



JOÃO PAULO VISSOTTO

Cogaseificação de Serragem de *Pinus* e Lodo de Esgoto em Leito Fluidizado

(91/13)

**Campinas
2013**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO PAULO VISSOTTO

Cogaseificação de Serragem de *Pinus* e Lodo de Esgoto em Leito Fluidizado

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Engenharia Térmica e de Fluídos

Orientador: Prof. Dr. Caio Glauco Sánchez

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO
ALUNO JOÃO PAULO VISSOTTO
E ORIENTADA PELO PROFº DR. CAIO GLAUCO
SÁNCHEZ

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "JP ViSSOTTO", written over a dotted line.

Campinas
2013

iii

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

V828c Vissotto, João Paulo, 1982-
Cogaseificação de serragem de pinus e lodo de esgoto em leito fluidizado /
João Paulo Vissotto. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Caio Glauco Sánchez.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Mecânica.

1. Gaseificação. 2. Resíduos Vegetais. 3. Lodo de esgoto. 4. Reator de leito
fluidizado. I. Sánchez, Caio Glauco, 1955-. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Cogasification of pinus sawdust and sewage sludge in fluidized bed

Palavras-chave em inglês:

Gasification

Waste vegetable

Sewage sludge

Fluidized bed reactor

Área de concentração: Térmica e Fluídos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Caio Glauco Sánchez [Orientador]

Rosângela Barros Zandoni Lopes Moreno

Juan Marin Mesa

Data de defesa: 30-08-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE
FLUÍDOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Cogaseificação de Serragem de *Pinus* e Lodo de Esgoto em Leito Fluidizado

Autor: João Paulo Vissotto

Orientador: Prof. Dr. Caio Glauco Sánchez

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou essa Dissertação.

A handwritten signature in purple ink, appearing to be "Caio Glauco Sánchez", written above a horizontal line.

Prof. Dr. Caio Glauco Sánchez – Presidente
DETF - FEM - UNICAMP

A handwritten signature in purple ink, appearing to be "Rosângela Barros Zanoni Lopes Moreno", written above a horizontal line.

Prof. Dra. Rosângela Barros Zanoni Lopes Moreno
DEP – FEM - UNICAMP

A handwritten signature in purple ink, appearing to be "Juan Marin Mesa", written above a horizontal line.

Dr. Juan Marin Mesa
Bioware Tecnologia

Campinas, 30 de Agosto de 2013

Dedicatória

Dedico este trabalho a Deus e a minha esposa Sara que sempre me acompanharam nos piores momentos vividos.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado e me sustentado em todas as dificuldades enfrentadas até este dia. À Sara minha amada esposa, pela companhia, pela compreensão durante as ausências e as dificuldades, pelo apoio e por tudo o que fez por mim.

Ao Professor Caio, por ter me aceito como aluno, por ter confiado no meu trabalho e por ter me ajudado sempre, tanto profissional como pessoalmente. À Prof.^a Bete, pelo apoio durante o trabalho desenvolvido. À minha família pela educação e formação de caráter.

Ao colega e irmão na fé Alexandre, pelas horas de laboratório conjuntas, pela companhia nas dificuldades, pelos debates e ensinamentos cristãos. Ao companheiro e amigo Renato, pelas horas de laboratório, nos estudos e nas reformas do gaseificador. Aos colegas do departamento de engenharia térmica e de fluidos, Danilo, Eugenio, Marcos, Milena, Bigatto e todos que comigo compartilharam conhecimento e amizade;

Aos amigos de longa data, Jony (Alemão) e Luan, pelas madrugadas de chimarrão na república e pela amizade. Agradeço também aos que me ajudaram a se estabelecer em Campinas, Jorge, Alexandre e Jakerson. Aos professores da Faculdade de Engenharia Mecânica de Passo Fundo, Rubens, Nilson, Luis Edson, Dirceu, Wagner e todos os outros que me incentivaram a seguir nos estudos.

Aos técnicos dos laboratórios, Srs. Luiz Zanaga, Marcos Saramago, Luiz Biazon, Luiz Gama e Setembrino, por ajudarem na fabricação e montagem do aparato experimental. Também a Srta. Cleusa, pelo tempo de ajuda, como secretária do departamento. A Srta. Marta do CEPETRO e o Dr. Newton do LH₂-IFGW pelas análises cromatográficas. A empresa R&R Embalagens pela doação de serragem e ao Departamento de Águas e Esgoto de Americana pela doação do lodo sanitário.

A Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio e financiamento da pesquisa.

*"Quanto melhor é
adquirir a sabedoria do que o ouro! e
quanto mais excelente é escolher o
entendimento do que a prata." (Prov.
16:16)*

Resumo

Este trabalho aborda o estudo da cogaseificação de dois tipos de resíduos de biomassas (serragem de *pinus* e lodo de esgoto sanitário e industrial da cidade de Americana – SP) com o objetivo de comprovar experimentalmente os efeitos sinérgicos de misturas dessas biomassas. O lodo de esgoto não tem PCI suficiente para sustentar o processo de gaseificação sozinho, assim sua mistura com a serragem possibilita a realização do processo, além da diluição de possíveis contaminantes.

Na caracterização das biomassas escolhidas, foram determinados os valores de PCI para o *pinus* de $17,19 \text{ MJ.kg}^{-1}$ e para o lodo de $11,48 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Os teores de voláteis foram de 89,69 % e 58,32 % respectivamente.

Os ensaios foram realizados no gaseificador do Laboratório de Combustão e Gaseificação do Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, que é um reator de leito fluidizado borbulhante.

Durante os ensaios de gaseificação foram selecionados dois fatores de ar para gaseificação exclusiva de *pinus* (0,30 e 0,50). Os valores de poder calorífico do gás produto foram calculados a partir da concentração do gás obtido, determinado por cromatografia gasosa, sendo os valores de $3,63 \pm 0,4 \text{ MJ. Nm}^{-3}$ e $1,92 \pm 0,2 \text{ MJ. Nm}^{-3}$ respectivamente. A adição de lodo para os ensaios de cogaseificação foram à razão de 25 % em massa, base seca, para o fator de ar de 0,30, pois nesse fator de ar ocorreu o melhor PCI do gás e o melhor rendimento a frio do gaseificador com gaseificação de *pinus* puro (37,1%). O valor de PCI para o gás produto da cogaseificação foi de $2,62 \pm 0,67 \text{ MJ. Nm}^{-3}$. O rendimento médio do gaseificador caiu para 29,3%.

Palavras Chave: Gaseificação, Resíduos Vegetais, Lodo de Esgoto, Reator de Leito Fluidizado.

Abstract

This work aims to study the cogasification of two types of biomass residues (sawdust pine and sanitary and industrial sewage sludge from Americana City – São Paulo State) in order to experimentally demonstrate the synergistic effects of mixtures of these biomasses. The LHV of the sewage sludge is not enough to sustain the gasification process alone, so its mixture with sawdust allows the realization of the process and the dilution of possible contaminants.

In the characterization of biomasses, the LHV values were for pine 17.19 MJ.kg^{-1} and for the sludge 11.48 MJ.kg^{-1} . The content of volatiles were 89.69 % and 58.32 % respectively.

Experiments were performed in the gasifier of The Combustion and Gasification Laboratory, Department of Thermal Engineering and Fluid Mechanics of the Faculty of Mechanical Engineering, UNICAMP, which is a bubbling fluidized bed reactor.

During the gasification tests, two air ratio were selected for gasification of pine alone (0.30 and 0.50). The low heating value of the product gas was calculated from the gas concentration, determined by gas chromatography, with values of $3.63 \pm 0.4 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ and $1.92 \pm 0.2 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ respectively. The addition of sewage sludge for cogasification was in the rate of 25 % on dry basis, for 0.30 air ratio, because in this air ratio occurred the best LHV in the gas and the best performance of gasifier with pure pine (37.1 %). The average value of LHV for gas product of cogaseificação was $2.62 \pm 0.67 \text{ MJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$. The average efficiency of the gasifier fell to 29.3 %.

