiras a vapor, segundo Lora, 2005.

Tabela 1 – Critérios para Classificação das Caldeiras de Vapor

Critério	Classificação
Aplicação Principal	Termelétrica Industrial e Terciário Naval
Disposição Relativa dos Gases e do Fluido de Trabalho	Flamatubulares Aquatubulares
Força Motriz de Circulação do Fluido de trabalho	Circulação Natural Circulação Forçada Passe Único
Nível de Pressão de Operação	Baixa e Média (<10 Mpa) Alta (10-16 Mpa) Super Alta (> 17 Mpa) Super Crítica(> 22,1 Mpa) Pressão Deslizante
Tipo de Combustível	Sólido Líquido Gasoso
Tecnologia da Combustão	Grelha (fixa ou rotativa) Queima em Suspensão Leito Fluidizado(borbulhante ou circulante)
Tiragem do Ar e	Natural Forçada Induzida Balanceada
Disposição da Fornada	Convencional Em forma de T Em forma de Torre Em forma de U

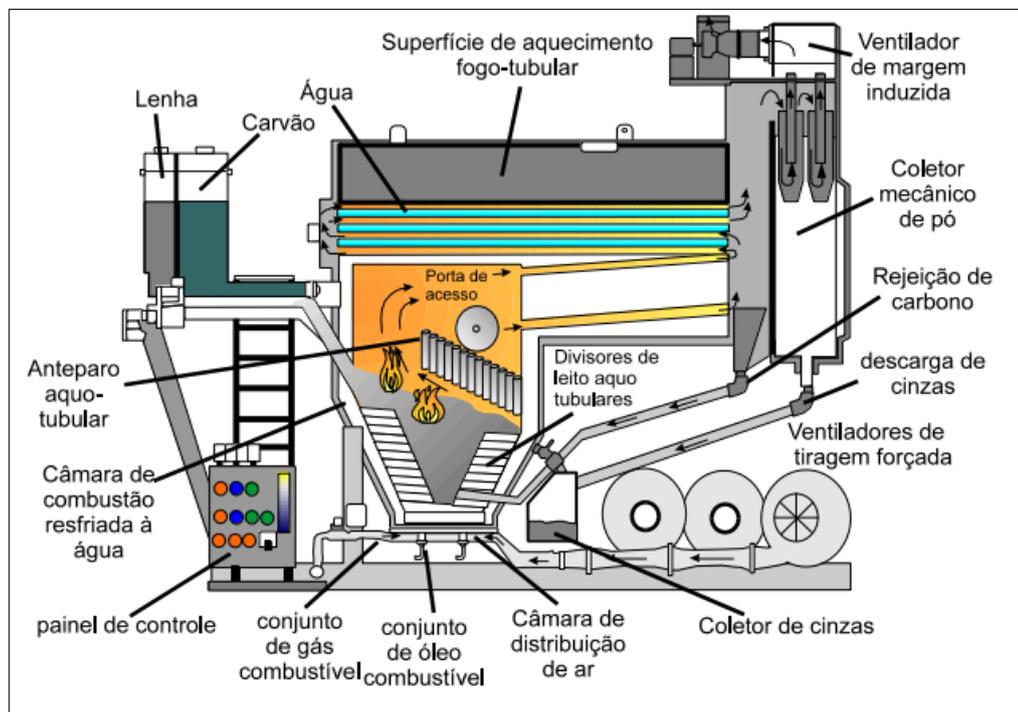
Fonte: Lora (2005).

3.2. Características de Projetos de Caldeiras Híbridas

Bazzo (2005), define que as caldeiras híbridas ou mistas são assim denominadas por apresentarem uma solução híbrida, apresentam o corpo superior flamotubular e fornalha lateral aquatubular, para queima de lenha, cavaco, briquete, pellet, bagaço, casca de castanha

ou qualquer tipo de biomassa. Foram desenvolvidas para atender as necessidades ambientais e econômicas de reaproveitamento dos resíduos sólidos urbanos, indústrias, vegetais e animais.

Figura 5 - Caldeira Híbrida



Fonte: SPIRAX SARCO

As caldeiras híbridas, em geral, não proporcionam todas as vantagens da aquotubular, como a segurança e a maior eficiência térmica, porém, é uma solução prática e eficiente quando se tem disponibilidade de combustível sólido a baixo custo. Tem ainda a possibilidade de queimar combustível líquido ou gasoso, com a instalação de queimadores apropriados. Em princípio, a eficiência de extração de energia destas caldeiras tende a ser menor que as das flamotubulares, devido à perda de calor pela antecâmara. Dificilmente as paredes frontais e traseira são revestidas de tubos, devido à dificuldade construtiva pelo pequeno tamanho da caldeira.

Por outro lado, uma versão mais moderna desse tipo de caldeira, buscando maior compacticidade tem sido desenvolvida por certos fabricantes nos últimos anos, alguns deles as denominam como Caldeiras “Ambitubulares”, as quais possuem uma antecâmara de combustão com paredes revestidas de tubos de água. Na antecâmara se dá a combustão de sólidos através de grelhas de diversos tipos, prevendo assim o espaço necessário para os maiores volumes da câmara de combustão necessários a combustão de sólidos, principalmente

em grandes tamanhos, tais como lenha em toras, cavacos, cascas, além da possibilidade de retirada de cinzas por baixo das grelhas (o cinzeiro). As caldeiras ditas Ambientubular tem com características principais:

- Grelha tubular refrigerada – maior durabilidade e fácil manutenção.
- Fornalha totalmente envolta com tubos de parede d'água aletados – menor perda de calor para o ambiente ou por refratários resultando em elevada eficiência térmica.
- Tiragem dos gases balanceada – controle de carga mais apurado, com uso de inversores de frequência, para otimização do consumo de energia elétrica.

Caldeiras a Combustível Sólido sobre Grelha

Há uma grande variedade de modelos de projetos de câmara de combustão e, principalmente, de grelhas que sustentam o combustível sólido a ser queimado, sendo que poucas modificações pode afetar o desempenho resultante. A potência térmica da caldeira pode aumentar em até 8%, com um processo de combustão mais limpo e rápido. O requisito essencial é que o volume da câmara seja suficiente para a combustão se processar adequadamente, principalmente quanto às linhas de fluxo do ar que escoam através da grelha. Esta condição é sempre satisfeita em caldeiras de radiação com fornalha integrada. A distância entre a soleira e os primeiros tubos devem ser suficientes para acomodar a chama. É, entretanto, necessário proteger a grelha com material refratário.

Considerando o fato que a caldeira venha a funcionar como multicom combustível, a própria câmara da fornalha pode aceitar que ocorra a combustão simultânea do gás e da biomassa. Caso haja aumento da capacidade de vaporização, pode ser necessária a substituição das válvulas de segurança. É recomendável instalar paredes de tubos de água em toda a fornalha, para resfriar as paredes refratárias, e aumentar a capacidade de evaporação da caldeira. Caso os painéis existentes sejam de tubos recobertos, deve-se descobrir os tubos, salvo nos pontos em contato com a chama.

A forma da fornalha, muitas vezes impossibilita a instalação de queimadores a gás na parede frontal. Os queimadores podem ser instalados nas laterais, mas em muitas caldeiras, existe pouco espaço para instalar corretamente os dutos de ar e os queimadores. Nesse tipo de conversão, a posição dos queimadores na fornalha é crítica: se instalados em posição muito mais alta, em relação ao queimador, a temperatura do vapor superaquecido torna-se excessiva,

entretanto, se instalados em posição muito abaixo, aquece a grelha, soleira e paredes inferiores. Como a chama de gás é menos emissiva que o combustível sólido ou óleo, a transmissão de calor por radiação é menor, e a temperatura dos gases no superaquecedor maior, a qualquer carga. Deve-se evitar o contato da chama com a soleira ou as paredes laterais da fornalha.

O volume dos produtos da combustão é cerca de 20% menor que o esperado, diminuindo a potência necessária de tiragem, e o ventilador de tiragem forçada pode ser observado. O aumento da pressão de tiragem é recomendado, pois facilita a combustão do gás pelo aumento da turbulência. Deve ser evitado qualquer infiltração de ar na fornalha, pois ela cria instabilidades, dificultando que a combustão se complete na fornalha, formando chamas longas. O ar de combustão deve ser igualmente distribuído por todos queimadores, de modo a evitar problemas e a perda de carga dos queimadores deve ser igual à que passa a existir no leito de combustão.

Quando o combustível sólido que alimenta a caldeira é pulverizado em pequenas partículas, não é necessário uma modificação da câmara de combustão para permitir o funcionamento da caldeira com ambos combustíveis. Em algumas fornalhas pode ser necessário modificar ou substituir o circuito de ar, e instalar os queimadores de gás em posição distinta dos queimadores de combustível sólido. O gás natural contém um maior teor relativo de hidrogênio que o óleo combustível e o combustível sólido. Um alto teor de hidrogênio no combustível produz um correspondente alto teor de vapor-d'água nos produtos da combustão, fator que contribui para reduzir a eficiência da fornalha, relativamente.

3.3. Princípios Norteadores sobre Construção e Operação de Caldeiras

Norma Regulamentadora 13- Caldeiras , Vasos de Pressão e Tubulações

Conforme Norma Regulamentadora 13, caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, executando-se os refervedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo.

Somente profissional habilitado, isso é, aquele que tem competência legal para o exercício da profissão de engenheiro nas atividades referentes a projeto de construção,

acompanhamento, operação e manutenção, inspeção e supervisão de inspeção de caldeiras e vasos de pressão, em conformidade com a regulamentação profissional vigente no País.

Toda caldeira deve possuir, no estabelecimento onde estiver instalada, a seguinte documentação, devidamente atualizada:

a) Prontuário da Caldeira, contendo as seguintes informações:

- Código de projeto e ano de edição;
- Especificação dos materiais;
- Procedimentos utilizados na fabricação, montagem, inspeção final e determinação da Pressão Máxima de Trabalho Admitida (PMTA);
- Conjunto de desenhos e demais dados necessários para o monitoramento da vida útil da caldeira;
- Características funcionais;
- Dados dos dispositivos de segurança;
- Ano de fabricação;
- Categoria da caldeira.

b) Registro de Segurança;

c) Projeto de Instalação

d) Projeto de Alteração ou Reparo

e) Relatórios de Inspeção.

De acordo com a NR13, as caldeiras são classificadas em 3 (três) categorias, assim com segue:

a) Caldeiras da categoria A são aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1960 kPa (19,98 kgf/cm²);

b) Caldeiras da categoria C são aquelas cuja pressão de operação é igual ou inferior a 588 kPa (5,99 kgf/cm²) e o volume interno é igual ou inferior a 100 l (cem litros);

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

A observância das Normas Regulamentadoras – NR não desobriga as empresas do cumprimento de outras disposições que, com relação à matéria, sejam incluídas em códigos de obras ou regulamentos sanitários dos estados ou municípios, e outras, oriundas de normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas- ABNT.

- ABNT NBR 16035-1:2012 Ed 2 – Caldeiras e vasos de pressão — Requisitos mínimos para a construção.
- ABNT NBR ISO 16528-1 - Caldeiras e vasos de pressão. Parte 1: Requisitos de desempenho;
- ABNT NBR ISO 16528-2 – Caldeiras e vasos de pressão. Parte 2: Procedimentos para atendimento integral da ABNT NBR ISO 16528-1;
- ABNT NBR 5413-Iluminância dos Interiores;
- ABNT NBR 12177 – Inspeção de Segurança;
- ABNT NBR 15417- Vasos de pressão (inspeção de segurança em serviço);
- ABNT NBR 12228 – Estocagem de gases altamente refrigerados.

3.4. Combustíveis

Toda substância capaz de reagir com o oxigênio e liberar energia térmica é identificada como combustível sólido, líquido ou gasoso (Bazzo, 1995). Carvalho Júnior e McQuay (2007), definem combustível como uma substância química que, quando em contato com um oxidante, pode produzir uma reação exotérmica, ou seja, uma reação que libera energia na forma de calor. Para liberação da energia térmica a mistura combustível/oxidante sofre reações químicas que ocorrem com altas velocidades.

Compostos formados por carbono e hidrogênio são tipicamente considerados bons combustíveis. Contudo na maior parte das vezes, carbono e hidrogênio ocorrem acompanhados de outros elementos, como enxofre, nitrogênio e mesmo oxigênio, além de pequenas quantidades de metais como vanádio e sódio. Sob certas condições, ferro, alumínio e outros compostos podem entrar na composição de combustíveis de aplicação particular. Para que uma dada substância seja considerada um combustível industrial é necessário que ela exista em grandes quantidades, possua baixo custo e que seja aplicável no processo industrial em consideração. Um combustível pode conter uma porção incombustível, que não fornece calor durante a combustão. Esta porção é composta de umidade e cinzas. Em carvões

minerais, por exemplo, o teor de umidade varia de 1 a 50% e o teor de cinzas de 2 a 30%. O combustível será de melhor qualidade quanto menor forem seus teores de umidade e cinzas (CARVALHO JÚNIOR e MCQUAY, 2007). Os combustíveis podem ser classificados segundo a origem ou método de obtenção (Tabela 2) e estado físico (Tabela 3).

Tabela 2 - Classificação dos combustíveis segundo a origem

Origem	Combustível Natural	Combustíveis derivados
Fósseis	Petróleo	Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), gasolina, óleos diesel, combustíveis e residuais
	Carvão Mineral	Gases manufaturados e coque
	Gás Natural	Gás Natural Liquefeito (GNL)
Naturais	Resíduos agroindustriais	Bagaço de cana, lixívia negra, casca de arroz e casca da castanha de caju
	Lenha	Carvão vegetal, gases manufaturados e metanol
	Resíduos animais	Biogás
Nucleares	Urânio	U-235 e U-238
	Tório	Th-232

Fonte: Teixeira e Lora (2004).

Tabela 3 - Classificação dos combustíveis segundo o estado físico

Estado Físico	Combustíveis
Sólidos	Carvão mineral, carvão vegetal, xisto, turfa e biomassa sólida
Líquidos	Gasolina, querosene, diesel e óleos combustíveis
Gasosos	Gás natural, GLP e biogás

Fonte: Teixeira e Lora (2004).