Keywords: Gasification, Vegetable Wastes, Sewage Sludge, Fluidized Bed Reactor

Lista de Figuras

Figura 1.1 Matriz Energética de Geração Elétrica Brasileira. Fonte: MME – BEN – 2012 (preliminar).....	2
Figura 1.2 Evolução da Matriz Energética Brasileira. Fonte: MME – BEN 2012.....	3
Figura 2.1 Unidade de Compostagem ETE Lavapés. Fonte: Oliveira, 2008	10
Figura 2.2 Lodo de esgoto coletado. Fonte: o autor	14
Figura 2.3 Bolsões para desidratação do lodo de esgoto na ETE Carioba. Fonte: o autor	14
Figura 2.4 Marcos da Gaseificação no mundo. Adaptado de: Bazu, 2010.....	16
Figura 2.5 Veículos com gaseificador portátil utilizados no período da segunda guerra. Fonte: http://biomassenergyfndn.org/bef/organization-history/	17
Figura 2.6 Veículo com gaseificador portátil. Fonte: http://biomassenergyfndn.org/bef/organization-history/	18
Figura 2.7 Esquema de um gaseificador de leito fluidizado (Sánchez, 1994).....	19
Figura 2.8 Efeitos da temperatura do leito na composição do gás na cogaseificação de <i>pellets</i> de palha e lodo de esgoto com uma mistura de 50/50 %. Fonte: Pinto et al, 2008.....	22
Figura 2.9 Efeitos da relação de oxigênio (ER) na composição do gás na cogaseificação de <i>pellets</i> de palha e lodo de esgoto com uma razão de mistura de 50/50 %. Fonte: Pinto et al, 2008	23
Figura 2.10 Diferentes tipos de leito fluidizado. Adaptado de: Kunii & Levenspiel (1991)	27
Figura 2.11 Diferença entre gás de gaseificação e biosyngas e suas aplicações. Adaptado de: Boerrigter e Rauch 2005	29
Figura 2.12 Diagrama de Geldart. Adaptado de Geldart, 1986	32
Figura 3.1 Reator utilizado no experimento	47
Figura 3.2 Rotor Construído para a válvula dosadora	49
Figura 3.3 Croqui da rede de distribuição do GLP.....	50
Figura 3.4 Curva de calibração da placa de orifício.	51

Figura 3.5 Representação esquemática do reator.....	52
Figura 3.6 Secador de lodo construído. A) Trocador de Calor; B) Ventilador; C) Tonel para secagem aberto.....	57
Figura 3.7 Dispositivo para testes de fluidização a frio.....	58
Figura 4.1 Distribuição granulométrica da areia inerte.	62
Figura 4.2 Serragem de <i>pinus</i> moída pronta para uso no reator. Fonte: o autor.....	63
Figura 4.3 Distribuição Granulométrica da Serragem de <i>pinus</i>	64
Figura 4.4 Lodo de esgoto. Fonte: o autor.....	65
Figura 4.5 Fluidização a frio da serragem	67
Figura 4.6 Fluidização a frio do lodo.....	68
Figura 4.7 Valores do PCI do gás em função do FA	70
Figura 4.8 Composição volumétrica do gás obtido em função do fator de ar real médio .	71
Figura 4.9 Serragem e lodo de esgoto misturados	73
Figura 4.10 Areia fundida aderida ao eixo do alimentador	76
Figura 4.11 Projeto da nova tampa de inspeção do reator com os dutos de alimentação e tomada de pressão.....	78
Figura 4.12 Esquema demonstrativo do reator com a instalação da bomba de lodo. Adaptado de: <i>Pellegrino,2006</i>	79

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Análise Elementar e Poder Calorífico encontrados na literatura.	8
Tabela 2.2 Concentração Máxima permitida no Lodo	11
Tabela 2.3 Análise Elementar do lodo peletizado.	12
Tabela 2.4 Análise do gás produzido no processo de gaseificação do lodo de esgoto peletizado.....	12
Tabela 2.5 Percentual de Componentes e PCI do gás para diferentes sistemas de gaseificação com lodos de esgoto.....	13
Tabela 2.6 Comparação de Análise Elementar do Lodo (B.S.).....	21
Tabela 2.7 Caracterização Química dos Materiais.	24
Tabela 2.8 Concentração de CO no ambiente e impacto em seres humanos.	29
Tabela 3.1 Gás padrão para calibração do cromatógrafo.....	54
Tabela 3.2 Condições de operação do cromatógrafo.....	54
Tabela 3.3 Matriz dos Ensaio.....	56
Tabela 4.1 Análise Imediata da Serragem de Pinus e do Lodo de Esgoto.	59
Tabela 4.2 Análise Imediata (DAF) da Serragem de Pinus e do Lodo de Esgoto.....	60
Tabela 4.3 Análise Imediata da Serragem de Pinus e do Lodo de Esgoto, determinado pelo método da bomba calorimétrica LCG - DETF	60
Tabela 4.4 Análise de Metais nas Cinzas do Lodo de Esgoto Puro	61
Tabela 4.5 Análise Granulométrica da Areia Inerte	63
Tabela 4.6 Análise Granulométrica do Pinus	64
Tabela 4.7 Comparativo entre gaseificação e cogaseificação.....	74
Tabela 4.8 Comparativo do balanço de massa e energia entre gaseificação e cogaseificação.....	75
Tabela A.1 Resultados dos experimentos de gaseificação da serragem de pinus puro	88
Tabela A.2 Resultados dos experimentos de cogaseificação.....	91

Lista de abreviaturas e siglas

Letras Latinas

r - raio da esfera	[m]
A - área superficial da esfera	[m ²]
C^t - teor de carbono	[%]
CCO₂ – concentração de dióxido de carbono	[%]
c_{cinza} – calor específico das cinzas	[MJ/Nm ³ °C]
CH₂ – concentração de hidrogênio	[%]
CCH₄ – concentração de metano	[%]
CCO – concentração de monóxido de carbono	[%]
CC₂H₂ – concentração de acetileno	[%]
CC₂H₄ – concentração de etileno	[%]
CN₂ – concentração de nitrogênio	[%]
d_p – diâmetro da partícula	[μm]
E(total) – energia total	[kW]
ED – energia demandada	[kW]
E_f – eficiência a frio	[%]
E_f – eficiência a quente	[%]
FA – fator de ar	[Nm ³ /kg]
g – aceleração da gravidade	[m/s ²]
H^t – teor de hidrogênio	[%]
h_{a1} – entalpia do ar na entrada do compressor	[kJ/Nm ³]
hCO₂ – entalpia do dióxido de carbono	[kJ/Nm ³]
h_{gás} – entalpia do gás produzido	[kJ/Nm ³]
hH₂ – entalpia do hidrogênio	[kJ/Nm ³]
hCH₄ – entalpia do metano	[kJ/Nm ³]
hCO – entalpia do monóxido de carbono	[kJ/Nm ³]

h_{N_2} – entalpia do nitrogênio	[kJ/Nm ³]
h_{O_2} – entalpia do oxigênio	[kJ/Nm ³]
L_{mf} – altura do leito de mínima fluidização	[m]
\dot{m}_{comb} – vazão mássica de combustível	[kg/s]
m_c – massa do cadinho vazio e tampado	[kg/s]
m_{cz} – massa do cadinho tampado com as cinzas	[kg/s]
m_{fs} – massa final da amostra seca e estabilizada com o cadinho tampado	[kg/s]
m_{fv} – massa final da amostra volatilizada com o cadinho tampado	[kg/s]
m_{iu} – massa inicial da amostra úmida com o cadinho tampado	[kg/s]
O^t – teor de oxigênio	[%]
N^t – teor de nitrogênio	[%]
P_{atm} – pressão atmosférica	[atm]
PCI_g – poder calorífico do gás	[MJ/Nm ³]
Q_{cinzas} – perda de energia total pelo arraste das cinza	[MJ/kg _{comb}]
Q_d – energia disponível	[MJ/kg _{comb}]
$Q_{gás}$ – perda de energia pela entalpia do gás	[MJ/kg _{comb}]
q_g – perda de calor sensível no gás saindo no free-board	[MJ/kg _{comb}]
$Q_{útil}$ – energia útil do sistema	[MJ/kg _{comb}]
$Q_{gás}$ – perda de energia pela entalpia do gás	[MJ/kg _{comb}]
$Q_{M.A.}$ – perda de energia para o meio ambiente	[MJ/kg _{comb}]
Re_p – número de Reynolds da partícula	[adimensional]
S^t – teor de enxofre	[%]
t_e – temperatura de entrada do combustível no reator	[°C]
t_s – temperatura do gás na saída do free-board	[°C]
t_{cinzas} – temperatura das cinzas no ciclone	[°C]
t_l – temperatura média do leito	[°C]
U_f – velocidade de fluidização	[m/s]
U_{mf} – velocidade de mínima fluidização	[m/s]
U_o – velocidade superficial	[m/s]
U_t – velocidade terminal da partícula	[m/s]

V_A – vazão de ar	[Nm ³ /s]
V_{A^*} – vazão de ar estequiométrica	[Nm ³ /kg _{comb}]
$V_{gás}$ – vazão de gás na saída do reator	[Nm ³ /s]
V_{gl} – vazão de gás na temperatura do leito	[Nm ³ /s]

.....