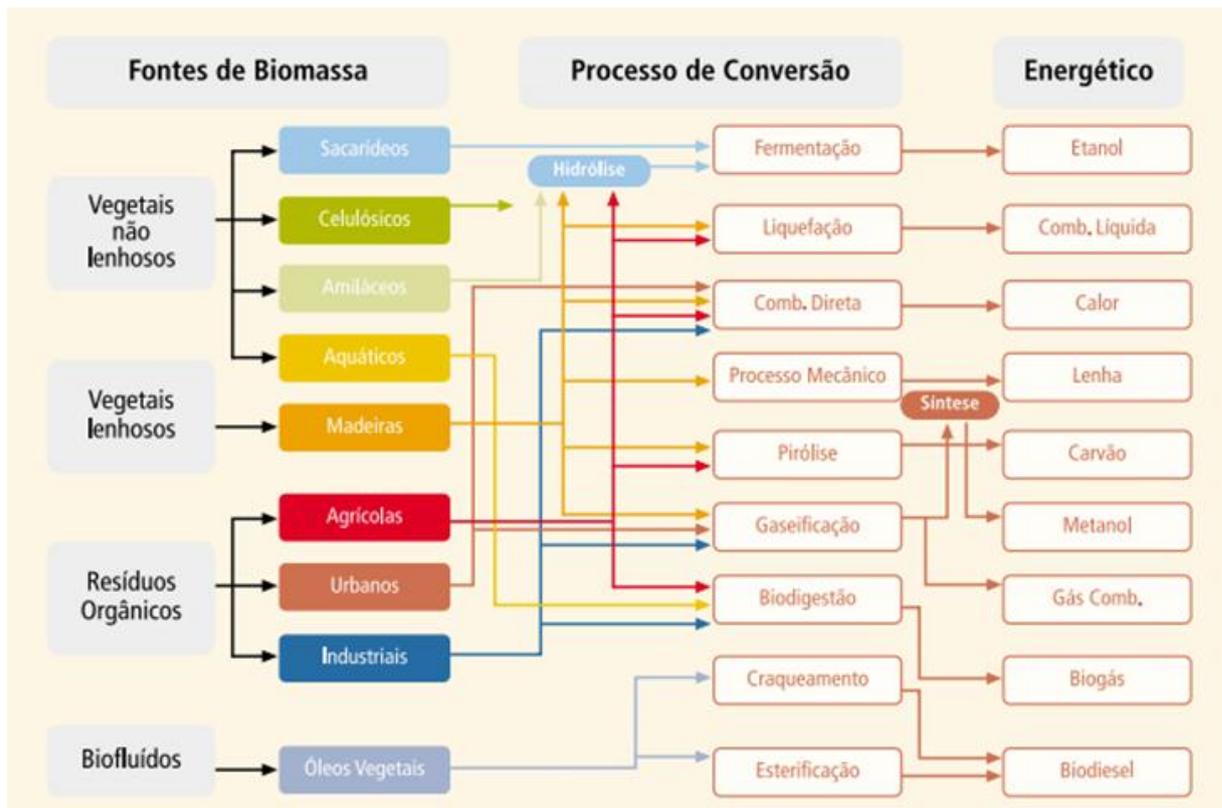
3.5. Biomassa

Alguns autores definem biomassa como qualquer material derivado da vida vegetal e que seja renovável em um período de tempo inferior a 100 anos (PROBSTEIN; HICKS, 1982). Higman e Van der Burgt (2003 apud FONSECA, 2009) definem, de forma abrangente, a biomassa como sendo qualquer combustível ou matéria bruta derivados de organismos que estiveram vivos recentemente. Com exceção de algumas microalgas e

matérias com altos índices de umidade, a biomassa se caracteriza, essencialmente, por ser uma matéria carbonada em estado sólido (FIGUEIREDO, 2012).

Lora (1997) define como sendo toda a matéria vegetal criada pela fotossíntese e seus derivados, tais como resíduos animais, agrícolas e florestais (biomassa tradicional) e a matéria orgânica presente em resíduos domésticos e industriais (biomassa moderna). Uma das principais vantagens da biomassa é que, embora sua eficiência reduzida, o seu aproveitamento pode ser feito diretamente, por intermédio da combustão em fornos ou caldeiras e aumenta-se essa eficiência do processo e diminui os impactos socioambientais com desenvolvimento de tecnologias de conversão mais eficientes, como a gaseificação e a pirólise. As principais tecnologias de aproveitamento energético da biomassa são descritas na Figura 6.

Figura 6- Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa



Fonte: Balanço Energético Nacional - BEN (1982).

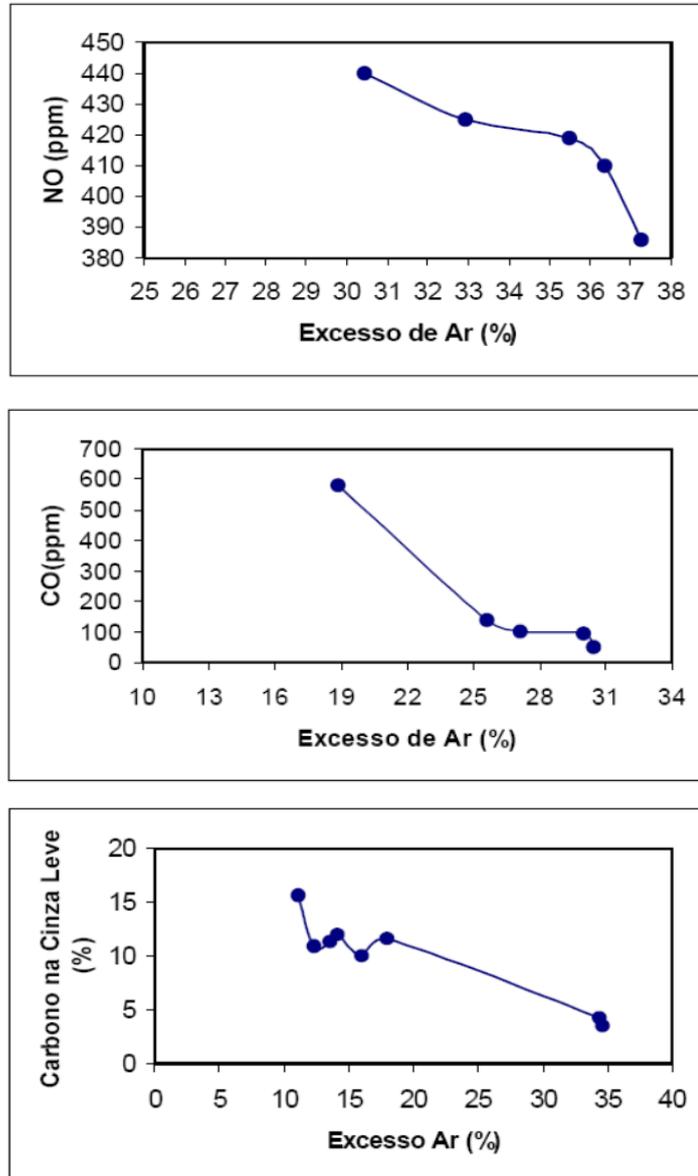
3.5.1. Propriedades das Biomassas Sólidas

Em geral, um estudo de combustão da biomassa passa por ensaios de laboratório, por amostragem em lotes de resíduos selecionados, para determinar alguns parâmetros físico-químicos importantes, os quais são caracterizados por: i) análise elementar (carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre, azoto, etc.); ii) análise imediata (voláteis, umidade e cinzas); iii) composição química (celulose, hemi-celulose e lignina); e iv) poder calorífico. Através dessa caracterização da biomassa, espera-se ter alguns resultados esperados que identifiquem a influência de determinados elementos na sua composição sobre o poder calorífico, o teor de cinzas, dentre outros.

3.5.2. Emissões de Caldeiras a Biomassa

Operando com biomassa, o processo de combustão ocorre variando-se a velocidade do escoamento do ar na câmara, de forma a simular diferentes razões de equivalência. Os resultados devem apontar para emissões de CO abaixo dos 1500 mg/Nm³, e os valores de oxigênio (O₂) deve ficar em torno dos 13%. As emissões de NO_x estão correlacionadas com o excesso de ar e com a fração de azoto na composição dos resíduos. A temperatura da câmara de combustão deve se estabilizar na faixa entre de 800-1000°C. Na Figura 7, apresenta as principais emissões da combustão da biomassa em função do excesso de ar (%).

Figura 7 – Algumas expectativas de emissões de CO, NOx e Particulado em função da razão ar-combustível na fornalha



Fonte: Pinheiro e Valle (1995).

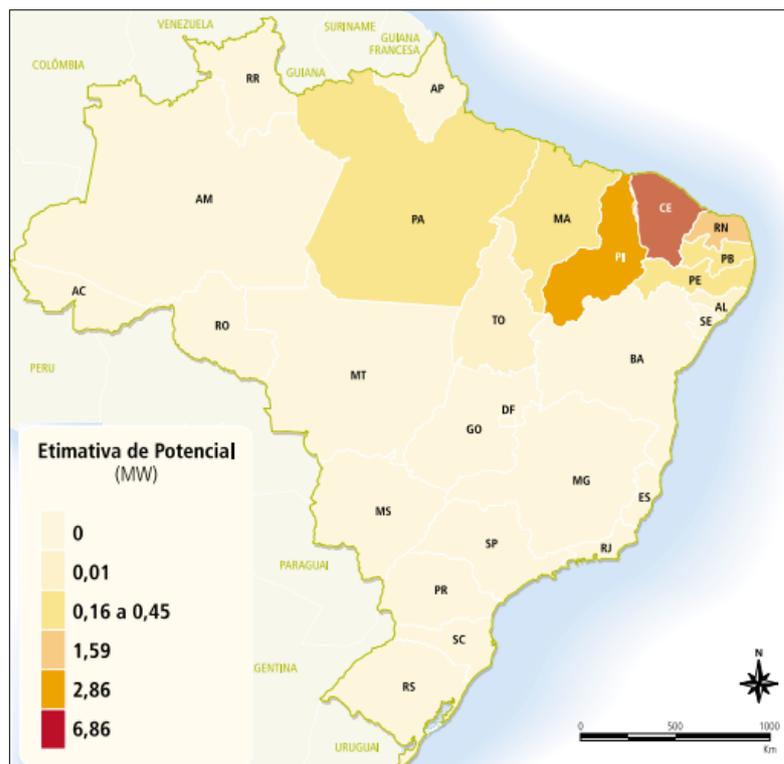
3.5.3. Casca da Castanha de Caju

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, o cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) é uma planta tropical, nativa do Brasil, espalhada em quase todo o seu território. A Região Nordeste, com uma área plantada superior a 650 mil hectares, responde por mais de 95% da produção nacional, sendo os estados do Ceará, Piauí, Rio Grande do Norte e Bahia são os principais produtores (EMPRAPA,2003).

A importância econômica e social da cadeia do caju no Brasil traduz-se pelo número de empregos diretos que gera, dos quais 35 mil no campo e 15 mil na indústria, além de 250 mil empregos indiretos nos dois segmentos. Para o Semi-Árido nordestino, a importância é ainda maior, pois os empregos do campo são gerados na entressafra das culturas tradicionais como milho, feijão e algodão, reduzindo, assim, o êxodo rural. Por sua vez, o Estado do Ceará detém mais de 80% da capacidade instalada do Brasil e no município de Fortaleza localiza-se um conjunto de indústrias que somam uma capacidade de processamento de 140 mil t/ano, responde por 45% da produção de castanha in natura nordestina e por 73% do volume processado em todo o Nordeste, dados da Conab, Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2007).

A destinação do resíduo, casca da castanha de caju, compõe um dos problemas ambientais da atividade agrícola e industrial pois é descartado normalmente nos aterros sanitários ocupando grande volume e diminuído sua vida útil. A descoberta de um valor agregado à casca gera o interesse de novos estudos com a finalidade da utilização dos subprodutos da cajucultura brasileira (FIGUEIREDO, 2009). Verifica-se na Figura 9 o potencial de geração de energia elétrica a partir da casca da castanha de caju.

Figura 8 - Potencial de geração de energia elétrica a partir da casca de castanha de caju



Fonte: Centro Nacional de Referência em Biomassa – CENBIO (2003).

4. POLUENTES ATMOSFÉRICOS E SEU CONTROLE

4.1. Poluentes Atmosféricos

Segundo definição da Resolução Resolução CONAMA 05/1989:

“Poluente atmosférico é toda e qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos em legislação, e que tornem ou possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.”

Na Tabela 4, tem-se as principais fontes de poluentes atmosféricos com seus respectivos poluentes.

Tabela 4 - Relação entre Fontes e seus Poluentes Característicos

Fontes		Poluentes
Classificação	Tipo	
Fontes Estacionárias	Combustão	Material particulado
		Dióxido de enxofre e trióxido de enxofre
		Monóxido de carbono
	Processo Industrial	Hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio
		Material particulado (fumos, poeiras e névoas)
		Gases: SO ₂ , SO ₃ , HCl e Hidrocarbonetos
Queima de Resíduos Sólidos	Mercaptans, HF, H ₂ S, NO _x	
Outros	Gases: SO ₂ , SO ₃ , HCl, NO _x	
	Material particulado	
Fontes Móveis	Veículos Automotores	Hidrocarbonetos, material particulado
		Material particulado, monóxido de carbono
	Aviões e Barcos Locomotivas	Óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos e óxidos de enxofre
		Óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio
Fontes Naturais		Ácidos orgânicos, hidrocarbonetos e aldeídos
		Material particulado – poeiras
Reações Químicas		Gases: SO ₂ , SO ₃ , HCl, NO _x , hidrocarbonetos
		Poluentes secundários - O ₃ , aldeídos
		Ácidos orgânicos, nitratos orgânicos
		Aerossol fotoquímico, etc

Fonte: Monteiro Júnior (2008).

4.2. Efeitos da Poluição Atmosférica na Saúde do Homem e no Ambiente

A poluição atmosférica causa vários efeitos prejudiciais, diretos ou indiretos, sobre a saúde e o bem estar humano, sobre os animais e a vegetação, sobre os materiais e as construções e sobre a atmosfera, solos e os corpos d'água (FELLENBEG, 1980).

Os efeitos podem ser classificados como agudos, de caráter temporário e reversível, em função do aumento da concentração de poluentes; e crônicos, de caráter permanente e cumulativo com manifestações a longo prazo (PIRES, 2005).

O impacto da poluição atmosférica sobre o bem-estar humano tem sido a principal motivação para o seu estudo e controle. A poluição atmosférica afeta principalmente os sistemas respiratórios, circulatórios e oftalmológicos, sendo o sistema respiratório a principal via de entrada dos poluentes, alguns dos quais podem alterar as funções dos pulmões (CANÇADO et al., 2006).

Os efeitos respiratórios da poluição do ar pela queima de biomassa em ambientes internos relacionam a exposição e o desenvolvimento de doença pulmonar crônica em adultos, além de bronquiectasias e fibrose pulmonar, e infecções respiratórias em crianças, provavelmente devido às alterações no mecanismo mucociliar, e à redução do poder de fagocitose dos macrófagos pulmonares (CANÇADO et al.,2006).

A queima de biomassa em ambientes abertos também produz poluição atmosférica e causa impacto sobre a saúde de indivíduos expostos. Esta poluição leva a um aumento significativo das internações hospitalares por doenças respiratórias em crianças, adolescentes e idosos, como por exemplo, com casos de asma, bronquite crônica e infecções respiratórias agudas (ARBEX et al., 2004).