Letras Gregas

ϵ_{mf} – porosidade de mínima fluidização	[adimensional]
ϕ – esfericidade	[adimensional]
η_{gaseif} – eficiência média do gaseificador	[adimensional]
ρ_p – densidade da partícula	[kg/m ³]
ρ_g – densidade do gás produzido	[kg/m ³]
ρ_{inerte} – densidade do material inerte do leito	[kg/m ³]
μ_g – viscosidade dinâmica do gás	[Pa.s]
ΔP_{total} – queda de pressão total	[Pa]
ΔP_{leito} – queda de pressão no leito	[Pa]
ΔP_{aq-ar} – queda de pressão no aquecedor de ar	[Pa]
ΔP_{tubul} – queda de pressão na tubulação	[Pa]
$\Delta P_{distrib}$ – queda de pressão no distribuidor	[Pa]
$\Delta P_{ciclone}$ – queda de pressão no ciclone	[Pa]
$\Delta P_{chaminé}$ – queda de pressão na chaminé	[Pa]

.....

Siglas

AIE - Agência Internacional de Energia
ASTM - American Society for Testing and Materials
B.S. - Base Seca
B.U. - Base Úmida
BEN - Balanço Energético Brasileiro
DAE - Departamento de Águas e Esgoto de Americana-SP

DETF - Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos

DETF - Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos

ETE - Estação de Tratamento de Efluentes

FEM - Faculdade de Engenharia Mecânica

IGCC - Integrated gasification combined cycle

LCG – Laboratório de Combustão e Gaseificação

LE - Lodo de Esgoto

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

MME - Ministério de Minas e Energia

OPEP - Organização dos Países Exportadores de Petróleo

PCI - Poder Calorífico Inferior

PCS - Poder Calorífico Superior

PIB - Produto Interno Bruto

SAE - Society of Automobile Engineers

SNG - Synthetic Natural Gás

TEP - Tonelada Equivalente de Petróleo

TGA - Análise Termogravimétrica

Sumário

Resumo	xiii
Abstract.....	xv
Lista de Figuras.....	xvii
Lista de Tabelas	xix
Lista de abreviaturas e siglas	xxi
Sumário.....	xxv
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	4
2 Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Biomassa e seus derivados.....	5
2.2 Resíduos de Pinus	6
2.3 Lodo de Esgoto	8
2.4 Gaseificação.....	15
2.5 Cogaseificação	20
2.6 Cinética da Volatilização	24
2.7 Cinética da Gaseificação em Leito Fluidizado	25
2.8 Aplicações do Gás	28
2.9 Caracterização Físico – Química dos combustíveis e do material inerte	30
2.9.1 Densidade aparente do leito	30
2.9.2 Análise Granulométrica	31

2.9.3	Análise Imediata	33
2.9.4	Análise Elementar	35
2.9.5	Poder Calorífico	36
2.10	Demanda de Energia	37
2.10.1	Balanço de massa do gaseificador	37
2.10.2	Balanço de energia do sistema	40
2.10.3	Eficiência do gaseificador	43
2.10.4	Velocidade de fluidização	44
2.10.5	Queda de pressão no leito	45
2.10.6	Velocidade Terminal da Partícula	45
3	Materiais e Métodos	47
3.1	O Reator	47
3.2	Análise de Metais Pesados	53
3.3	Análise do gás produzido	53
3.4	Procedimento Experimental	55
3.4.1	O Experimento	55
3.4.2	Secagem do lodo sanitário	56
4	Resultados	59
4.1	Caracterização Físico-Química do Material	59
4.1.1	Resultados da Análise Imediata	59
4.1.2	Resultados da Análise Elementar	60
4.1.3	Resultados do Poder Calorífico	60
4.1.4	Resultados da Análise de Metais	61
4.1.5	Resultados da Granulometria	61

4.1.6	Fluidização a Frio das biomassas	65
4.2	Resultados da Gaseificação.....	69
4.2.1	Influência do fator de ar	70
4.2.2	Cogaseificação	72
4.3	Problemas encontrados	76
5	Conclusões	80
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	81
6	Publicações resultantes deste trabalho	82
6.1	Anais e Eventos Científicos	82
6.2	Trabalhos Apresentados em Eventos: Painel.....	82
7	Referências Bibliográficas	83
	APÊNDICE A – RESULTADOS CALCULADOS NA SÉRIE DE EXPERIENTOS REALIZADOS	88
	APÊNDICE B – PROJETO DO ROTOR DA VÁLVULA DOSADORA	93
	ANEXO A - ROTEIRO BÁSICO DE OPERAÇÃO DO GASEIFICADOR	94
	ANEXO B - ROTEIRO BÁSICO DE OPERAÇÃO DO SOFTWARE PEAKSIMPLE [®] PARA ANÁLISES NO CROMATÓGRAFO.....	99
	ANEXO C – PUBLICAÇÕES A PARTIR DESTE TRABALHO	108

1 Introdução

Desde a crise do petróleo em 1973, as biomassas se apresentam como uma fonte de energia alternativa aos derivados de petróleo. O Proálcool foi um precursor dessa nova filosofia (Sánchez, 1994) no Brasil. Porém, passada a crise do petróleo, a biomassa deixou de ser atraente economicamente e o crescimento vertiginoso da extração do petróleo com a consequente redução dos custos em escala, praticamente sepultou seu uso para a geração de combustíveis. Nos últimos anos, após o protocolo de Kyoto, em que países estabeleceram metas internas para a diminuição da geração de gases do efeito estufa, abriu-se uma nova lacuna para o uso de biomassas para a produção de energia “limpa”, porém ainda é imperativo que a obtenção de energia seja oriunda da oxidação de carbono, seja de biomassa ou do petróleo como matéria prima (Sánchez et al, 2010). Contudo, a necessidade de redução dos efeitos da emissão de CO₂ na atmosfera conduz as pesquisas a uma maior utilização de biomassas na matriz energética, pois o CO₂ emitido na oxidação do carbono contido nas biomassas e seus derivados são enquadrados no ciclo de absorção do dióxido de carbono na fotossíntese do crescimento de mais biomassa, já o dióxido de carbono da oxidação de derivados do petróleo, não entra nesse balanço, aumentando sua concentração na atmosfera (Sánchez et al, 2010). O dióxido de carbono depois de emitido mantém-se na atmosfera entre 50 e 200 anos. (ICB, 2012).

A Agência Internacional de Energia (AIE) estima que em aproximadamente quinze anos cerca de 30 % do total da energia consumida pela humanidade será proveniente das fontes renováveis e que hoje representam 14 % da energia produzida no mundo, sendo a biomassa 11,4 % na participação da oferta (MME – BEN 2004). Segundo o Balanço Energético Brasileiro de 2012, versão preliminar, o Brasil teve queda na utilização de fontes renováveis de energia durante os últimos 50 anos, conforme visto na figura 1. Outro dado interessante do *BEN* mostra que a relação de oferta de energia em milhões de toneladas equivalentes de petróleo ($10^6 tep$) pelo PIB (Produto Interno Bruto) reduziu de 13,55 % em 1970 para 11,01 % em 2011, ou seja, apesar de atualmente o Brasil ter um *PIB* cerca de 5 vezes maior, a oferta de energia está relativamente menor, e isso é motivo para a obtenção de novas fontes de energia além das tradicionais, por

exemplo, a partir de resíduos urbanos, industriais e agroindustriais. Atualmente o Brasil produz cerca de 300 milhões de toneladas de resíduos agrícolas e agroindustriais, sendo que apenas uma pequena parcela é utilizada com destinação energética, pois estes resíduos apresentam baixa densidade, alta umidade e baixo poder calorífico.

Mesmo com essa redução, o Brasil vem se mantendo como um dos precursores mundiais no uso de fontes renováveis para a geração de energia elétrica. No Balanço Energético Nacional, versão 2012 preliminar, há destaque à fonte hidráulica com 81,7 % da participação da matriz, valor expressivo quando comparado com as demais fontes apresentadas na figura 1.1.