A poluição atmosférica pode atuar ocasionando abrasão, deposição, remoção, ataque químico direto e indireto, ou corrosão sobre os materiais. E sobre o ambiente, a poluição do ar afeta a qualidade de vida da população, interferindo nas condições estéticas e prejudicando as atividades normais da comunidade. Acaba por resultar em redução da incidência de luz e deterioração da visibilidade, interferindo na capacidade de fotossíntese das plantas e causando danos à vegetação. Também a deposição de poluentes no solo, por sedimentação, pode alterar as condições do solo. Alguns efeitos associados com poluentes específicos são mostrados no Anexo A.

4.3. Equipamento de Medição e Controle de Emissões

Para determinar a composição dos produtos da combustão, e dispor de dados para os cálculos do coeficiente de excesso de ar, são utilizados analisadores de gases. Em geral, os analisadores de gases podem ser classificados em contínuos e volumétricos.

Os analisadores contínuos baseiam-se no uso de sensores que detectam a variação de diferentes propriedades físicas do gás, em função da concentração de diferentes compostos nele. Os analisadores volumétricos baseiam-se na absorção seletiva de diferentes componentes do gás por alguns reativos, sendo que a redução do volume da amostra corresponde com teor do gás dado.

Um dos equipamentos usados para medições é o aparelho eletrônico marca Flue Gas Analyser TESTO 335; o qual oferece medições básicas de O₂, CO, NO/NO_x, SO₂, pressão e temperatura, e calcula o teor de CO₂, NO_x, além da eficiência da combustão para uma larga escala de combustíveis, entre outras funções, sendo que já vem acoplada uma

impressora ao corpo do analisador. Possui opções para inclusão de sensor de NO₂, SO₂, H₂S, ou HCl (CONFOR, 2009).

O instrumento foi desenvolvido para medir a concentração de componentes gasosos de fumaça emitida por fornos, caldeiras, aquecedores ou incineradores, além de medir a temperatura dos gases e a pressão (CONFOR, 2009). Uma bomba elétrica interna retira a amostra do gás, através de uma sonda inserida no duto da chaminé. Um filtro retém as partículas e a água condensada, limpando a amostra antes da bomba a expelir para o tubo coletor, onde os sensores eletrônicos estão expostos aos gases (CONFOR, 2009). Quando o gás chega até os sensores, os sinais de saída analógicos são amplificados através de um multiplexor e convertidos em sinais digitais adequados para leitura por um microprocessador. Cada sensor tem sua própria placa de circuito impresso, contendo um amplificador e um chip de memória que contém a identificação do sensor e os dados de calibração (CONFOR, 2009).

5. FUNDAMENTOS DA COMBUSTÃO

A Termodinâmica é definida como a ciência que estuda a energia, suas formas, transformações, e suas interações com a matéria. Dada a sua generalidade, a termodinâmica é a ciência básica que serve como um ponto de partida para análise, desenvolvimento e projeto de todos os sistemas geradores de potência (ATKINS, 1984).

Segundo Shapiro (2004), as aplicações da termodinâmica na engenharia ajudaram a abrir caminho para melhorias relativas ao bem-estar humano, com avanços em áreas essenciais, tais como transporte, geração de energia e sistemas de condicionamento de ar de edificações. Fornece conceitos e métodos essenciais para uso de combustíveis fósseis de forma mais eficaz, desenvolvimento de tecnologia em energia renovável.

Segundo Souza et al. (2010) a termodinâmica está intimamente ligada à engenharia e conseqüentemente aos processos industriais quando as necessidades de melhoria no desempenho de projetos, resultando em aumento de produção, redução do consumo de recursos naturais e/ou escassos, redução de custos ou menor impacto ambiental. Por tanto seus conceitos são ferramentas imprescindíveis às questões de sustentabilidade, manutenção e qualidade de vida terrestre.

A Termodinâmica é a ciência que trata do calor e do trabalho, e daquelas propriedades das substâncias relacionadas ao calor e ao trabalho (SHAPIRO, 2004). A Termodinâmica utiliza ferramentas experimentais por meio de leis: primeira, segunda e

terceira leis da termodinâmica. Além destas, a lei zero que no desenvolvimento da Termodinâmica como uma ciência, precede a primeira lei.

O processo de combustão constitui o primeiro estágio na conversão da energia química do combustível em energia elétrica, é definido teoricamente como uma reação química exotérmica autossustentada, onde são oxidados os elementos combustíveis de um combustível. A finalidade do processo é a obtenção de calor, embora, algumas vezes, seja a obtenção de luz ou produtos químicos, por exemplo (GARCIA, 2002).

Para efeito de estimativa simplificada de cálculo, considera-se que o oxigênio necessário para a combustão é proveniente, geralmente, do ar atmosférico, o qual é constituído por cerca de 21% de O_2 e 79% de N_2 em volume. O oxigênio é o único elemento ativo no ar que combina com os elementos combustíveis do combustível para produzir calor, porém a grande quantidade de nitrogênio no ar não executa nenhum papel útil no processo de combustão, mas pode causar problemas de poluição do ar, especialmente quando a combustão não for adequadamente controlada.

Nas reações de combustão, a rápida oxidação dos elementos combustíveis do combustível resulta em uma liberação de energia à medida que os produtos de combustão são formados. Na maioria dos combustíveis os três principais elementos químicos que oxidam são o carbono, o hidrogênio e o enxofre. Na maioria das vezes, o enxofre praticamente não contribui para a liberação de energia, mas ele pode ser fonte significativa de problemas de poluição e corrosão.

Todo processo de combustão deve atender a princípios que assegurem economia ou eficiência na queima de combustível (BAZZO, 1995). Entretanto, na prática, em condições normais de operação, é muito difícil o aproveitamento integral da energia disponível no combustível, razão pela qual se faz necessário um trabalho de otimização com vistas à minimização das perdas de energia envolvidas no processo de combustão. Para que a combustão ocorra eficientemente são necessárias algumas condições:

- a) Temperatura alta o suficiente para iniciar e manter a queima do combustível;
- b) Mistura adequada do ar com o combustível;
- c) Tempo suficiente para a ocorrência da reação de combustão.

5.1. Estequiometria da Combustão

A quantidade mínima de ar que fornece oxigênio suficiente para a combustão completa de todo o carbono, o hidrogênio e o enxofre presente no combustível é denominada quantidade teórica de ar ou estequiométrica. Para a combustão completa com a quantidade teórica de ar, teoricamente os produtos consistiriam em dióxido de carbono, água, dióxido de enxofre, o nitrogênio que acompanha o oxigênio no ar e qualquer nitrogênio contido no combustível. Nenhum oxigênio livre apareceria nos produtos. Normalmente, a quantidade de ar fornecida é maior ou menor que a quantidade teórica. A quantidade de ar que é de fato fornecida é comumente expressa em termos da percentagem de ar teórico.

Reação Global para Combustão Completa Teórica

Um processo de combustão é dito completo quando todo o carbono presente no combustível é queimado formando dióxido de carbono, todo o hidrogênio é queimado formando água, todo o enxofre é queimado formando dióxido de enxofre e todos os demais elementos combustíveis forem totalmente oxidados, sendo a quantidade de calor liberada em cada reação denominada de entalpia de combustão.

➤ Combustão do Carbono:



➤ Combustão do Hidrogênio:



➤ Combustão do Enxofre:



Reação de Combustão com Excesso de Oxigênio

É aquela na qual a proporção entre combustível e o oxigênio permite que todo combustível seja queimado e ainda exista oxigênio nos gases de combustão.

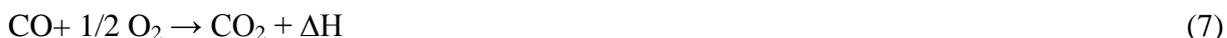


Reação de Combustão com Falta de Oxigênio

O processo de combustão é dito incompleto quando estas condições não forem satisfeitas, quando nos produtos resultantes desta reação aparecem substâncias combustíveis como, por exemplo, carbono nas cinzas, escórias e fuligem; gases combustíveis como monóxido de carbono, hidrogênio e hidrocarbonetos gasosos na fumaça. A reação de combustão incompleta do carbono presente no combustível é representada pela equação:



As substâncias resultantes destas últimas reações poderiam ainda ser oxidadas através das seguintes reações:



Onde o ΔH representa a energia liberada em cada reação.

Reação de Combustão com Ar Atmosférico

O ar atmosférico é uma fonte de baixo custo para obtenção do oxigênio necessário para combustão.

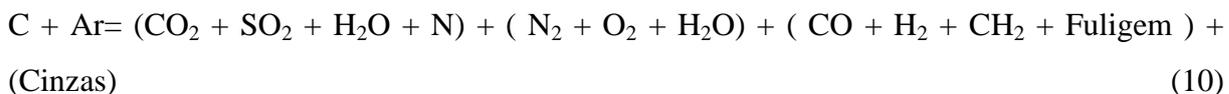


Segundo Lora (2000), a combustão só será completa com ar em excesso, em relação com o ar estequiometricamente necessário. Combustíveis gasosos queimam com menor excesso de ar. Na queima de combustíveis líquidos ou sólidos, onde as diferentes etapas de combustão acontecem na superfície de gotas ou partículas, a quantidade de ar em excesso requerida é ainda maior.

A combustão incompleta pela falta de ar implicará em desperdício de combustível, que pode ser identificada por diversos indicadores, tais como:

- Presença de CO, H₂ e CH₄ nos gases de combustão;
- Presença de partículas com fração considerável de carbono não queimado (fuligem ou “fumaça negra”).

A reação de combustão de um combustível C, sólido ou líquido, com ar, pode ser representada segundo o esquema:



Onde:

(CO₂ + SO₂ + H₂O + N) = produtos da oxidação completa;

(N₂ + O₂ + H₂O) = ar em excesso e, a umidade do combustível e do ar;

(CO + H₂ + CH₂ + Fuligem) = produtos gasosos e sólidos(fuligem) de combustão incompleta;

(Cinzas) = fração mineral não combustível.

O coeficiente de excesso de ar α .

Depende do tipo e característica do combustível, assim como da tecnologia de combustão utilizada (tipo de fornalha).

Tabela 5 - Ar requerido para queima de combustíveis

Combustível	Ar excesso (%)
Sólido	15-30%
Líquido	2-10%
Gasoso	5-10%

Fonte: Lora (2000).

$$\alpha = \frac{V_a}{V^{\circ}a} \quad (11)$$

Onde:

$V^{\circ}a$ = volume do ar teórico, corresponde à quantidade de ar mínima necessária para a combustão completa de um Kg de combustível. É calculado a partir das reações de combustão dos elementos que compõe o combustível;

V_a = volume do ar real correspondente à quantidade de ar realmente necessária para combustão completa de um Kg de combustível;

5.2. Balanço de Massa na Combustão

Para realizar o balanço de massa de combustão real, o qual é similar em princípio à combustão ideal, se precisa, geralmente, de dados relativos aos produtos, desta forma é realizado após a ocorrência do processo. Em qualquer caso, se estabelece o balanço de massa como:

$$\text{Massa de reagentes} = \text{Massa de Produtos}$$

5.3. A Primeira Lei da Termodinâmica Aplicada à Combustão. Entalpia da Reação

A primeira lei da termodinâmica declara que a variação total de energia de um sistema fechado de massa e identidade fixa é igual à transferência de calor para o sistema da vizinhança menos o trabalho realizado pelo sistema em sua vizinhança, ou seja, para uma mudança infinitesimal de estado.

Tem-se a aplicação das leis da termodinâmica que se dá em um sistema termodinâmico, definido como uma quantidade de matéria de massa e identidades fixas, sobre a qual a análise técnica é feita. Tudo externo ao sistema é chamado de vizinhança ou meio e o sistema é separado da vizinhança pelas fronteiras do sistema, que podem ser moveis ou fixas, também chamada de volume de controle.

Em forma de equação, a Primeira Lei da Termodinâmica para um volume de controle é dada por:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = Q_{vc} - W_{vc} + \sum_e m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gze \right) - \sum_s m_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gzs \right) \quad (12)$$

Onde:

E = energia;

Q_{vc} = Taxa de transferência de calor;

W_{vc} = Potência transmitida ao eixo;

\dot{m} = Vazão mássica;

h = Entalpia específica;

V = Velocidade do fluido;

g = Aceleração da gravidade;

Z = Desnível em relação ao referencial adotado;

vc = Volume de controle;

(e) = Entrada;

(s) = Saída.

Para nosso estudo de combustão o nosso interesse se focalizará nas considerações para um volume de controle, no qual o fluido atravessa a fronteira do sistema e as variações das energias cinéticas e potencial são desprezíveis, em regime permanente a primeira lei aplicada a combustão desse sistema é expressa como:

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{n}_c} - \frac{\dot{W}}{\dot{n}_c} = \sum_i (n_i \bar{h}_i)_{\text{produtos}} - \sum_i (n_i \bar{h}_i)_{\text{Reagentes}} \quad (13)$$

Onde:

Q = Taxa de transferência de calor;

W = Potência transmitida ao eixo;

nc = Número de mols combustível;

h = entalpia específica.

5.4. A Segunda Lei da Termodinâmica Aplicada à Combustão. Análise de Disponibilidade

Em contrapartida, a segunda lei determina se o processo de conversão de energia será possível ou não, ou seja, permite a determinação da máxima eficiência de um processo de conversão de energia e, além disso, ainda conduz a uma outra propriedade chamada entropia, a qual quantifica a parcela de energia que não pode ser transformada em trabalho (SHAPIRO, 2004).

Levando em consideração o conceito de produção de entropia, a equação da Segunda Lei da Termodinâmica para um volume de controle e escrita na forma de equação:

$$\Delta rS = \sum_i (n_i s_i)_{\text{produtos}} - \sum_i (n_i s_i)_{\text{reagentes}} + \sum_j \frac{Q_j}{T_j} + \sigma \quad (14)$$

Onde:

s = Entropia específica;

σ = Taxa de geração de entropia causada pela presença de irreversibilidades internas do volume de controle;

T = Temperatura;

$\sum_j \frac{Q_j}{T_j}$ = Taxa de geração de entropia em vários locais na superfície do volume de controle devido à transferência de calor.

Tratando-se de regime permanente, onde o termo $\Delta rS = 0$ a equação pode ser simplificada da seguinte forma:

$$\sum_i (niSi)_{produtos} - \sum_i (niSi)_{reagentes} + \sum_j \frac{Q_j}{T_j} + \sigma = 0 \quad (15)$$

5.5. Poder Calorífico, Temperatura Adiabática e Ar de Combustão

Poder Calorífico

O poder calorífico de um combustível é a quantidade de energia por unidade de massa ou volume, liberada durante a queima do mesmo (BAZZO, 1995). O poder calorífico varia de acordo com a origem do combustível, ou seja, o valor do poder calorífico de um combustível de origem fóssil é diferente do combustível de fonte renovável, pois a composição química destes dois tipos não é a mesma. No caso dos combustíveis fósseis sua composição química é de hidrocarbonetos e possui teor de enxofre. No caso das biomassas, sua composição química é de lignina, celulose e hemicelulose e são isentos de enxofre.