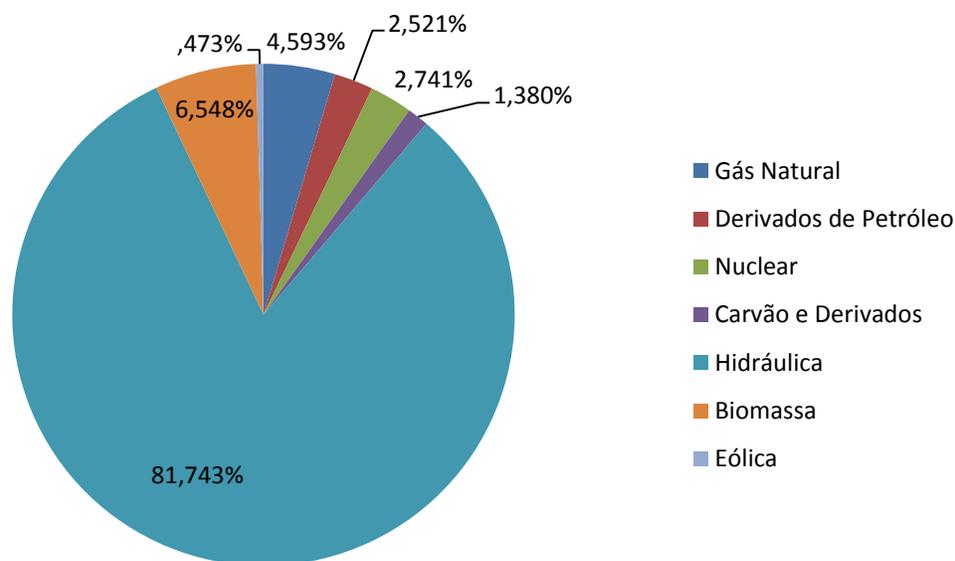


Figura 1.1 Matriz Energética de Geração Elétrica Brasileira. Fonte: MME – BEN – 2012 (preliminar).

A biomassa inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações e na percentagem do carvão é incluso o gás de coqueria (MME - BEN, 2012 Preliminar). Na figura 1.2 é apresentada a evolução de cada fonte energética no Brasil entre 1970 e 2011 (BEN, 2012) onde observa-se pequena evolução da participação das fontes renováveis em geral.

A lenha, no período da segunda guerra, também foi um importante combustível de transportes rodoviários, ferroviário e naval. O emprego da gaseificação de lenha para uso em motores de combustão no transporte rodoviário ficou conhecido popularmente como gasogênio,

que eram pequenos gaseificadores de leito fixo acoplados aos veículos automotores e o gás produzido era utilizado diretamente nos motores (Knoeff, 2005).

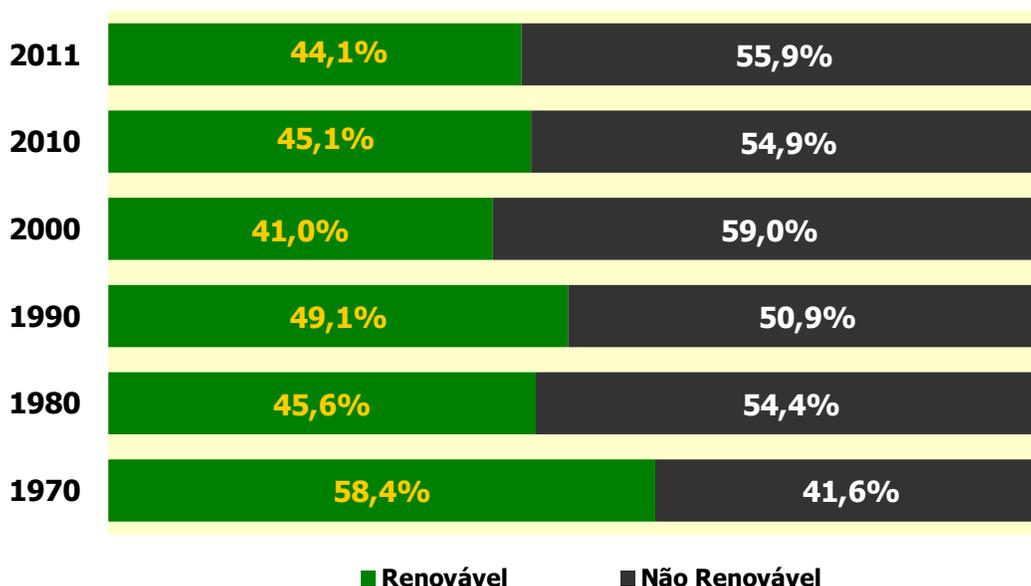


Figura 1.2 Evolução da Matriz Energética Brasileira. Fonte: MME – BEN 2012

O uso do gasogênio resolvia a carência de combustível e gerava maior necessidade de manutenção dos motores, como troca de filtros e outros componentes de contato direto com o gás, além de ter um rendimento menor que a gasolina e diminuía a potencia dos motores em cerca de 25 % (Reed, 1981). Com o final da guerra e com o petróleo a menores custos, a gaseificação caiu em desuso, pois o preço e a oferta dos combustíveis líquidos, gasolina e óleo diesel voltaram a ser acessíveis. O processo de gaseificação então, ficou reservado para algumas situações especiais, com destaque para a África do Sul, algumas regiões da extinta União Soviética e alguns países em desenvolvimento (Sánchez et al, 2010).

A gaseificação é definida como a conversão da biomassa ou de qualquer combustível sólido, líquido ou pastoso em um gás energético através da oxidação parcial à temperatura elevada em atmosfera redutora. Esta conversão pode ser realizada em vários tipos de reatores, tais como leito fixo ou leito fluidizado. Pesquisas recentes remetem ao processo de cogaseificação, onde a mistura de dois ou mais materiais carbonáceos perseguem efeitos sinérgicos entre os mesmos (Parodi, Sánchez, 2002).

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho foi avaliar experimentalmente a cogaseificação de lodo de esgoto urbano e serragem de pinus em um reator de leito fluidizado na busca de efeitos sinérgicos entre mistura dessas biomassas através de ensaios de cogaseificação.

Foi feito um estudo para a gaseificação da serragem pura, para encontrar um melhor ponto de operação do reator tendo como base o poder calorífico do gás produzido. A partir deste ponto, misturou-se o lodo de esgoto.

A escolha da cogaseificação foi motivada pela inexistência de dados nesta área para a destinação de lodos de esgoto, além do reator de leito fluidizado ser um modelo que permite trabalhar com mistura de biomassas polidispersas.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Biomassa e seus derivados

Conforme Bazu (2010), ao contrário do petróleo que demanda muito tempo para a formação, a biomassa é produzida desde o nascimento da planta e em curto espaço de tempo, além de sintetizarem o CO_2 durante a fotossíntese para o crescimento, o que neutraliza o CO_2 liberado durante uma conversão termoquímica. Esse mecanismo de neutralização do dióxido durante a fotossíntese (leia-se, crescimento) é o que justifica o título de fonte renovável, potencializando o interesse na busca por esse tipo de matéria prima. Todos os anos uma quantidade imensurável de biomassa cresce ao sintetizar o dióxido de carbono na fotossíntese. Quando em combustão, essa biomassa libera o dióxido de carbono que já tinha sido capturado da atmosfera. Devido a este ciclo é que a utilização de biomassa tem emissão neutra de CO_2 . Da grande quantidade de biomassa cultivada anualmente, apenas 5 % (cerca de 13,5 milhões de toneladas cúbicas) pode ser potencialmente mobilizada para o uso energético. Mesmo sendo um percentual baixo do montante total de biomassas, esse valor é suficiente para a produção de 26 % da energia consumida no mundo, o que equivale a 6 bilhões de *TEP* (toneladas equivalentes de petróleo) (IFP, 2007 *apud* Bazu.,2010).

A partir das biomassas têm-se a possibilidade de extração de três tipos de combustíveis primários:

- Líquidos: etanol, biodiesel, metanol, óleo vegetal e licor negro e alcatrão da pirólise;
- Gasosos: biogás (CH_4 , CO_2); gás de gaseificação (CH_4 , CO , CO_2 , H_2); gás de síntese (CO , H_2) e metano puro, substituto do gás natural;
- Sólidos: Lenha, carvão vegetal e biomassa torreficada.

e a partir desses obtêm-se outras quatro categorias de produtos:

- Energia para aquecimento e cocção;
- Eletricidade (em termoelétricas);
- Combustíveis sintéticos para transporte (Diesel e Gasolina);
- Matérias primas químicas (metanol, fertilizantes, fibras sintéticas, etc.).

2.2 Resíduos de Pinus

Sabe-se que desde a pré-história, gera-se fogo com combustível de biomassa, ou seja, lenha. Desde então sua importância tem sido vital no desenvolvimento da humanidade, pois até meados do século XVIII os combustíveis fósseis ainda não tinham um valor significativo na matriz energética mundial. Atualmente, a madeira ainda tem extrema importância, principalmente em países subdesenvolvidos e com ausência de jazidas de combustíveis fósseis, pois é fundamental para o preparo de alimentos para um enorme número de pessoas e comunidades. Estima-se que, a cada seis pessoas, duas utilizam a madeira como a principal fonte de energia, sustentando processos de secagem, cozimento, fermentação e produção de eletricidade, etc. (FAO, 2003).