Segundo Silva et al. (2009) o poder calorífico pode ser classificado de duas formas: Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI).

O Poder Calorífico Superior é a quantidade de energia liberada na forma de calor, na combustão completa de uma quantidade definida de combustível com o ar, à pressão constante, sendo que a água formada no processo de combustão se encontra no estado líquido. A diferença do poder calorífico inferior em relação ao poder calorífico superior é que a água formada no processo de combustão se encontra no estado gasoso.

Para combustíveis que não possuem hidrogênio em sua composição, o valor do PCS é igual ao do PCI, pois não há formação de água e, portanto, consequente gasto de energia para a sua vaporização. Diante desse fato, o PCS será sempre maior ou igual ao PCI.

Segundo Silva et al. (2009), o poder calorífico inferior do combustível (PCIcomb) pode ser calculado através da somatória dos produtos das frações mássica ou volumétrica (X) de cada elemento (i) pelo seu respectivo PCI de acordo com a equação:

$$PCI_{comb} = 8100.C + 33960 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2214.S - 600.(9H + H 2O) \quad (16)$$

Onde:

C = Teor de carbono;

H = Teor de hidrogênio;

O = Teor de oxigênio;

S = Teor de enxofre;

H₂O = Teor de umidade.

O poder calorífico da equação é expresso em (kcal/kg). O poder calorífico inferior também poder ser determinado através do cálculo da entalpia de combustão (hrp), cujo cálculo é realizado mediante a diferença entre as entalpias dos produtos e reagentes em um processo de combustão completa, conhecendo-se os valores de temperatura e pressão. O poder calorífico inferior é igual à entalpia de combustão em módulo como mostra a equação:

$$hrp = \sum_p ns(hf + \Delta h) - \sum_r ne(hf + \Delta h) \quad (17)$$

Onde:

p = Produtos da combustão;

r = Reagentes;

n = número de moles;

h_{0f} = entalpia de formação no estado de referência;

Δh = variação de entalpia entre o estado de referência e o estado padrão.

Os subscritos (e) e (s) são relacionados aos elementos de entrada (reagentes) e saída (produtos) em um processo de combustão, respectivamente.

Assim em termos de entalpia de combustão, o poder calorífico inferior também pode ser escrito pela equação:

$$PCI_{comb} = |h_{rp}| \quad (18)$$

O poder calorífico inferior ou superior é o parâmetro indicador da quantidade de energia presente numa unidade de combustível geralmente em (kJ/kg) e a diferença entre os poderes caloríficos superior e inferior é igual a entalpia de vaporização do vapor de água presente nos gases de combustão. Tomando como referência para essa entalpia da ordem de 2400kJ/kg, tem-se a equação:

$$PCS - PCI = 2400. (M + .9 H_2) \quad (19)$$

Onde:

M = Percentual de umidade (%);

H₂ = Percentual corrigido de hidrogênio da análise elementar (%);

PCS = 33950 C + 144200.[H₂ - (O₂ 8/)]+ 9400.S.

Temperatura Adiabática de Chama

Gordon (1995) define como temperatura adiabática da chama, a temperatura atingida pela mistura ar combustível em um processo de combustão, onde não há troca de calor entre os reagentes e o meio, sem realização de trabalho ou variações de energia cinética e potencial. Admite-se que o trabalho no processo seja nulo e que as variações de energia cinética e potencial sejam nulas, assim a temperatura em questão é a máxima temperatura atingida pelos produtos. O excesso de ar tende a reduzir a temperatura adiabática da chama. Diante desse fato, a máxima temperatura de chama é alcançada quando a mistura ar-combustível está na condição estequiométrica.

Diante do exposto acima, a equação referente à temperatura adiabática de chama (T_{chama}) é dada por:

$$T_{chama} = T_{ar} + \frac{m_{comb}(PCI + \Delta h_{comb}) + (m_{ar} \cdot \Delta h_{ar})}{m_{gases} \cdot c_{pgases}} \quad (20)$$

Onde:

T_{ar} = Temperatura de entrada do ar de combustão;

m_{gases} = Vazão mássica dos gases à saída da câmara de combustão da caldeira;

m_{comb} = Vazão mássica do combustível;

c_{pgases} = Calor específico dos gases à saída da câmara de combustão da caldeira.

Ar de Combustão

O ar de combustão é o ar atmosférico que toma parte da combustão. Algumas vezes este ar entra em combustão sem maiores cuidados, mas em alguns casos pode receber um tratamento especial como filtragem, aquecimento, enriquecimento com oxigênio, etc. (SERFATY, 2007).

A medição deste ar na combustão industrial é muito difícil. Em instalações em que há sopradores para suprir o ar de combustão, a medição torna-se fácil, no entanto, na maioria dos casos, a quantidade de ar de combustão é calculada com base na análise dos gases de combustão (SILVA e SILVA, 2008).

A boa eficiência da combustão deve-se ao ar de combustão e suas condições, devendo ser dada especial atenção ao mesmo (SILVA e SILVA, 2008). No processo de combustão industrial é praticamente impossível obter uma combustão completa sem que haja excesso de ar, devido não se conseguir a homogeneização perfeita entre o ar e o combustível em face das eventuais variações de temperatura e pressão atmosférica, sendo dificilmente obtido o aproveitamento máximo do combustível (GARCIA, 2002).

Entretanto o excesso de ar de combustão além de certo limite pode levar ao prejuízo, pois o ar que não participa da combustão tende a esfriar a chama sem contribuir para a reação. Quanto maior for o excesso de ar, maior será a velocidade de circulação dos gases quentes com conseqüente perda de calor para a chaminé. Por outro lado, a insuficiência de

suprimento desse ar também resulta em prejuízo, ocasionando uma combustão incompleta do combustível (SILVA e SILVA, 2008).

Também é preciso considerar a velocidade do ar no processo de combustão, já que o calor da chama é transferido ao material a ser aquecido, entre outros meios, também por condução dos gases quentes, os quais devem ter um contato com o material com uma duração mínima para que essa transferência seja eficiente (SERFATY, 2007). Essa relação é a quantidade mínima de ar necessária para assegurar a combustão completa.

Segundo Lima et al. (2003) o excesso de ar deve ser mantido num patamar razoável, pois se extrapolar muito determinados valores pode resultar em aumento de perdas de energia e emissão de NO_x . Dependendo do excesso de ar e do grau de mistura obtido os gases de exaustão podem resultar nos produtos da combustão completa, ou seja, CO_2 , vapor d'água e SO_2 mais os produtos da combustão incompleta como combustível não queimado, CO , além de hidroxilas e aldeídos, N_2 (sempre presente), O_2 não usado, partícula de cinzas e NO_x . Desses todos a água, o oxigênio e o nitrogênio não são poluentes De acordo com Lima et al.(2003) há dois parâmetros que indicam o excesso de ar fornecido: o coeficiente de diluição e o coeficiente de excesso de ar.

5.6. Balanço Térmico, Eficiência e Cálculo Térmico

A análise energética de um sistema de combustão considera a energia associada aos fluxos de combustível e ar, reação química da combustão, transferência de calor para o fluido de trabalho e as perdas de energia representadas pelos gases de exaustão, cinzas, combustão parcial, purgas e fluxo de calor pelas fronteiras do equipamento (RIBEIRO, 2002). Observa-se na Figura 10, um esquema da análise energética do processo de combustão. O balanço térmico de uma caldeira deve considerar:

➤ Q_d = Entrada energética ou “calor disponível” que na Figura 10 é equivalente ao poder calorífico do combustível (PCIt); produção da caldeira (geração de vapor), uma vez queimado o combustível na fornalha, os produtos de combustão a alta temperatura cederão parte do calor disponível às diferentes superfícies de aquecimento;

➤ Q_e = Energia absorvida pelas superfícies evaporativas;

➤ $Q_{aq.a}$ = Energia absorvida no aquecedor de ar;

➤ Q_{ec} = Energia absorvida no economizador;

➤ Q_{sa} = Energia absorvida no superaquecedor.

6. METODOLOGIA

6.1. Critérios para Coleta de Informações de “Campo”

Foram estudadas 3 (três) caldeiras, uma que utiliza combustível sólido, outra com combustível líquido, a terceira combustível gasoso. Dentre os combustíveis analisados estão a biomassa casca da castanha de caju (CCC), petróleo de baixa fluência (BPF) e gás natural. Foram comparados as caldeiras quanto os aspectos sociais, técnicos, econômicos, ambientais.

Em relação as condições de segurança das caldeiras foram visitadas além da JBS/SA, outras 09 empresas de setores diversos verificando quando possível sistemas montados e desmontados, para análise das condições estruturais se estavam em conformidades com as normas de segurança. Particularmente, a empresa JBS S/A se destaca entre as demais, pois foi a única que realiza Inspeção de Segurança Periódica, segundo as Normas NR-13 do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE).

Foi realizado uma vistoria nas dez empresas visitadas levando em consideração os seguinte pontos principais como está apresentado na Tabela 7.

Para analisar as medições de emissões atmosféricas nas caldeiras, deve-se obter até dez amostragens em cada campanha de coleta dos gases, seguindo as normas ABNT/NBR 10.700/89 e ABNT/NBR 10.701/89, utilizando-se do aparelho eletrônico Flue Gas Analyser TESTO 335, com sonda inserida em chaminés.

O planejamento do balanço térmico da queima de combustível da casca da castanha de caju da caldeira de biomassa da JBS/SA foi demonstrado por duas referências bibliográficas, livros “Geração de Vapor” de Edson Bazzo (1995) e “Geração Termelétrica” de Electo Lora et. al (2004) para efeito de comparação de os valores para cada metodologia de cálculo. E, foram realizadas a partir da concentração dos fumos de combustão das medições de emissões, a fim de definir através de cálculos, para cada processo a quantidade de combustível utilizada, a quantidade de oxigênio utilizada, o teor de enxofre do combustível e o excesso de ar da combustão e eficiência térmica. A caracterização físico-química dos combustíveis e também seus aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais, foram obtidos através de pesquisa em sites, artigos técnicos, livros e conhecimentos práticos mencionados por profissionais.

Tabela 6 - Lista de Verificações segundo a NR-13

Lista de Verificação	Sim	Não
Equipamento está trabalhando abaixo do PMTA?		
Válvula de segurança está em boas condições		
Válvula de segurança está com pressão de abertura ajustada em valor igual ou inferior ao PMTA		
O manômetro está em bom estado e funcionamento		
Existe sistema de drenagem rápida e funcionando bem		
Sistema de indicação para controle de nível de água que evite o superaquecimento por alimentação deficiente funcionando?		
A placa de identificação está em local visível de fácil acesso?		
Existe duas saídas de emergência, amplas e em direções destinadas?		
A ventilação é permanente com entradas de ar que não possam ser bloqueadas?		
Existe acesso fácil e seguro, necessário a operação e manutenção da caldeira?		
Existe sistema de captação e lançamento dos gases e material particulado provenientes da combustão para fora de área de operação?		
Existe iluminação conforme as normas vigentes e iluminação de emergência, sinalização de segurança- NR-26?		
Existe manual de operação da caldeira?		
Relatório de Inspeção ?		
Prontuário de Inspeção ?		
Proteção contra Incêndio Nr-23?		

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1.1. Recomendações

A bibliografia de Parilov e Ushakov (1986) indica para que os resultados das avaliações serem representativos, deve-se assegurar que a operação da caldeira esteja em regime estacionário e algumas recomendações principais como:

- Tempo mínimo de operação da caldeira desde a partida até o início do teste:
 - Caldeira com fornalhas de queima em suspensão e refratário leve (camada isolante) e invólucro metálico (36h);
 - Caldeiras antigas com refratário de tijolo e paredes de grande espessura (48h);
 - Caldeiras com grelhas mecânicas (24h).

- Tempo de manutenção da carga pesquisada antes do teste-3horas;
- Duração do passo entre dois regimes experimentais (se a diferença de cargas não é maior que 20% - 25%):
 - Caldeiras com refratário leve (2h);
 - Caldeiras antigas com refratário de tijolo e paredes de grande espessura (4h)

- Variação permissível da carga durante o teste: 10%
- Duração do teste durante a determinação da eficiência pelo método inverso- 3 horas
- Oscilações permissíveis dos parâmetros de trabalho da caldeira durante os testes (em comparação com os valores nominais):

Caldeiras	Geração de Vapor	Pressão
Capacidade 51-200 t/h	6%	12%
Capacidade de até 50 t/h	15%	15%

- Temperatura: Água de alimentação e ar quente- 5%

6.2. Descrição da Instalação Industrial

As caldeiras onde foram realizadas as avaliações ficam na cidade de Cascavel-CE, na empresa JBS Couros, Figura 11, exceto a de gás natural que fica situada no estado do Rio Grande do Norte.

Figura 10 - Imagem de satélite de instalação das caldeiras a óleo (seta vermelha) e a biomassa (seta azul)



Fonte: Google Earth.

Quadro 1 – Pontos de Dados

Ponto	Local	Coordenadas WGS
Seta Vermelha	Área 1 (Caldeira óleo)	Latitude: 04°08'37.3"S Longitude: 38°20'47.3"W
Seta Azul	Área 2 (Caldeira biomassa)	Latitude: 04°08'36.9"S Longitude: 38°20'45.1"W

6.2.1. Condições Operacionais das Caldeiras

Como a capacidade poluente das caldeiras é grande, por liberar gases e partículas para atmosfera, a empresa JBS couros buscou uma nova alternativa no mercado tendo em vista a necessidade de realizar investimentos para crescimento econômico e proteção ambiental

Antes de realizar a comutação da caldeira a óleo “ATA-AWN-12” pela caldeira a biomassa “FAM-15” foi realizado um estudo de viabilidade, ou seja, foi resgatado os valores gastos com petróleo de baixa fluência (B.P.F) d de 1999 à 2007 na JBS couros. Foi realizado um levantamento no sistema de aplicativos e produtos (SAP), sistema que controla transações de compra e venda de produtos e materiais entre outras funções. A caldeira de biomassa funciona desde 2007 e hoje a empresa esta realizando levantamento para comparar a eficiência econômica e ambiental em relação a caldeira de óleo BPF. Segue um breve descrição das caldeiras deste estudo.

Caldeira óleo: O Gerador de Vapor ATA-AWN é totalmente automático, do tipo flamatubular, de construção horizontal, com três passagens de gases, dotado de fornalha excêntrica e fornecido com sistema de combustão próprio para queima de óleo.