Para Hüebelin (2001) os principais resíduos da indústria madeireira são: a) a serragem, originada da operação das serras, que pode chegar a 12 % do volume total de matéria-prima; b) os cepilhos ou maravalhas, gerados pelas plainas, que podem chegar a 20 % do volume total de matéria-prima, nas indústrias de beneficiamento; c) a lenha ou cavacos, composta por costaneiras, aparas, refilos, cascas e outros, que pode chegar a 50 % do volume total de matéria-prima, nas serrarias e laminadoras. Mady (2000) ressalta que o desperdício no setor madeireiro ainda é muito grande, apesar dos avanços tecnológicos. Estima-se que do volume total de uma tora, sejam aproveitados cerca de 40 % a 60 %, significando que a cada 10 árvores cortadas, apenas cinco serão aproveitadas comercialmente.

O uso da madeira para energia engloba diminuir a dependência energética externa e uma maior segurança quanto ao suprimento da demanda, algo que muitos dos combustíveis hoje empregados não proporcionam. Além do mais, graças ao seu alto potencial renovável e produtivo, especialmente no caso brasileiro, a madeira representa uma matriz energética ambientalmente mais limpa e socialmente mais justa, pois é uma das fontes de energia que permite uma das maiores taxas de geração de emprego por recurso monetário investido (Brito, 2007).

Segundo Rowell et al (2005), quimicamente, a madeira é melhor definida como um biopolímero tridimensional, formado por celulose, hemicelulose e lignina, com uma menor quantidade de extrativos e materiais inorgânicos. A substância química mais abundante numa

árvore viva é a água, mas na madeira em base seca, toda a parede celular da madeira é formada por polímeros de açúcares (carboidratos, 65 a 75 %), que são combinados com a lignina (18 a 35 %).

Quando a casca e a madeira são queimadas, geralmente 75 a 80 % são materiais voláteis e cerca de 20 a 24 % são carbono fixo. Em comparação, o carvão mineral tem muito mais carbono fixo, quase sempre acima de 60 %. A proporção entre os componentes voláteis e carbono fixo influencia as características de queima do combustível pelo fato dos componentes voláteis, quando aquecidos, saírem do material e se queimarem rapidamente na forma gasosa. O carbono fixo queima vagarosamente na fase sólida como carvão (Arola, 1976). Aproximadamente um terço da área pertencente às empresas florestais no país é coberto e preservado somente com vegetação nativa, protegida na forma de reservas legais e áreas de preservação permanente. Intercaladas com os plantios comerciais, essas florestas permitem a comunicação, multiplicação e preservação de espécies da fauna e flora locais. No Brasil, onde ainda existem 92 milhões de hectares de terras aráveis não utilizadas, as florestas plantadas com eucaliptos, pinus e outros tipos de árvore ocupam 5,7 milhões de hectares (60 % deles destinados à eucaliptocultura), contra 61 milhões de hectares ocupados por outros cultivos agrícolas, como milho, soja, laranja e café, e nada menos que 220 milhões de hectares são ocupados por pastagens (Aracruz, 2011).

A celulose, $[C_6H_{10}O_5]$ é um polímero de cadeia longa composto de um só monômero (glicose) classificado como polissacarídeo ou carboidrato. É um dos principais constituintes das paredes das plantas, cerca de $\frac{1}{3}$ do peso. Combinada com a lignina, a hemicelulose e a pectina não são digeríveis pelo homem, constituindo-se em uma fibra dietética. A hemicelulose $[C_5H_8O_4]$ confere elasticidade à planta e encontra-se intercalada às microfibras. A lignina confere rigidez, impermeabilidade e resistência a ataques microbiológicos e mecânicos às plantas. É a responsável por imprimir a cor amarelada na madeira e no papel, e deve ser extraída antes do branqueamento do papel. Sua remoção gera um líquido escuro, o licor negro [Dimetilsulfóxido – $(CH_3)_2SO$] e pode ser utilizado diretamente como combustível da caldeira em combustão ou fonte para outros produtos químicos, se a água for retirada (Aracruz, 2011).

A lignina é o componente termicamente mais estável que se transforma basicamente em carbono fixo. Normalmente não é feita distinção entre sua volatilização quando em atmosfera redutora (pirólise e gaseificação) ou em atmosfera oxidante (combustão). Vários autores já

realizaram gaseificação de serragem de pinus. Na tabela 2.1 é citada a caracterização do pinus, encontrada nos trabalhos de Miller & Tillman (2008) e Jenkins (1990), que realizou um extenso trabalho de caracterização na Universidade da Califórnia onde foram caracterizados 62 tipos de biomassas, com análises imediata e elementar e poder calorífico.

Tabela 2.1 Análise Elementar e Poder Calorífico encontrados na literatura.

Biomassa		
Análise	Pinus ¹	Pinus ²
Análise Elementar (% B.S.)		
Carbono	49,10	49,25
Hidrogênio	6,40	5,99
Nitrogênio	0,20	0,06
Enxofre	0,20	0,03
Oxigênio	44,00	44,36
Poder Calorífico Superior (B.S.)		
MJ/kg	19,79	20,02

Fontes: 1- Miller & Tillman, 2008; 2 - Jenkins, 1990

Não foi comentado se há dispersão dos resultados para uma mesma biomassa. Foram criados modelos de correção para obtenção do poder calorífico superior a partir das análises imediata e elementar da biomassa. Apesar dos estudos de Miller & Tillman (2008) e Jenkins (1990) terem sido realizados em épocas distintas, os valores apresentados são semelhantes.

2.3 Lodo de Esgoto

O lodo de esgoto é um material com grande quantidade de componentes carbonáceos, e que em processo de gaseificação viabilizam a geração de gases combustíveis tal qual qualquer outro combustível sólido orgânico. Considerações a serem feitas quanto ao lodo de esgoto são

sobre o teor de cinzas, que varia muito conforme a origem do lodo. É interessante proceder de maneira que a cinza do lodo fique inerte, para minimizar efeitos no processo. Também deve ser controlada a taxa de umidade da biomassa que será utilizada no processo.

Em Zeitouni (2005), define-se lodo de esgoto como: *“O lodo de esgoto (LE) é o resíduo que se obtém após o tratamento das águas residuárias (esgotos), com a finalidade de torná-las menos poluídas possível (SANEPAR, 1997), de modo a permitir seu retorno ao ambiente sem que sejam agentes de poluição. De acordo com Melo e Marques (2000), o LE quando devidamente higienizado, estabilizado e seco, recebe o nome de biossólido, embora alguns pesquisadores e profissionais da área prefiram manter a denominação de LE.”* Ainda segundo o mesmo autor, *“De acordo com Tsutiya (2001), a compostagem é um processo de degradação aeróbia, no qual a matéria orgânica se decompõe ou se transforma sob a ação de microrganismos. O composto é geralmente utilizado para a estabilização do lodo bruto como também pode estabilizar lodo digerido. Segundo a EPA (1993), a compostagem tem sido utilizada como condicionador de solos ou em aplicações na horticultura. Os objetivos desta tem sido a destruição de patógenos, remoção da umidade do lodo por meio da mistura e remoção de sólidos voláteis.”*

A qualidade do lodo de esgoto também varia com a fonte e época do ano. Atualmente no Brasil, têm-se uma enorme carência de tratamento de esgoto sanitário, porém, o número de estações de tratamento vem crescendo com o aumento da população. O lodo de esgoto não é produzido exclusivamente no tratamento de esgoto, também é produzido durante processos de tratamento e purificação de água. A quantidade do lodo de esgoto tende a crescer com o aumento da população e poderá se igualar ao problema do lixo urbano se medidas eficazes não forem tomadas. Aterros sanitários não são a melhor alternativa para a disposição desse material, pois necessitam de grandes áreas e contribuem para o crescimento de vetores patógenos.

Pesquisas tem direcionado o emprego do lodo de esgoto para a compostagem, figura 2.1, que pode ser definida como biodegradação aeróbia e termofílica de resíduos orgânicos realizada por microrganismos quimiorganotróficos de ocorrência natural nos próprios resíduos a serem compostados (Oliveira, 2008) para posterior aplicação como adubação agrícola.



Figura 2.1 Unidade de Compostagem ETE Lavapés. Fonte: Oliveira, 2008

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, através da Instrução Normativa de 31/08/2005 classifica o fertilizante oriundo da compostagem de lodo de esgoto como um Fertilizante Orgânico Composto Classe D: fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria prima oriunda de tratamento de despejos sanitários, resultando em produto de utilização segura na agricultura. Ainda assim apresenta como fator negativo o custo logístico do processo e o longo período para conversão do lodo em adubo.

O método de destinação de lodos de esgoto na agricultura está em declínio. Se por um lado têm-se componentes fertilizantes, como nitrogênio, fósforo, potássio e baixas concentrações de cálcio, enxofre e magnésio que tornam o lodo um interessante fertilizante, de outro lado temos substâncias prejudiciais como metais pesados, toxinas, vírus, bactérias, (Marani et al, 2003) produtos fármacos e hormônios, organismos geneticamente modificados e dioxinas também estão presentes no lodo de esgoto, e parte deste material pode ser carregado para as culturas de alimentos. (Groß et al, 2008). Segundo a CETESB (1999), os limites de metais pesados em lodos de esgoto não podem ser superiores aos estabelecidos na tabela 2.2 para aplicação agrícola, pois

podem se tornar um problema para a cultura que for adubada com tal material. A presença destes componentes pode ser o segundo aspecto mais importante para a gaseificação do lodo de esgoto, uma vez que, para o uso do gás em motores de combustão ou turbinas a gás, esses metais volatilizados precisam ser capturados antes do destino final do gás.

Tabela 2.2 Concentração Máxima permitida no Lodo

Metal (B.S.)	mg.kg ⁻¹
Arsênio	75
Cádmio	85
Cobre	4300
Chumbo	840
Mercúrio	57
Molibdênio	75
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	7500

Fonte: CETESB, 1999

A norma da CETESB, (Cetesb, 1999) ainda declara que para aplicação de lodos de esgotos em solo agrícola, também deve-se respeitar o índice mínimo de biodegradação de 30 %, além de serem submetidos a processos de redução de patógenos e redução da atratividade de vetores.

Em Groß et al (2008), partículas peletizadas de lodo de esgoto com tamanhos entre 1 e 3 mm foram dissecadas à alta pressão (50 bar), a uma umidade de 10 % e depois gaseificadas em um reator de leito fluidizado atmosférico. A composição elementar do lodo é apresentada na tabela 2.3.

Tabela 2.3 Análise Elementar do lodo peletizado.

Lodo Esgoto	
Análise de Umidade (B.U.) [%]	15,00
Análise Elementar (B.S.)	%
Carbono	21,82
Hidrogênio	3,66
Nitrogênio	3,94
Enxofre	0,85
Oxigênio	18,70
Fluor	0,018
Cinzas	35,96
Cloro	0,057

Fonte: Groß, 2008

Não foram mencionadas as condições do processo de gaseificação, apenas foi apresentada a composição elementar do gás (Groß et al ,2008). A partir desse gás, foi determinado o poder calorífico superior e inferior do mesmo, sendo 4,9 MJ.Nm⁻³ e 4,6 MJ.Nm⁻³ respectivamente. Na tabela 2.4 é apresentada a análise elementar do gás produzido.

Tabela 2.4 Análise do gás produzido no processo de gaseificação do lodo de esgoto peletizado.

Componentes	Concentração [%]
H ₂	11,00
CO	24,00
CH ₄	2,00
H ₂ O	7,00
CO ₂	9,00
N ₂	46,00
O ₂	0,70
SO ₂	0,30

Fonte: Groß, 2008

Outro lodo com potencial de utilização é o lodo resultante da fabricação de papel. O lodo de estação de tratamento de efluente da indústria de papel e celulose apresenta características que favorecem seu aproveitamento em outros métodos. Este tipo de lodo não apresenta variação significativa de composição química, não apresenta sazonalidade de geração, apresenta grandes

volumes gerados em um único local, não é considerado um resíduo perigoso (Paiva, 2007) e pode ser utilizado como combustível a partir da gaseificação, pois tem destinação na própria planta. Em seu trabalho, Hamilton, 2000 compara os resultados para diferentes sistemas de gaseificação com lodos de esgoto, os resultados estão na tabela 2.5.

Tabela 2.5 Percentual de Componentes e PCI do gás para diferentes sistemas de gaseificação com lodos de esgoto.

Gases (%)	Gaseificação em LFB com ar	Gaseificação em LFC com adição de 45 % de O ₂	Sistema Lurgi-Ruhrgas
H ₂	12,20	20,70	29,80
CO	20,90	37,90	24,90
CH ₄	1,60	4,60	19,00
C _m H _n	0,60	0,80	12,30
CO ₂	9,70	11,40	12,00
N ₂	54,80	24,40	1,00
outros	0,20	0,20	1,00
Total	100,00	100,00	100,00
PCI (MJ/Nm ³)	5,20	9,30	22,70

LFB: Leito Fluidizado Borbulhante; LFC: Leito Fluidizado Circulante; Fonte: Hamilton, 2000

Neste trabalho o lodo que será utilizado provém da estação de tratamento de esgotos Carioba, da cidade de Americana – SP. O sistema de tratamento atual é por filtro biológico. Na figura 2.2 é mostrada a coleta das amostras do lodo.

A Estação de Tratamento de Esgotos Carioba (ETE-Carioba), foi projetada no final da década de 70 e teve sua construção a partir de 1985 com o início de operação em 1988. A ETE-Carioba atende a uma população aproximada de 120.000 habitantes localizada na Bacia de contribuição do Ribeirão Quilombo, afluente do Rio Piracicaba, bem como de todo o parque industrial localizado na mesma, dando ênfase às indústrias têxteis com suas respectivas tinturarias.



Figura 2.2 Lodo de esgoto coletado. Fonte: o autor

A estação foi projetada para tratamento máximo de $620 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, sendo $\frac{2}{3}$ da vazão em efluentes sanitários e $\frac{1}{3}$ em efluentes industriais provenientes das indústrias têxteis. O processo de tratamento atual conta com as etapas de: Gradeamento Grosso, Gradeamento Fino, Caixas de areia, Decantadores Primários, Filtros Biológicos Aeróbios, Decantadores Secundários, Digestor Aeróbio e Sistemas de Adensamento e Desidratação, visto na figura 2.3 (DAE Americana, 2012).



Figura 2.3 Bolsões para desidratação do lodo de esgoto na ETE Carioba. Fonte: o autor

2.4 Gaseificação

O uso de gaseificadores é datado do início do século XIX, quando na Inglaterra, pela primeira vez, se fez uso de um processo de destilação seca de material orgânico para a geração de gás. Entre 1850 e 1940 ocorreu à fase inicial da gaseificação. O gás era produzido a partir de carvão mineral e utilizado exclusivamente para iluminação e aquecimento. O gás utilizado na iluminação contribuiu para o aumento da jornada de trabalho durante a revolução industrial, em especial nos dias mais curtos do inverno. A invenção da lâmpada de bulbo por volta de 1900 reduziu o emprego do gás na iluminação, mas ainda assim ele continuou sendo utilizado para aquecimento e cocção. Com a descoberta do gás natural houve uma redução na necessidade do uso da gaseificação. Pode-se citar algumas empresas que surgiram nesse período e desenvolveram diferentes tecnologias para gaseificação, como a Winkler, em 1926 com leito fluidizado, a Lurgi em 1931 com leito movente e pressurizado e a Kopper's-Tozek com leito arrastado (Bazu, 2010). O segundo período da gaseificação coincide com o período pré e pós-segunda guerra mundial, ocorreu entre 1940 e 1970 e apresenta a entrada da gaseificação em dois novos campos de aplicações, o de combustíveis sintéticos e a matéria prima para processos químicos na produção de óleos e outros produtos químicos. Durante a segunda guerra, alguns alvos dos países aliados foram as refinarias de óleos nazistas e as vias de abastecimento de petróleo. Esse fato diminuiu a oferta de óleo combustível das máquinas de guerras alemãs. Os alemães foram forçados a sintetizar combustíveis a partir do carvão mineral. Fischer-Tropsch e Bergius desenvolveram processos que permitiram essas sínteses possibilitando a produção de matéria prima química e combustíveis de aviação a partir da gaseificação do carvão mineral. A figura 2.4 apresenta os principais marcos associados ao desenvolvimento da gaseificação no mundo.