Figura 11 – Caldeira óleo



Fonte: Autor (2016).

Quadro 2 - Características Técnicas da Caldeira Óleo

Dados de Placa	
Modelo	ATA AWN-12
Superfície de Aquecimento	252 m ²
Produção de Vapor com água à 20°C	12000kg/h
Pressão máxima de trabalho permitida(PMTP)	170 psig
Pressão máxima de operação	150 psig
Eficiência Térmica	91%
Consumo de óleo	872kg/h
Taxa de Evaporação	48 kgv/h
Temperatura de saída dos gases de combustão	210°C
Teor de CO2 nos gases de combustão	13%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Caldeira à biomassa: A caldeira FAM-15 é um equipamento destinado a produzir e acumular vapor, sob pressão superior a atmosférica, utilizando como fonte de energia um combustível sólido “casca da castanha de caju”. Este combustível é depositado na grelha, onde é queimado.

A consequência disso é a geração de calor. Os gases provenientes da queima do combustível transferem o calor para água da caldeira primeiramente na fornalha (que é aquatubular refrigerada) e logo após em dois passes de tubos instalados no cilindro gerador (seção flamatubular). Com o aquecimento da água e elevação de sua pressão até a de trabalho, inicia-se a evaporação na superfície do nível de água e esse vapor é utilizado no processo (ALLBORG,2015).

Figura 12 - Caldeira Biomassa



Fonte: Autor (2016).

Quadro 3 – Características Técnicas Caldeira Biomassa

Dados de Placa	
Modelo	Allborg-FAM_15
Número de Ordem	10741
Ano de Fabricação	2007
Código de Projeto	ASME-1/2004
Superfície de Aquecimento	500 m ²
Produção de Vapor com água à 20°C	15000kg/h
Pressão máxima de trabalho permitida(PMTP)	170 psig
Pressão máxima de operação	150 psig
Eficiência Térmica	86%
Vaporização por kg de combustível	3,71kgvapor/kg biomassa
Taxa de Evaporação	30 kgv/h
Volume de água nível normal/ caldeira cheia	23,20m ³ / 27,5m ³
Categoria	B

Fonte: Autor (2016).

6.3. Análise da Emissão de Gases

A análise dos gases emitidos nas caldeiras consistiu em comparar a concentração de CO de acordo com o oxigênio referencial de combustão utilizado, segunda a Resolução nº. 054 de 2006, da Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará – SEMACE, e confrontar os resultados finais com a mesma resolução, e também a comparação entre eles. Os dados foram comparados a Resolução nº. 382, de 2006, e com a Resolução 436/11- Anexo I do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, pois de acordo com o artigo 6º da mesma só “se aplica às fontes fixas de poluentes atmosféricos cuja Licença de Instalação venha a ser solicitada aos órgãos licenciadores após a publicação desta Resolução”.

Quadro 4 - Dados Técnicos

Dados técnicos do equipamento		Caldeira 01	Caldeira 02	Caldeira 03
01	Marca	AALBORG	ATA	ATA
02	Tipo	FAN 15	AWN 12	M-ISSION-3P
03	Ano de fabricação	2007	1998	1998
04	Produção de vapor	15000Kg/h	12000Kg/h	2000 kg/h
05	Combustível	CCC*	BPF**	GÁS NATURAL

Fonte: Autor (2016). *CCC (Casca da Castanha de Caju),**BPF (Óleo combustível denso).

Justificativas:

- Atender ao termo de Referência da SEMACE;
- Cumprir medidas da Legislação Ambiental vigente.

Instrumentação de Medição: Flue Gas Analyser TESTO 335; SMOKE TEST da CONFOR

Ponto de Amostragem: Furo de 1/2” localizado na chaminé de saída dos gases de combustão da caldeira para acesso da aparelhagem ao fluxo gasoso.

Condições Físicas das Emissões

Caldeira 01:

Combustível: Casca da Castanha de Caju;

Temperatura dos Gases: 162,0°C;

Temperatura Ambiente: 30,0°C;

Diferença de Temperatura: 132,0°C;

Potência Térmica Nominal: 13, 2 MW;

Norma de Referência: Resolução CONAMA n° 382/06 para caldeira 01.

Caldeira 02:

Combustível: BPF;

Temperatura dos Gases: 158,5,0°C;

Temperatura Ambiente: 30,0°C;

Diferença de Temperatura: 128,5°C;

Potência Térmica Nominal: 10,5 MW;

Norma de Referência: Resolução CONAMA 436/11 para caldeira 02.

Caldeira 03:

Combustível: GÁS NATURAL;

Temperatura dos Gases: 180,5,0°C;

Temperatura Ambiente: 30,0°C;

Diferença de Temperatura: 150,5°C;

Potência Térmica Nominal: 10,5 MW;

Norma de Referência: Resolução CONAMA 436/11 para caldeira 03.

Composição da Pluma Gasosa**Caldeira 01:**

Gás Avaliado	Unidades	Valores obtidos	Valores de referência*	C/NC
O2	%	3,4	-----	-----
CO2	%	15,9	-----	-----
NOX	mg/Nm ³	195	650	C
SO2	mg/Nm ³	84	----	---
Densidade Calorimétrica	%	<20	-----	-----
Material Particulado	mg/Nm ³	290	520	C
Eficiência	%	85	----	----

(*) Legenda: Ref: Resolução Conama 382/06- Anexo IV C- Conforme NC- Não Conforme , Na- Não Aplicável

Caldeira 02:

Gás Avaliado	Unidades	Valores obtidos	Valores de referência*	C/NC
O2	%	11,8	-----	-----
CO2	%	6,8	-----	-----
NOX	mg/Nm ³	298	1000	C
SO2	mg/Nm ³	105	2700	C
Densidade Calorimétrica	%	<20	----	----
Material Particulado	mg/Nm ³	140	250	C
Eficiência	%	84	----	----

(*) Legenda: Ref: Resolução Conama 436/11- Anexo I C- Conforme NC- Não Conforme Na- Não Aplicável

Caldeira 03:

Gás Avaliado	Unidades	Valores obtidos	Valores de referência*	C/NC
O ₂	%	5,2	-----	-----
CO ₂	%	8,62	-----	-----
NOX	mg/Nm ³	118	1000	C
SO ₂	mg/Nm ³	105	2700	C
Densidade Calorimétrica	%	<20	----	----
Material Particulado	mg/Nm ³	140	250	C
Eficiência	%	84	----	----

(*) Legenda: Ref: Resolução Conama 436/11- Anexo I C- Conforme NC- Não Conforme Na- Não Aplicável

Com base nas medições realizadas pelo equipamento Smoke-Test e de correlações matemáticas chegou-se à conclusão, representativa da estimativa de material particulado nas emissões lançadas à atmosfera pelas caldeiras no período estudado. Destaca-se o elevado índice de excesso de ar da Caldeira 02, pode-se considerar duas hipóteses, erro técnico de medição ou significa a introdução de um volume a mais de ar comburente contendo mais oxigênio e nitrogênio inertes estão diminuindo energia do sistema à saída dos gases às custas da energia liberada do combustível.

Condições de Tempo Prevalentes:

- Velocidade média dos ventos: 5,5m/s
- Temperatura local: 30,0°C;
- Umidade relativa do ar: 66%

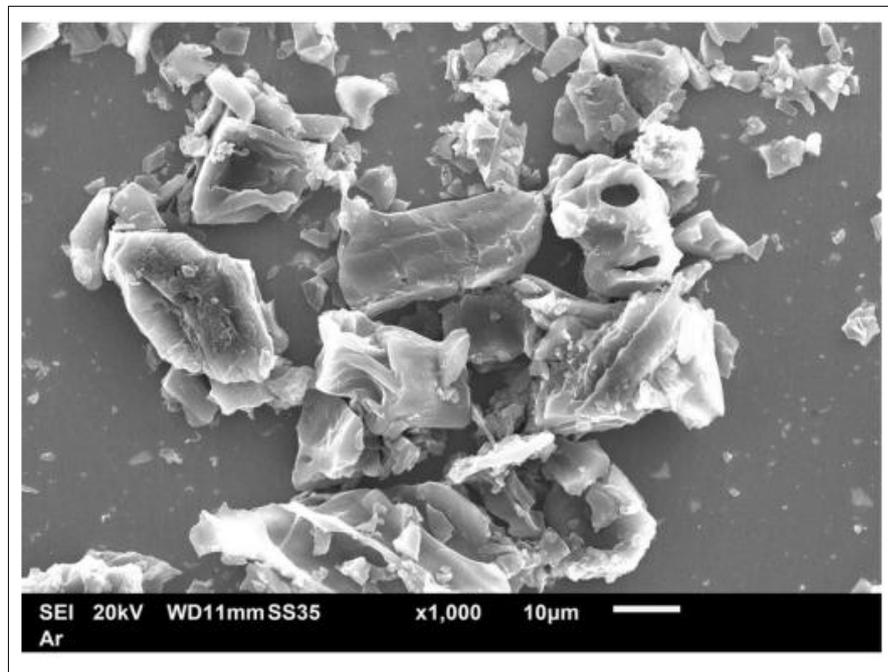
6.4. Metodologia para Avaliação da Caldeira FAM-15 (Biomassa – CCC)

Para a sequência de cálculo foram utilizados duas metodologias segundo os livros “Geração de Vapor” de Edson Bazzo(1995) e “Geração Termelétrica” de Electo Lora et. al (2004).

Para a determinação da composição do combustível, foram utilizados a análise caracterização da casa castanha de caju obtida por Renata Moreira (2015) e o Laudo de Biomassa do Laboratório de Combustão e Energias Renováveis (LACER).

Na Figura 13 descreve um estudo de espectrografia realizado na queima da castanha de caju, onde as micrografias não apresentaram morfologia definida e ausência de poros de ambos os materiais. Altos teores de carbono encontrados justifica ser um parâmetro importante para a utilização desta cinza como carvão ativado ou combustível sólido. O bio-carvão pode ser utilizado diretamente como combustível ou ser submetido a um novo processamento para produzir produtos químicos de valor agregado, como o carvão ativado (HERNANDEZ-MENA ET AL., 2014; SHARIFF ET AL, 2014).

Figura 13 - Micrografias do bio-carvão obtidos sob fluxo de ar



Fonte: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (2015)

No trabalho citado, a casca de castanha foi utilizada para pirólise. O resultado é mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Caracterização da biomassa

	Casca da castanha de caju <i>in natura</i>	Casca da castanha de caju triturada
Teor de cinzas - % massa	7,9	5,3
Matérias voláteis - % massa	69,8	70,9
Carbono fixo - % massa	22,3	23,8
Enxofre - % massa	<0,1	<0,1
Oxigênio - % massa	34,80	38,06

	Casca da castanha de caju <i>in natura</i>	Casca da castanha de caju triturada
Carbono - % massa	50,5	49,9
Hidrogênio - % massa	6,20	6,04
Nitrogênio - % massa	0,6	0,7
PCS – MJ kg⁻¹	21,3	20,7
PCI – MJ kg⁻¹	20,0	19,4
PCS – BU – MJ kg⁻¹	19,4 / 19,3	18,8 / 18,9
PCI – BU – MJ kg⁻¹	18,0 / 17,9	17,4 / 17,5

Fonte: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (2015)

Através das equações presentes nestas literaturas, é possível fazer uma medição do ar requerido para que a combustão seja completa e, juntamente com os dados obtidos na empresa, obter-se o excesso de ar que deve ser utilizado na caldeira. Todo processo de combustão opera com excesso de ar para assegurar a combustão completa, evitando perda de eficiência pela formação de CO. É importante salientar que excessos inferiores ao recomendado levam à queima incompleta, ao passo que valores de excesso de ar além do necessário, acarretam perdas adicionais de calor arrastado pela chaminé (ELETROBRAS, 2003), pois quanto maior for o excesso de ar, maior será a velocidade de circulação dos gases quentes com consequente perda de calor para a chaminé. Além disso, o ar que não participa da combustão tende a esfriar a chama sem contribuir para a reação. A caldeira deve ser operada com o menor excesso de ar que assegure a queima completa do combustível, e com o mínimo de infiltrações de ar (PINHEIRO e CERQUEIRA, 1995). O cálculo do excesso de ar tem grande importância para o diagnóstico da operação da caldeira. Quando seu valor está

fora daqueles recomendados para o tipo de caldeira em questão, medidas operacionais terão que ser tomadas visando corrigir o processo de combustão (LORA et al., 2004).

METODOLOGIA DE EDISON BAZZO (1995)

Sequência de Cálculo

Em um combustor, a quantidade de ar a fornecer é determinada pela estequiometria, que depende da composição do combustível e dos requisitos de excesso de ar. O coeficiente de excesso de ar depende do tipo e das características do combustível. Por exemplo, para combustíveis sólidos, o excesso de ar requerido está entre 15-30%, para líquidos, encontra-se entre 2-10%, já para os gasosos é comum o excesso de ar entre 5-10% (KUZNETSOV et al., 1977). Também há a influência da tecnologia de combustão (tipo de fornalha). Vale a pena ressaltar que a caldeira utilizada é do tipo grelha e que a mesma apresenta, para efeito de cálculo, um valor de 20 % de carbono no cinzeiro. Com base na composição elementar do combustível nesta metodologia, primeiramente calcula-se:

- m^*_{ar} = massa estequiométrica do ar (kg/kg comb)

$$m^*_{ar} = 138,2 \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right) = 5,865066 \text{ kg/ kg comb}$$

c = teor de carbono do combustível em base úmida (kg/kg combustível);

h = teor de hidrogênio do combustível em base úmida (kg/kg combustível);

s = teor de enxofre do combustível em base úmida (kg/kg combustível)

o = teor de oxigênio do combustível em base úmida (kg/kg combustível);

Para analisar o volume de ar requerido, deve-se saber que o ar tem 21% de oxigênio e que o volume molecular deste é 22,4 m³n/kmol. Fazendo-se as alterações devidas na equação acima, para combustíveis sólidos e líquidos, o volume estequiométrico de ar seco para queimar cada kg de combustível é dado por:

- V^*_{ar} = volume estequiométrico de ar (m³n/kg comb)

$$V^*_{ar} = 106,7 \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right) = 4,528239 \text{ m}^3\text{n/kg comb}$$

Para o cálculo dos gases de combustão, a massa e o volume de gases podem ser calculados, respectivamente, como:

- m^*_g = massa estequiométrica de gases de combustão (kg/kg comb)

$$m^*_g = 44\left(\frac{c}{12}\right) + 9\left(h + \frac{w}{4}\right) + 64\left(\frac{s}{32}\right) + m^*_{ar} w_{ar} + 0,7685 m^*_{ar} = 7,328647 \text{ kg/ kg comb}$$

- V^*_g = Volume estequiométrico de gases de combustão (m³n/kg comb)

$$V^*_g = 22,4 \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{2} + \frac{w}{18} + \frac{s}{32} + \frac{mar w}{18}\right) + 0,79 * V^*_{ar} = 5,778052 \text{ m}^3\text{n/kg comb}$$

w = Teor de umidade do combustível (kg/kg combustível)

Utilizando-se a fórmula pelo dióxido de carbono, calcula-se o volume de gases secos. Para combustíveis sólidos e líquidos:

- V^*_{gs} = Volume estequiométrico de gases de combustão em base seca m³n/kg comb

$$V^*_{gs} = 22,4 \left(\frac{c}{12} + \frac{s}{32}\right) + 0,79 * V^*_{ar} = 4,433873 \text{ m}^3\text{n/kg comb}$$

- $\%CO^*_2$ = porcentagem máxima de de CO₂ em condições de queima ideal

$$\%CO^*_2 = \left(\frac{2240}{12} \frac{c}{V_{gs}}\right) = 19,3046\%$$

O coeficiente de excesso de ar, pela fórmula do dióxido de carbono é dado por:

- e = coeficiente de excesso de ar

$$e = \%CO^*_2 / \%CO_2 = 1,214126$$

CO^*_2 = Porcentagem máxima de CO₂ em condições de queima ideal;

CO_2 = Porcentagem de CO₂ medida na base da chaminé.