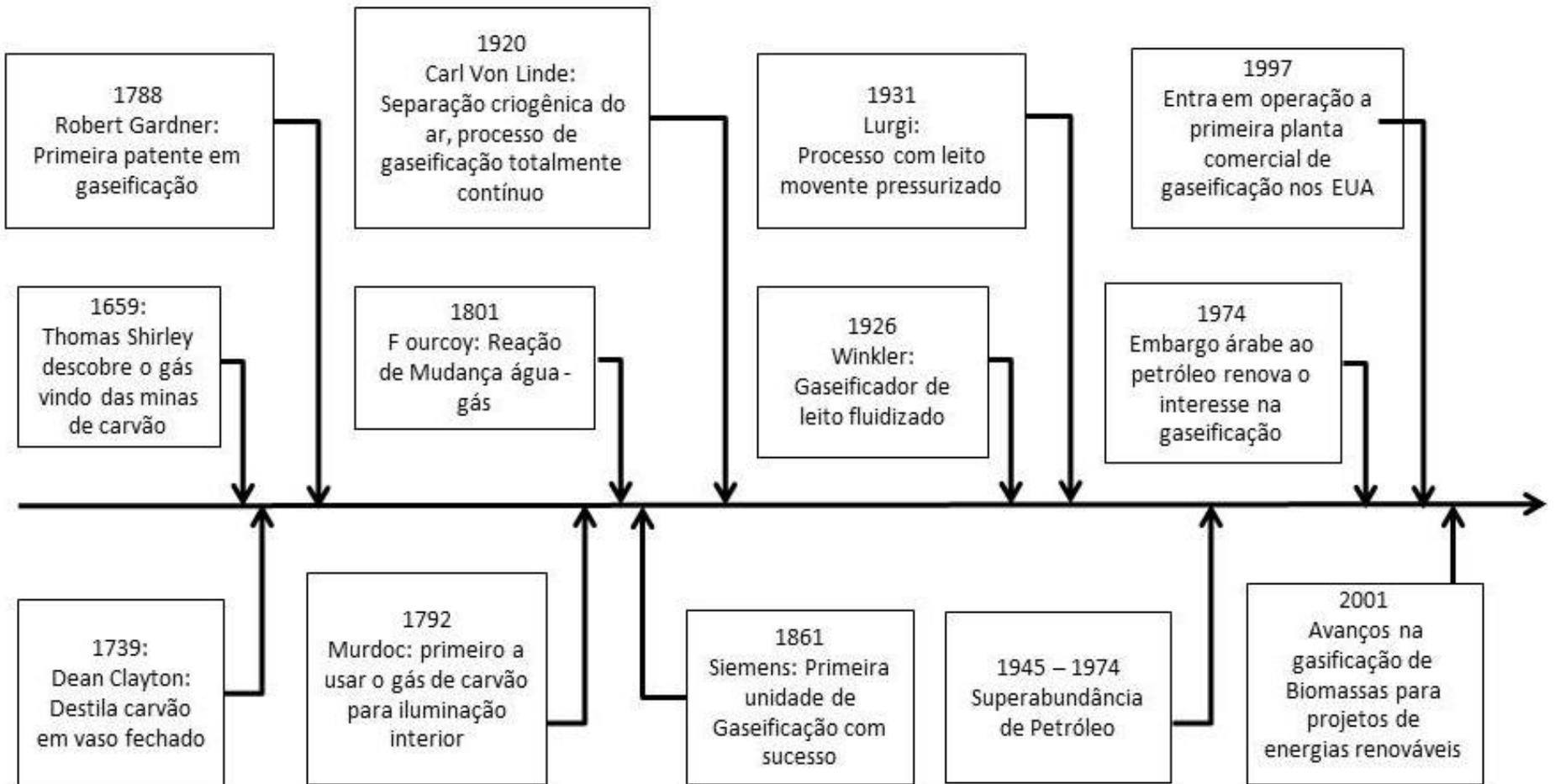


Figura 2.4 Marcos da Gaseificação no mundo. Adaptado de: Bazu, 2010.

Neste período grande parte dos veículos terrestres, mais de 1 milhão de veículos moviam-se graças ao uso de pequenos gaseificadores instalados nos mesmos, conforme mostrados na figura 2.5.



Figura 2.5 Veículos com gaseificador portátil utilizados no período da segunda guerra. Fonte: <http://biomassenergyfndn.org/bef/organization-history/>

Ao final da segunda guerra e com a recuperação dos canais de abastecimento do petróleo oriundos do Oriente Médio, sucumbiu a necessidade da gaseificação para obtenção de químicos e combustíveis. Somado a isso, o advento do gás natural na década de 50 enfraqueceu ainda mais o desenvolvimento da gaseificação de carvão e biomassa, porém a produção de gás de síntese, a partir de nafta e gás natural com reforma a vapor, aumentou para suprir o incremento da demanda por fertilizantes (Bazu, 2010).

Após a Guerra de Yom Kippur, teve-se o início da crise do petróleo em 1973, pois os estados árabes integrantes da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) fizeram embargos ao fornecimento de petróleo para os Estados Unidos da América e grande parte da Europa, pois estes haviam manifestado apoio à sobrevivência do Estado de Israel. Esse corte

afetou fortemente a economia ocidental e gerou uma corrida para o desenvolvimento de tecnologias alternativas à dependência do combustível fóssil, sendo a gaseificação uma dessas alternativas, que foi novamente empregada na geração de combustível para o transporte (figura 2.6). Além da aplicação como gás para aquecimento, a gaseificação teve uma maior aplicação na produção de químicos sintéticos, antes oriundos do petróleo. Em 1975, no Brasil, ocorre o lançamento do Pró-álcool (Programa Nacional do Álcool) (Sánchez, 2003), para substituição do uso de gasolina por álcool hidratado, que alcançou seu ápice entre as décadas de 80 e 90, ressurgindo no século XXI.

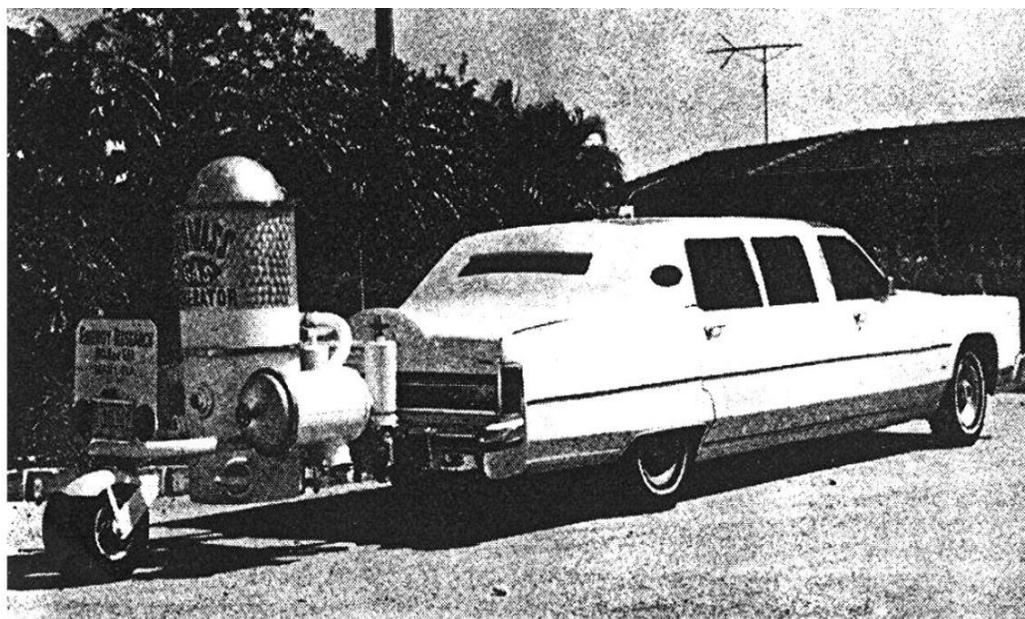


Figura 2.6 Veículo com gaseificador portátil. Fonte: <http://biomassenergyfndn.org/bef/organization-history/>

O final da guerra e a regularização do mercado do petróleo diminuíram o impulso dado à gaseificação, porém alguns governos reconheceram a necessidade de um meio ambiente mais limpo e mantiveram o suporte ao desenvolvimento de gaseificadores em larga escala com ciclo combinado e integrado para plantas de potência (Bazu, 2010).

Mais recentemente, a gaseificação ressurgiu como alternativa ao petróleo devido instabilidades políticas em países exportadores de petróleo. Somam-se a esse fato as mudanças climáticas recorrentes do aquecimento global, em que é eminentemente necessária a redução no consumo de combustíveis fósseis. Sendo assim, a gaseificação é uma alternativa natural para a conversão de biomassa em gás combustível e insumo químico com neutralização de CO₂. A

independência energética e o rápido aumento nos preços do petróleo cru motivam alguns países a reconsiderarem a necessidade do desenvolvimento de plantas de IGCC. A atratividade da gaseificação para a extração de matérias primas nobres a partir de resíduos de refinarias foi redescoberta, levando ao desenvolvimento de plantas de gaseificação nas grandes refinarias de petróleo. Atualmente, a obtenção de matérias primas químicas possui uma maior fatia do mercado de desenvolvimento da gaseificação, maior do que as plantas de potência (Bazu, 2010). Os gaseificadores são distinguidos em quatro tipos básicos (Sánchez, 2003): Contra-fluxo (Contracorrente), Fluxo Direto (Concorrente), Fluxo Cruzado e Leito Fluidizado. Neste trabalho é destacado o gaseificador de Leito Fluidizado, esquematizado na figura 2.7.