Onde é obtido através do analisador de gases, assumindo, portanto, o valor de 15,9 %. Outra maneira de se calcular o excesso de ar pode ser levando-se em consideração apenas os valores medidos na base da chaminé, ou seja, utilizando-se apenas os dados obtidos pelo analisador de O₂ (Tabela 10). Sendo assim, o excesso de ar pode ser calculado das seguintes formas:

- A primeira alternativa é calculada como segue abaixo:

$$e = \frac{21}{21 - \%O_2} = 1,193182\%$$

A segunda alternativa é calculada pela seguinte fórmula:

$$e = \frac{100 - \%CO_2 - \%O_2 - \%CO}{100 - \%CO_2 - 4,7\%O_2 + 0,88\%CO} = 1,176217\%$$

Aconselha-se a utilizar a última abordagem, pois a mesma é a única que leva em consideração a porcentagem de CO.

- V_{gs} = volume real de gases secos de combustão (m^3n/kg comb)

$$V_{gs} = V^*_{gs} + (e-1)V^*_{ar} = 5,231826 \text{ m}^3n/kg \text{ comb}$$

- m_{ar} = massa real de ar (kg/kg comb)

$$m_{ar} = e \cdot m^*_{ar} = 6,898591 \text{ kg/kg comb}$$

- m_g = massa real de gases de combustão (kg/kg comb)

$$m_g = m^*_g + (e - 1) m^*_{ar} = 8,362172 \text{ kg/kg comb}$$

- V_{ar} = volume real de ar (m^3n/kg comb)

$$V_{ar} = e \cdot V^*_{ar} = 5,326192 \text{ (m}^3n/kg \text{ comb)}$$

- V_g = volume real de gases de combustão (m^3n/kg comb)

$$V_g = V^*_g + (e-1)V^*_{ar} = 6,576005 \text{ (m}^3n/kg \text{ comb)}$$

Com base no poder calorífico

Segundo Bazzo, se a composição química do combustível não for conhecida, exige-se o emprego de outros métodos para o cálculo do volume estequiométrico de ar e de gases de combustão. Dessa forma, valores aproximados podem ser determinados a partir do poder calorífico inferior (Pci) do combustível.

Faz-se necessário obter o valor do poder calorífico inferior da casca da castanha de caju, para isso, Bazzo sugere as seguintes equações com uma boa aproximação:

$$\text{Pci} = \text{Pcs} - 2440 (9h - w)$$

Onde:

$$\text{PCS} = 33900c + 141800(h - O/8) + 9200s = 17934,65 \text{ kJ/kg comb}$$

$$\text{PCI} = 16902,22 \text{ kJ/kg comb}$$

Para combustíveis sólidos recomendam-se as seguintes equações:

$$\text{V}^*_{\text{ar}} = (1,01/4186) * \text{PCI} + 0,5 = 4,578175$$

$$\text{V}^*_{\text{g}} = (0,89/4186) * \text{PCI} + 1,65 = 5,243639$$

O valor utilizado para a porcentagem de excesso de ar será de 1,176217%

$$\text{Var} = \text{volume real de ar (m}^3\text{/kg comb)}$$

$$\text{Var} = e \text{V}^*_{\text{ar}} = 4,578175 \text{ (m}^3\text{/kg comb)}$$

$$\text{V}_g = \text{volume real de gases de combustão (m}^3\text{/kg comb)}$$

$$\text{V}_g = \text{V}^*_{\text{g}} + (e-1)\text{V}^*_{\text{ar}} = 6,050392 \text{ (m}^3\text{/kg comb)}$$

Considerações importantes para a realização do Balanço de Energia da Caldeira de Biomassa

- Pressão de trabalho – 8 bar (corresponde à pressão de entrada da água de alimentação e de saída dos gases de exaustão.); $h_{\text{vapor}} = 2769,1 \text{ kJ/kg vapor}$;
- Considerar como líquido saturado, Temperatura de entrada da água – 105°C;
- $h_{\text{água}} = 440,17 \text{ kJ/kg água}$
- Temperatura de entrada do ar – 75°C;
- Para uma geração de vapor de 10t/h (25/9 kg/s), o consumo de combustível é de 1,696 t/h (0,4711 kg/s). Para cada um quilo de casca de castanha consumido, 6,1062 quilos de vapor são produzidos;
- A temperatura de referência mantém-se em 25°C.

- Calculado o PCI= 16902,22 kJ/kg comb
- Calor específico médio da casca da castanha de caju é aproximadamente 1,76 KJ/(KgK) a uma temperatura média de 30°. Considerar que as cinzas tenham um calor específico médio de 0,838 kJ/ (KgK), (AALBORG INDUSTRIES, 2015)
- Considerar que o carbono tenha um calor específico médio de 0,88 kJ/ (kgK)

Energia Útil, $q_{\text{útil}}$

O calor extraído é a quantidade de energia absorvida pelo fluido de trabalho. A diferença entre essa energia e aquela disponível na câmara de combustão é devida às perdas supracitadas. Nesse caso, considera-se que a caldeira estudada não tem purga ou reaquecimento de vapor. Ele pode ser dado por:

$$q_{\text{útil}} = m_{\text{vapor}}(h_{\text{vapor}} - h_{\text{água}})$$

Onde:

h_{v} = Entalpia do vapor de água saturado à pressão de trabalho;

h_{a} = Entalpia da água de alimentação na temperatura de entrada e pressão de trabalho

$$q_{\text{útil}} = 27/9(2769,1 - 440,17) = 6986,79 \text{ KW}$$

Energia Disponível, $q_{\text{disponível}}$

O calor disponível na fornalha está associado ao poder calorífico do combustível e da energia correspondente ao transporte de massa de combustível e de ar. Ele pode ser avaliado em termos do poder calorífico superior (energia total fornecida ao equipamento) ou em termos do poder calorífico inferior (energia realmente disponível na câmara). Esse calor pode ser dado por:

$$q_{\text{disp}} = m_{\text{comb}}(\text{PCI} + \Delta h_{\text{comb}} + m_{\text{ar}}(\Delta h_{\text{ar}} + w_{\text{a}} \Delta h_{\text{umidade do ar}}))$$

Onde:

$$\Delta h_{\text{comb}} = c_{\text{comb}}(T - T_0) = 1,75(303 - 273) = 52,5 \text{ KJ/Kg comb}$$

$$\Delta h_{ar} = 0,9848 (T-T_o) + 0,765 \cdot 10^{-4} (T^2 - T_o^2) = 29,762 \text{ KJ/Kg comb}$$

$$\Delta h_{umidade} = 1,910(T-T_o) + 0,172 \cdot 10^{-4} (T^2 - T_o^2) + 0,10410^{-4} (T^3 - T_o^3) = 135,37781 \text{ KJ/Kg comb}$$

$$q_{disp} = 8374,470045 \text{ KW}$$

Energia Perdida, q_{perdas}

A perda total de calor é obtida pela soma das perdas por transferência de calor e pelas perdas associadas aos fluxos que deixam a caldeira, com exceção, naturalmente, do fluxo de vapor.

$$q_{perdas} = q_{gs} + q_v + q_{cinzas} + q_{cp} + q_{paredes}$$

Perda de calor sensível com os gases secos de combustão,

A perda associada à entalpia dos componentes do gás seco gerado na combustão pode ser representada por:

$$q_{gs} = m_{comb} (44/12 c \Delta h_{CO_2} + (0,7685 m^*_{ar} + n) \Delta h_{N_2} + (e-1) m^*_{ar} \Delta h_{ar})$$

Onde:

$$\Delta h_{CO_2} = 0,983 (T-T_o) + 1,302 \cdot 10^{-4} (T^2 - T_o^2) + 1,864 \cdot 10^{-4} (1/T - 1/T_o) = 93,14860203 \text{ kJ/kg comb}$$

$$\Delta h_{N_2} = 0,971 (T-T_o) + 0,746 \cdot 10^{-4} (T^2 - T_o^2) = 107,054283 \text{ kJ/kg comb}$$

$$\Delta h_{ar} = 0,9848 (T-T_o) + 0,765 \cdot 10^{-4} (T^2 - T_o^2) = 104,7691575 \text{ kJ/kg comb}$$

$$q_{gs} = 420,197843 \text{ KW}$$

Perda de calor com a umidade dos gases de combustão, q_v

A parcela de calor perdida associada à umidade dos gases de combustão leva em conta a energia associada à água formada na queima do hidrogênio do combustível, a umidade do próprio combustível e a umidade do ar de combustão, considerando-se que não há vapor de

nebulização ou vapor consumido por sopradores de fuligem (BAZZO, 1995). Essa perda pode ser calculada como:

$$q_v = m_{\text{comb}}(9h + w + w_{\text{ar}} * e * m_{\text{ar}}) \Delta h_{\text{vapor}}$$

Onde:

$$\Delta h_{\text{vapor}} = 1,91 * (T - T_o) + 0,172 * 10^{-4} (T^2 - T_o^2) + 0,104 * 10^{-6} (T^3 - T_o^3) + 2440 = 2598,419 \text{ KW}$$

$$q_v = 717,6969 \text{ KW}$$

Perdas de calor com as cinzas, q_{cinzas}

Na queima de combustíveis sólidos, a saída de cinzas implica perdas que, a rigor, devem ser calculadas para cada caso específico. Na prática, este valor pode ser estimado pela em kJ/kg de combustível, na qual o valor 1.170 representa um valor médio aproximado da entalpia sensível das cinzas (h_{cz}). pela equação:

$$q_{\text{cinzas}} = m_{\text{comb}}(z h_{\text{cz}}) = 0,8642 \text{ KW}$$

cz = massa de cinza obtida pela massa de combustível (kg/kg de comb.)

Perdas de Calor por combustão parcial, q_{cp}

A perda de calor por combustão incompleta não é muito comum, mas é importante avaliar sua representação no balanço geral através da medição do conteúdo de CO nos gases de exaustão na base da chaminé. A perda por combustão parcial pode ser representada por:

$$c_{\text{nq}} = 0,20(c_{\text{nq}} + \text{teor de cinzas}) = 0,00263$$

$$q_{\text{cp}} = m_{\text{comb}}[(c_{\text{nq}} * (33900 + \Delta h_c) + 126 V_{\text{gs}} \% \text{CO})] = 72,01644 \text{ KW}$$

Perdas de Calor pelas paredes, q_{paredes}

A perda de calor pelas superfícies externas da caldeira, já que ela é maior que a temperatura ambiente.

$$q_{\text{paredes}} = 1\% q_{\text{disp}} = 83,744 \text{ KW}$$

$$q_{\text{perdas}} = 1294,519383 \text{ KW}$$

Rendimento Térmico

O rendimento térmico representa a energia realmente aproveitada do total da energia disponível.

$$\eta = \frac{m_{\text{vapor}}(h_{\text{vapor}} - h_{\text{água}})}{m_{\text{comb}}(PCI + \Delta h_{\text{comb}} + m_{\text{ar}}\Delta h_{\text{ar}} + w_{\text{ar}}m_{\text{ar}}\Delta h_{\text{umidade do ar}})}$$

Substituindo os respectivos valores, tem-se : $\eta = 0,834296375$ (83,423 %)

METODOLOGIA DE LORA E SILVA (2004)

Utilizando-se dos mesmos parâmetros para o método de BAZZO, utilizou-se para LORA. Na sequência, apresentam-se as equações para o cálculo de V_a° , V_g° , $V_{g,}$, e ainda da entalpia dos gases h_g durante a combustão de um kg de combustível. Nestas equações C-carbono, H-hidrogênio, S-enxofre, O-oxigênio, W- umidade, expressos em porcentagem.

Nesta metodologia calcula-se

V_a° = Volume ar teórico, calculado a partir das reações de combustão dos elementos que compõem o combustível;

$$V_{\text{ar}}^\circ = 0,0889(c + 0,375 s) + 0,265h - 0,0333o = 4,519004 \text{ m}^3\text{n/kg comb}$$

V_g° = volume dos gases gerados durante a combustão de um kg de combustível para $\alpha=1$;

$$V_g^\circ = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}$$

Onde as variáveis são calculadas pelas seguintes fórmulas:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01866(c+0,375s) = 0,856258 \text{ m}^3\text{n/kg comb}$$

O volume teórico de nitrogênio é calculado como:

$$V^{\circ}N_2 = 0,79 V^{\circ}a + 0,008n = 3,574372 \text{ m}^3\text{n/kg comb}$$

O volume teórico de vapor de água é calculado como:

$$V^{\circ}H_2O = 0,111h + 0,012w + 0,016 V^{\circ}a = 0,797433 \text{ m}^3\text{n/kg comb}$$

$$V^{\circ}g = 5,228063 \text{ m}^3\text{n/kg comb}$$

O coeficiente de excesso de ar α depende do tipo e características do combustível:

α = coeficiente de excesso de ar, referido seu valor, na saída da fornalha;

O excesso de ar pode ser obtido através da seguinte fórmula:

$$\alpha = CO_2^{\text{max}} / CO_2$$

Onde:

CO_2^{max} é calculado abaixo:

$$CO_2^{\text{max}} = 21 / (1 + \beta)$$

Onde β representa o coeficiente de Bunte, calculado como:

$$\beta = 2,35 * (h - 0,126 o + 0,038 n) / (c + 0,375s) = 0,085468$$

Portanto,

$$CO_2^{\text{max}} = 19,34649$$

Segue que,

Para $CO_2 = 15,9 \%$ (valor obtido pelo analisador)

$$\alpha = 1,21676$$

V_a = volume de ar real, correspondente à quantidade de ar realmente necessária para a combustão completa de um kg

$$V_a = \alpha V^{\circ}a$$

$$V_a = 5,498544 \text{ m}^3\text{n/kg comb}$$

V_{gs} = volume de gases secos gerados

$$V_{gs} = V_{RO_2} + V^{\circ}N_2 + (\alpha - 1)V^{\circ}a$$

$$V_{gs} = 5,41017 \text{ m}^3\text{n/kg comb}$$

V_g = volume dos gases gerados durante a combustão de um kg de combustível para $\alpha > 1$;

$$V_g = V^{\circ}g + 1,0161(\alpha - 1)V^{\circ}a$$

$$V_g = 6,223373 \text{ m}^3\text{n/kg comb}$$

Energia útil, q_{útil}

q_{útil} = m_{vapor}(h_{vapor} - h_{água})

q_{útil} = 6986,79 KW

Energia disponível, q_{disp}

Q_{disp} = m_{comb} PCI = 8060,667 kJ/s

Energia perdida, q_{perdas}

Q_{perdas} = q_{disp} - q_{útil} = 1073,877 KJ/s

Rendimento térmico,

$$\eta = \frac{q_{util}}{q_{disp}} = 0,866776 \text{ (86,677\%)}$$

Quadro 5 – Comparativo dos Valores Calculados para Casca da Castanha de Caju

Edson Bazzo		Lora e Silva	
m*ar(kg/kgcomb)	5,86506623	V ^o a (m ³ n/kgcomb)	4,51900438
V*ar(m ³ n/kgcomb)	4,528238544		
m*g(kg/kgcomb)	7,328646504		
V*g(m ³ n/kgcomb)	5,778052086	V ^o g (m ³ n/kgcomb)	5,22806304
V*gs(m ³ n/kgcomb)	4,433872671		
%CO2*	19,30459887	CO2max	19,346485
e	1,214125715	A	1,21676006
	1,193181818		
	1,176217143		
V*gs(m ³ n/kgcomb)	5,231825929	Vgs(m ³ n/kgcomb)	5,41016985
mar(kg/kgcomb)	6,898591443		
mg(kg/kgcomb)	8,362171717		
Var(m ³ n/kgcomb)	5,326191801	Va(m ³ n/kgcomb)	5,49854407
Var(m ³ n/kgcomb)	4,578174576		
Vg(m ³ n/kgcomb)	6,050391825	Vg(m ³ n/kgcomb)	6,22337331
n(%)	0,834296375	n(%)	0,86677565

Observa-se que as metodologias dos dois autores apresentam valores próximo com erros de aproximação até 10% de resíduo de truncamento ou arredondamento.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1. Aspectos Comparativo das Caldeiras

No Quadro 6, são apresentadas as caracterizações das caldeiras, quanto ao consumo, regime de operação, poluentes e potência térmica.

Quadro 6 - Caracterização das Caldeiras

Combustível	CCC	BPF	Gás Natural
Potência Térmica (MW)	6,986	0,32	0,334
Poluentes Amostrados	CO e O ₂	CO e O ₂	CO e O ₂
Regime de Operação (dia/mês)	30	15	20
Consumo de Combustível	477t/mês	21t/mês	130m ³ /dia

Fonte: Autor (2016).

O poluente amostrado analisado para comparação com os padrões, estabelecido pela Resolução 054/06, é somente o CO e a análise do O₂ referencial, pois as caldeiras apresentam o valor de potência térmica nominal menor que 10 MW.

Na tabela 10, apresenta o custo da tonelada de vapor produzido por cada combustível utilizado e o custo mensal para as empresas onde foi realizada a pesquisa, a partir do consumo de combustível na caldeira.

Tabela 8 – Demonstrativo de Custo Operacional para Produção de Vapor

Combustível	Mês		
	Dezembro/ 2015		
	Consumo	Custo Médio	Total
Casca (ton)	477	R\$ 332,72	R\$ 158.707,68
Prod. Vapor (ton)	2894	R\$ 54,84	R\$ 158.707,68
Óleo OB-80 (ton)	9	R\$ 1.363,68	R\$ 12.273,08
Prod. Vapor (ton)	117	R\$ 104,90	R\$ 12.273,08
Gás Natural (ton)	3,069	R\$ 1.410,56	R\$ 4.329,00
Prod. Vapor (ton)	73,774	R\$ 58,68	R\$ 4.329,00

Fonte: Autor (2016).

O preço unitário para casca da castanha de caju apresentou valores mais acessíveis e resultou em um menor custo mensal para a empresa. O óleo BPF apresentou o maior preço para produção de vapor. Mas esse resultado depende muito também de cada empresa e o regime de operação da caldeira, variando bastante o volume de combustível utilizado. O gás natural apresenta o menor preço unitário, porém um valor mensal elevado devido ao grande volume de combustível necessário na caldeira. Já o diesel apresenta elevado valor unitário e custo mensal também relativamente alto.

A comparação da caldeira de biomassa com as caldeiras de óleo (BPF) e Gás Natural gases, de uma forma geral mostra pontos positivos e negativos para ambos os grupos de combustíveis. De forma objetiva são comparados os aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais segundo BRINOP,2009; DALLABONA et al., 2007).

Quadro 7 - Aspectos Técnicos Comparativos da Biomassa e, Óleos e Gases

BIOMASSA	ÓLEOS E GASES
Combustível heterogêneo tanto na forma como na composição;	Combustíveis homogêneos;
Menor poder calorífico	Maior poder calorífico
Automatização de manuseio do combustível tem operação mais difícil	Automatização de manuseio dos combustíveis tem operação mais fácil
Mão-de-obra é necessária para atividades como alimentação da caldeira	Mão-de-obra não é necessária
Maior área necessária para depósito do combustível	Pouca área necessária para depósito do combustível
Umidade bastante presente representa um maior consumo de combustível	Praticamente sem umidade
Produz cinzas na combustão	Inexistência de cinzas na combustão
Risco de acidentes durante utilização é mínimo	Alto risco de acidentes com os combustíveis

Fonte: Brinop (2009) e Dallabona et al. (2007).

Quadro 8 - Aspectos Econômicos, diferenciando os combustíveis sólidos, dos líquidos e gasosos

BIOMASSA	ÓLEOS E GASES
Mais barato para a produção	Mais caro para a produção
Preço é definido por mercado regional, não sendo vulnerável às mudanças macro-econômicas	Preço é definido por mercado externo, com grande dependência das mudanças macro-econômicas
Manuseio geralmente realizado por funcionário	Investimentos para o manuseio e utilização (aquecedores, bombas injetoras, etc.)
Produção depende de reposição florestal, projetos de manejo, etc.	Maiores produtores estão em áreas de permanente conflito

Fonte: Brinop (2009) e Ambiente Brasil (2009)

Quadro 9 - Aspectos Ambientais Comparativos da Biomassa e, Óleos e Gases

BIOMASSA	ÓLEOS E GASES
Combustível renovável	Combustível finito
Retira CO ₂ da atmosfera	Somente emite CO ₂ para a atmosfera
Produz cinzas na combustão	Inexistência de cinzas na combustão
Leis severas de proteção da origem do combustível	Controles rígidos das emissões de gases
Imagem ecologicamente positiva para a empresa	Causas de desastres e acidentes ambientais

Fonte: Gatto et al., (2003) e Boubel (1994).

Quadro 10 - Aspectos Sociais, diferenciando os combustíveis sólidos, dos líquidos e gasosos

BIOMASSA	ÓLEOS E GASES
Emprega intensivamente mão-de-obra local	Pouca ou nenhuma mão-de-obra na utilização do combustível
Empregos requerem menor qualificação, e gera mais empregos em relação ao investimento	Emprego gerado custa altos investimentos
Relação com agricultura e agroindústria	Empresas globais são os grandes produtores
Recursos ficam na região	Recursos não ficam na região

Fonte: Fellenbeg (1980).

A biomassa da casca da castanha de caju, em particular, apresenta vantagens econômicas na aquisição do produto, era resíduo agroindustrial, porém diversas dificuldades técnicas operacionais, como dificuldade de armazenamento devido ao grande volume e à alimentação da caldeira, como pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 - Armazenamento da Casca da Castanha de Caju



Fonte: Autor (2016).

Já os óleos e gases, os quais são armazenados em recipientes compactos e alimentados de forma automática, no entanto necessitam de maior investimento para o uso.

Figura 15 - Armazenamento do BPF



Fonte: Autor (2016).

No aspecto social, a utilização dos óleos e dos gases resulta em menor empregabilidade, pois seus processos de manuseio e alimentação são praticamente todos automatizados, enquanto a biomassa necessita de trabalho manual e o operador não precisa de qualificação para a atividade. As atividades com óleos e com gases necessitam de investimento maior com treinamento ou contratação de operadores dos equipamentos.

Ambientalmente, a produção e uso da biomassa se mostram vantajosos, por ser um combustível renovável e se apresentar em grande quantidade. Além disso, a produção de óleos e gases ocasiona a emissão de poluentes para a atmosfera. Em contrapartida as emissões na queima dos óleos e gases são bem menores e com produção maior de energia, pelo fato de possuírem elevado poder calorífico. Já a biomassa apresenta grande dificuldade de controle da combustão devido sua heterogeneidade, emitindo maior concentração de poluentes para a atmosfera.

Figura 16 – Chaminé da Caldeira de Biomassa



Fonte: Autor (2016).

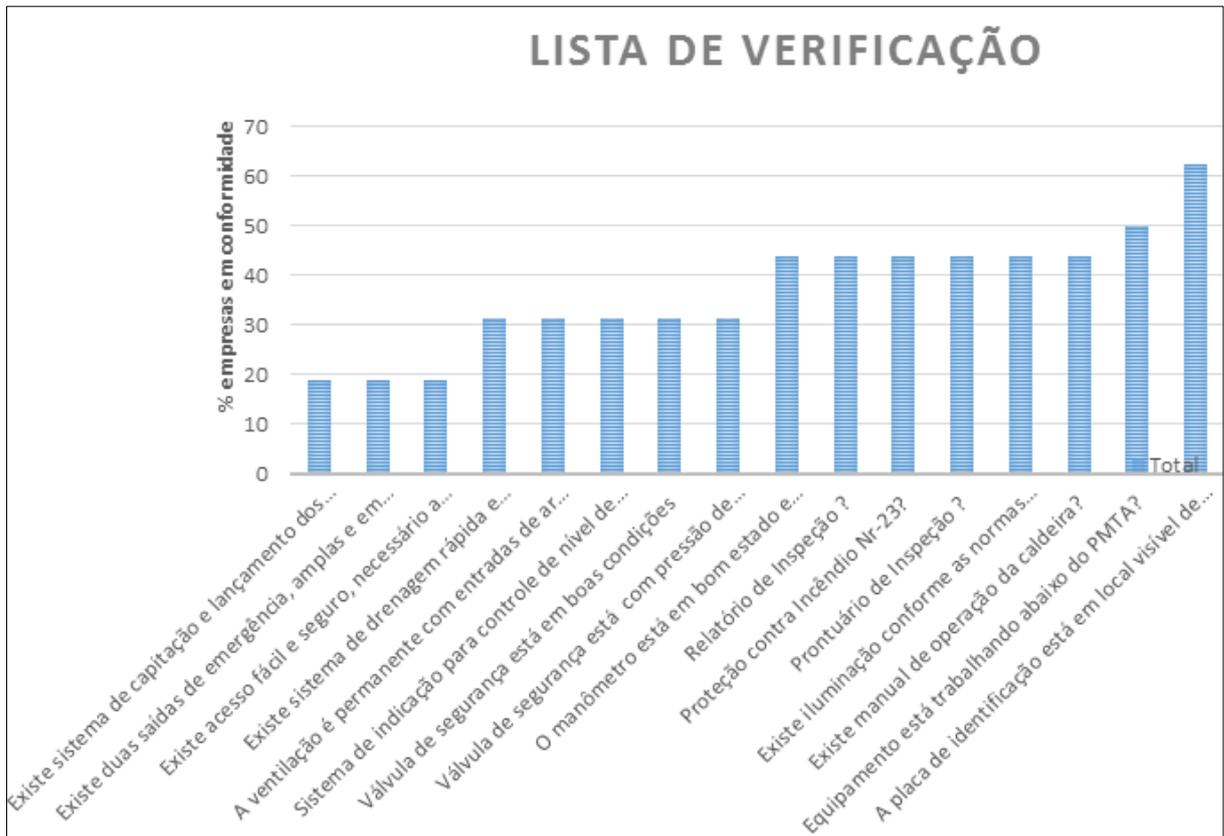
7.2. Aspectos de Segurança das Caldeiras

O atendimento à Norma Regulamentadora NR-13 é condição legal para se operar Caldeiras e Vasos de Pressão em toda e qualquer unidade industrial ou em outro ambiente. Os riscos associados ao gerador de vapor estão na manutenção e operação do equipamento. A norma NR-13 por si só não determina todos os procedimentos seguros na condução do processo de geração de vapor. No entanto, a NR-13 estabelece parâmetros preventivos para a administração do sistema, sem se aprofundar numa análise de risco ao longo da vida de um gerador de vapor. Prevê a norma uma inspeção anual ou bianual dependendo da categoria da caldeira (VIEIRA, 2008). Logo, foi realizado neste trabalho uma lista de verificações como determina a regulamentação do Ministério do Trabalho em dez empresas com as seguintes perguntas:

Existe sistema de captação e lançamento dos gases e material particulado provenientes da combustão para fora de área de operação?
Existe duas saídas de emergência, amplas e em direções destinadas?
Existe acesso fácil e seguro, necessário a operação e manutenção da caldeira?
Existe sistema de drenagem rápida e funcionando bem
A ventilação é permanente com entradas de ar que não possam ser bloqueadas?
Sistema de indicação para controle de nível de água que evite o superaquecimento por alimentação deficiente funcionando?
Válvula de segurança está em boas condições
Válvula de segurança está com pressão de abertura ajustada em valor igual ou inferior ao PMTA
O manômetro está em bom estado e funcionamento
Relatório de Inspeção?
Proteção contra Incêndio Nr-23?
Prontuário de Inspeção?
Existe iluminação conforme as normas vigentes e iluminação de emergência, sinalização de segurança- NR-26?
Existe manual de operação da caldeira?
Equipamento está trabalhando abaixo do PMTA?
A placa de identificação está em local visível de fácil acesso?

E obteve-se as seguintes porcentagens de empresas que estão em conformidade com norma regulamentadora para cada questionamento.

Figura 17 - Histograma



Fonte: Autor (2016).

Foi verificado durante as visitas que as mudanças de combustíveis, o tratamento de água e a forma de partir e parar uma caldeira poderá determinar as condições variáveis da mesma de uma caldeira. A maioria das empresas não observam o manual de operação e muito menos as curvas de aquecimento e de resfriamento de uma caldeira, provocando danos à estrutura da mesma.

Também foi observado na estrutura das caldeiras dilatações bruscas, que produz micro fissuras nas tubulações tornando-as frágeis e são pontos onde poderá haver rompimento futuro provocando a parada do equipamento. Súbitas variações de carga da caldeira também podem provocar mesmo problema. Um tratamento de água inadequado compromete a caldeira provocando corrosão interna, superaquecimento de tubulações, depósitos. Como pode ser observado nas Figuras 18, 19 e 20.

Figura 18 – Corrosão da Caldeira



Fonte: Autor (2016).

Figura 19 – Caldeira de Vida Remanescente



Fonte: Autor (2016).

Figura 20 - Nível de água apresentando coloração amarelada



Fonte: Autor (2016).

8. CONCLUSÃO

O presente trabalho contribuiu para se ter uma vivência na área industrial, para o conhecimento das dificuldades encontradas pelas empresas de interpretação e de implementação das normas de segurança e da legislação ambiental. Visto que há necessidade de expandir o parque de geração de eletricidade através da energia térmica, pois a mesma conforme verificada é uma alternativa viável para o modelo de energia elétrica convencional, além de uma reutilização dos recursos que se tornariam resíduos e geração de renda para comunidades locais.

No balanço térmico da instalação observou-se que as perdas de energia devido à umidade foram as mais representativas, devido ao local inapropriado de armazenamento da cascas da castanha de caju. Comparando a combustão dos três tipos de combustíveis analisados em relação à emissão de poluentes pode-se comprovar a maior quantidade de material particulado emitido pela casca da castanha de caju, destacando a importância de se desenvolver tecnologias para controlar o processo de combustão, tanto no que diz respeito à

emissão de poluentes e também de um melhor aproveitamento da energia contida no combustível.

Por conseguinte, para que se tenha um rendimento viável é necessário um controle rigoroso deste meio de geração de energia, pois foi visto que dependendo da forma que é gerido o processo pode haver desperdício energético devido a geração de poluentes que podem reduzir a eficiência da caldeira e gerar mais resíduos poluentes que o previsto na proposta de energia limpa e renovável que as caldeiras são e devem se tornar, dependendo apenas do aperfeiçoamento e desenvolvimento tecnológico das mesmas.

REFERÊNCIAS

- AALBORG. Disponível em: <<http://www.aalborg-industries.com.br>>. Acesso em: 12 de janeiro de 2016.
- ANEEL. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf>. Acesso em: 12 de janeiro de 2016.
- ARBEX, M.A., CANÇADO, J.E.D., PEREIRA, L.A.A., BRAGA A.L. F., SALDIVA, P.H.N. Queima de biomassa e suas repercussões sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**. v. 30, n. 2, p. 158-175, 2004.
- ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de Química - Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente** - 5ª Ed. – 2011.
- BAZZO, E. **Geração de Vapor**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.
- BRINOP, B. Disponível em:< <http://www.brinop.com.br>>. Acesso em: 12 de janeiro de 2016.
- CANÇADO, J.E.D., BRAGA, A., PEREIRA, L.A.A., ARBEX, M.A., SALDIVA, P.H.N., SANTOS, U.P. Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**. v. 32, n. 2, p. 23-29, 2006.
- CARVALHO JÚNIOR, J.A., LACAVALA. P.T. **Emissões em Processos de Combustão**, Editora UNESP, 2003.
- CARVALHO JÚNIOR, J.A., LACAVALA. P.T. **Emissões em Processos de Combustão**, Editora UNESP, 2003.
- CASTRO, A. **Uma investigação Teórico-Experimental da Combustão de Madeira**. 2005. , São José dos Campos, 374p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão).
- CAVALCANTI, P.M.S. **Avaliação dos impactos causados na qualidade do ar pela geração termelétrica**. 2003. Tese de M.Sc.,COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n. 382/06. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. MMA: Brasília, 2006.
- CONFOR. Manual de Instrução Tempest 100. Disponível em: <www.confor.com.br>. Acesso em: 07 de dezembro de 2015.
- CRUZ, J.L.C. **A Eletricidade no Brasil**, 2002.
- DALLABONA, A.R., SILVA, D., HUPALO, M.F. **Estudos de eficiência térmica e de emissão de poluentes em fornos rotativos a óleo de xisto e gás natural**. In: PDPETRO, 4, 2007, Campinas.
- DAVIES, R.M.; OEPPEN, B. Combustion and Heat Transfer in Natural Gas Fired Boilers, **J. Inst. Fuel**, v.45, n.377, p.383-390, 1972.

DUARTE, J.A.; LIMA, L.C.; SILVA, R.P.M. **Validação de um Modelo de Previsão de Consumo de Energia Para o Brasil**, In: XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM 95), 12-15, Dezembro 1995, Belo Horizonte, MG, Actas-Anais-Proceedings... Rio de Janeiro: ABCM, 1995.

ECKERLIN, H.M. **Results from the Nationwide Oil-Versus-Gas Boiler Test**. Program. Energy Engineering, v.91, n.4, p.33-54, 1994.

FELLENBEG, G. Introdução aos problemas da poluição ambiental. **Trad. de J. H. Maar e G. Froehlich**. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1980.

FERREIRA J.C. A origem do petróleo: Orgânica ou inorgânica? *Spectrun - J. Bras. Cien.*, n.1, v.2, p.34-41, Julho/agosto 1981.

FIGUEIREDO, F.A.B. **Pirólise e gaseificação de casca de castanha de caju: avaliação da produção de gás, líquidos e sólidos**. São Paulo, 2009.

GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial**. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2002.

GATTO, D.A., SANTINI, E.J., HASELEIN, C.R.; DURLO, M.A. Características da lenha produzida na região da quarta colônia de imigração italiana do rio grande do sul. *Ciência Florestal*, v. 13, n. 2, p. 7-16. 2003.

GORDON, J. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**, Editora EDGARD BLUCHER LTDA 4ª EDIÇÃO 1995.

KUZNETSOV, N.V; MITOR V.V. **Teplovoy Raschet Kateknykh Agregatov. Normativni Metod**. Moscou, Energia, 1973, 295p.

LAMMERS, H.B., LAMMERS, T.G., WOODRUFF, E.B., **Steam Plant Operation**, 8ª edição, MCGRAW-HILL, 2004.

LIMA, R.N.O. **Apostila de Máquinas Térmicas-MATI**, DSc. Planejamento de Sistemas energéticos. DCTEF-UFSJ. 2003.

LOCANETTO, P. La Combustion du Gaz Naturel et l'Environnement. *Revue Générale Thermique*, v.27, n.314, p.119-123.

LORA, E.E.S. **Controle da Poluição do Ar na Indústria Açucareira**, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, STAB 2000.

LORA, E.E.S., ARIETA, F.R.P., BESSA, F.C., ARADAS, M.E.C. Caldeiras de Vapor Convencionais e de Recuperação, in: **Geração Termelétrica: planejamento, projeto e operação**, Coordenadores: Lora, E.E.S.; Nascimento, M.A.R., Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2004.

LORA, E.E.S., NASCIMENTO, M.A.R. **Geração Termelétrica: Planejamento, Projetos e Operação**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2004.

MACEDO, J.C.F. **Análise Térmica e Ambiental da Queima do Lodo Primário da Fabricação de Papel e Celulose em Caldeira de Biomassa à Grelha**. 2006. Itajubá, 196p. Dissertação (Mestrado em Conservação de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

MME; **Balço Energético Nacional**, Brasília, Ministério de Minas e Energia, 2015, 141p.
MONTEIRO JÚNIOR, O.C. **Estudo do Controle das Emissões de poluentes em Caldeira Aquatubular de alta pressão com Queimadores Convencionais, Abordagem da Eficiência Versus Custo do Dano**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MORAN, M.J., SHAPIRO, H.N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 4ª ed., 2002.

OLADE, “**Energia en Chifras**”. Quito, Organización Latinoamericana de Energia, n.7, Julho 1995.

PARILOV, U. **Testing And Servicing Of Steam Boilers**, 1990.

PINHEIRO, P.C.C.; VALLE, R.M. **Controle de Combustão: Otimização do Excesso de ar**, In: II Congresso de Equipamentos e Automação da Indústria Química e Petroquímica, 09-11 Agosto 1995, Rio de Janeiro, RJ, Anais... Automação Industrial São Paulo.

PIRES, D.O. **Inventário de emissões atmosféricas de fontes estacionárias e sua contribuição para a poluição do ar na região metropolitana do rio de janeiro**. 2005. Tese (Pós-Graduação em Engenharia / Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2005.

PORTAL DO MTE - MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Disponível em <[http://portal.mte.gov.br/data/files/ff80808147596147014764a4e1d14497/nr3%20\(atualizada%202014\).pdf](http://portal.mte.gov.br/data/files/ff80808147596147014764a4e1d14497/nr3%20(atualizada%202014).pdf)>.

RIBEIRO, A.P.R.A. **Influência da Qualidade do Carvão e das Condições Operacionais no Processo de Combustão de uma Usina Termelétrica**. 2002. Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis.

SERFATY, R. **Combustão e queimadores**. CENPES. 2007.

SOUZA, C.S. **Análise energética do processo de produção de ferro gusa em Altos-fornos: Identificação de oportunidades em redução de emissões de gases de efeito estufa**. 124 páginas. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental)- Faculdade ARACRUZ. 2010
SWANEKAMP, R. **Natural Gas. Poised to Penetrate Deeper Into Electric Generation**. Power, v.139, n.1, p.13-16,19, Janeiro 1995.

TEIXEIRA, F.N., LORA, E.E.S. **Suprimento Energético para Termelétricas**, in: **Geração Termelétrica: planejamento, projeto e operação**, Coordenadores: Lora, E.E.S.; Nascimento, M.A.R., Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2004.

TOTTEN, J.M. **Converting To Gas Firing?**, Power, v.103, n.11, p.78-79, Nov. 1959.

VIEIRA, S.I. **Manual de Saúde e Segurança do Trabalho**. BRASIL, 2ª EDIÇÃO, 2008.

ANEXO A – EFEITOS ASSOCIADOS COM POLUENTES ESPECÍFICOS – “CONTINUA”

Poluente	Efeitos à Saúde Relatados	Outros Possíveis Efeitos	Principais Fontes
Material Particulado	Aumenta mortalidade geral pode adsorver e carrear poluentes tóxicos para as partes profundas do aparelho respiratório e, na presença de SO ₂ , aumenta a incidência e a severidade de doenças respiratórias.	Reduz a visibilidade, suja materiais e construções.	Processos industriais, veículos automotores, poeiras naturais, vulcões incêndios florestais, queimadas, queima de carvão, etc.
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	Agrava sintomas de doenças cardíacas e pulmonares, especialmente em combinação com outros poluentes, aumenta a incidência de doenças respiratórias agudas.	Tóxico para as plantas, estradas, pinturas, erosão de estátuas monumentos, Corroi metais, danifica tecidos, diminui a visibilidade, forma chuva ácida.	Queima de combustíveis em fontes fixas, veículos automotores, fundições, refinarias de petróleo, etc.
Monóxido de Carbono (CO)	Interfere no transporte de oxigênio pelo sangue, diminui reflexos, afeta a discriminação temporal, exposição a longo prazo é suspeita de agravar arteriosclerose e doenças vasculares	Desconhecidos	Veículos Automotores

ANEXO A – EFEITOS ASSOCIADOS COM POLUENTES ESPECÍFICOS – “CONCLUSÃO”

<p>Dióxido de Nitrogênio (NO₂)</p>	<p>Altas concentrações podem ser fatais, em concentrações baixas pode aumentar a suscetibilidade a infecções suscetibilidade a infecções pode irritar os pulmões causar bronquite e pneumonia.</p>	<p>Tóxico para as plantas, causa redução no crescimento e na fertilidade das sementes quando presente em altas concentrações, causa coloração marrom na atmosfera, precursor da chuva ácida, participa do smog fotoquímico formando O₃.</p>	<p>Veículos automotores e queima de combustível em fontes estacionárias, termelétricas.</p>
<p>Ozônio (O₃)</p>	<p>Irrita as mucosas do sistema respiratório causando tosse e prejuízo à função pulmonar, reduz a resistência a gripes e outras doenças como a pneumonia, pode agravar doenças do coração, asma, bronquites e enfisema.</p>	<p>Danifica materiais como a borracha e pintura, causa danos à agricultura e vegetação em geral.</p>	<p>Formado na atmosfera por reações fotoquímicas presença de óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos ou outros compostos orgânicos voláteis.</p>

Fonte: Cavalcanti (2003)

ANEXO B – LAUDO BIOMASSA



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENG. MECÂNICA

Grupo de Energia, Biomassa e Meio Ambiente.

RESULTADOS DOS ENSAIOS DA ANÁLISE IMEDIATA.

Solicitante: Prof. William Barcellos, D.Sc.
Laboratório de Combustão e Energias Renováveis (LACER)
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica
Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção
Centro de Tecnologia - Universidade Federal do Ceará

Nome Comercial	Castanha	Acácia Mimosa "D"	Acácia Mimosa "d"	Adenan-thora. "D"	Adenan-thora. "d"	Pau D'arco	Castanho-la "D"	Castanho-la. "d"	Fixo Benjamin "D"	Fixo Benjamin "d"
PCS (kcal/kg)	5.499	4.613	4.598	4.725	4.568	4.496	3.843	4.082	4.187	4.404
PCI (kcal/kg)	5.206	4.320	4.305	4.432	4.275	4.203	3.550	3.789	3.894	4.111
Carbono Fixo (%)	17,80	25,43	15,42	25,02	24,08	20,53	24,83	24,13	18,40	15,66
Teor de Voláteis (%)	81,00	70,12	78,94	70,52	71,82	75,09	67,54	68,38	74,04	78,38
Teor de Cinzas (%)	1,20	4,45	5,64	4,46	4,10	4,38	7,63	7,49	7,56	5,96
Teor de Umidade da Amostra (%)	9,36	45,59	66,68	67,11	61,05	57,77	65,60	61,33	60,36	60,03

* Todas as análises foram realizadas em triplicata

Normas utilizadas nos ensaios:

Poder Calorífico Superior (PCS): NBR 6923 / NBR 8112 / NBR 5734

Poder Calorífico Inferior (PCI): Calculada em função do PCS com presença de hidrogênio na amostra de 5,57%

Carbono Fixo (%): NBR 6923 / NBR 8112 / NBR 5734

Teor de Voláteis (%): NBR 6923 / NBR 8112 / NBR 5734

Teor de Cinzas (%): NBR 6923 / NBR 8112 / NBR 5734

Teor de Umidade da Amostra: NBR 6923 / NBR 8112 / NBR 5734

Belém, 29 de fevereiro de 2008.

Prof. Gonçalo Rendeiro
Coordenador do EBMA