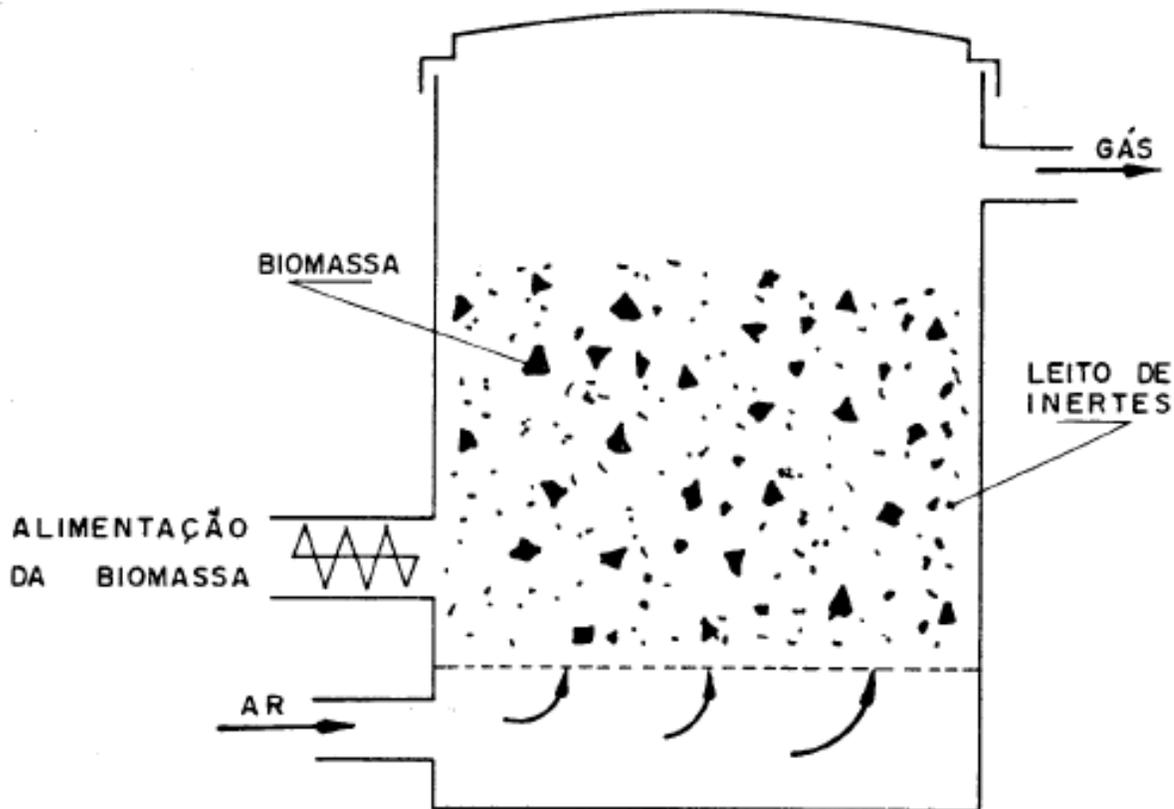


Figura 2.7 Esquema de um gaseificador de leito fluidizado (Sánchez, 1994).

Os primeiros gaseificadores de leito fluidizado de grande porte foram representados pelos gaseificadores de carvão da empresa alemã Winkler, que eram torres de 13 m de altura e uma seção de 12 m² e entraram em operação em 1926 alimentados por carvão em pó. Unidades foram

construídas primeiramente na Alemanha e depois no Japão, sua operação produzia CO e H₂ com a injeção de oxigênio acima do leito. Comparado com os modernos gaseificadores de leito fixo seu rendimento é baixo, cerca de 50 %, devido ao alto consumo de oxigênio, (Kunii & Levenspiel, 1991).

2.5 Cogaseificação

A cogaseificação apresenta-se como uma interessante alternativa ao processo de gaseificação individual de materiais sólidos, pois visa encontrar efeitos sinérgicos para melhoria do rendimento do processo. É esperado que se produzisse melhores teores de gases combustíveis (CH₄, CO, H₂) no gás produto bem como uma redução de cinzas e alcatrão. Outra afirmação quanto à gaseificação é de que a umidade da biomassa no interior do reator não pode ser superior a 50 %, acima desta umidade o reator de leito fluidizado perde a ignição da biomassa (“apaga”) e o leito entra em colapso paralisando o processo. Em vários trabalhos, a caracterização de lodos apresentam divergências de valores e que podem ser observadas na tabela 2.6. Essa divergência se dá pelas diferentes fontes de lodo e isso interfere nos resultados.

Pinto et al (2008) descrevem a obtenção de bons resultados energéticos na cogaseificação de lodo de esgoto urbano com *pellets* de palha, e comparam o processo à cogaseificação de carvão mineral com lodo de esgoto. A energia medida no lodo de esgoto foi de 24 MJ.kg⁻¹. Se por um lado o lodo pode conter quantidades de enxofre, cloro e em especial nitrogênio consideráveis, também há quantidades de outros elementos, como metais pesados, que podem levar à liberação de poluentes. Porém, o depósito em aterros e o uso em incineradores também não são aconselháveis, e cuidados especiais são necessários para a seleção do tratamento térmico adequado.

Faz-se menção aos teores de Nitrogênio, Enxofre e Cloro apresentados nas amostras ensaiadas. Devido às condições de atmosfera redutora da gaseificação, é esperado que maiores quantidades de componentes gasosos de nitrogênio, enxofre e cloro apareçam na forma de H₂S, NH₃ e HCl. Ainda que suas produções sejam indesejadas na maioria das aplicações do gás de

gaseificação, existem métodos para controle. O lodo de esgoto também contém quantidade variável de outros elementos que incluem metais pesados, dependendo da sua origem. Esses elementos podem ser volatilizados para a fase gasosa a alta temperatura (*sic*) ou também podem ser retidos no resíduo sólido do processo (Pinto et al, 2008).

Tabela 2.6 Comparação de Análise Elementar do Lodo (B.S.).

	Charlson et al (1999)	Cronin (1999)	Zhao et al (1999)	Yu et al (2002)	Tarnawski (2004)	Macedo (2006)
Carbono(%)	14,70	14,62	8,99	16,01	12,50	13,39
Hidrogênio(%)	1,80	1,93	1,35	1,85	1,63	2,14
Nitrogênio (%)	0,35	0,17	0,28	0,07	0,26	0,21
Oxigênio (%)	17,50	9,75	7,22	7,72	15,20	17,50
Enxofre (%)	0,005	0,05	0,10	0,04	0,11	0,05
Cloro (%)	0,00	0,00	0,00	0,008	0,006	0,01
Cinzas (%)	18,60	13,48	17,06	14,53	7,40	8,14
PCS (MJ.kg ⁻¹)	4,885	6,60	1,772	3,816	4,20	3,88

Ainda no mesmo trabalho são mencionados diversos autores que reportam que a formação e destruição do NH₃ durante a cogaseificação dependem de vários parâmetros, tais como, temperatura de gaseificação, oxigênio ou vapor contido no reator, conteúdo de nitrogênio no material e ainda algum material inorgânico que possa reagir e formar NH₃. O aumento da temperatura leva a um decréscimo na liberação de NH₃ durante a fase gasosa, porque a decomposição termodinâmica do NH₃ é uma reação endotérmica, favorecido pelo aumento da temperatura. O aumento da relação de oxigênio também diminui a liberação de NH₃, provavelmente devido a maior formação de NO_x (Pinto et al, 2008).

No experimento, o lodo foi secado e misturado com pellets de palha para se obter diferentes composições que variam entre 0 e 100 % (lodo/palha). Durante as análises, a adição do lodo de esgoto aumentou a concentração de metano (CH₄) e hidrocarbonetos leves (C_nH_m) em torno de 48 a 62 %. A palha contém alto teor de voláteis, o que favorece a liberação rápida desses componentes e pode ter contribuído para o craqueamento e a reação de reforma, principalmente dos hidrocarbonetos leves. O aumento de hidrocarbonetos é acompanhado da redução da

liberação de H_2 em torno de 20 % para misturas de até 80 % de lodo de esgoto na mistura. Acima de dessa concentração não apresentou variação na concentração de H_2 (Pinto et al, 2008). Ainda segundo Pinto et al (2008) foi observado através da figura 2.8 que a adição de lodo de esgoto junto à palha reduziu em aproximadamente 47% a produção de CO, enquanto houve um aumento de aproximadamente 55 % no teor de CO_2 liberado no gás.

O autor comenta que esses resultados mostram que a presença do lodo de esgoto pode inverter a reação de Boudouart ou o carbono derivado do lodo de esgoto foi menos reativo para o CO_2 que o carbono derivado da palha (Pinto et al, 2008).

Já na figura 2.9 é destacado o acréscimo na liberação de CO_2 conforme aumenta o fator de oxigênio no leito. Entre fator 0,3 e 0,4 obteve-se melhor produção de CO, enquanto a melhor razão para a produção de H_2 foi com a relação tendendo a zero. Para o CH_4 há uma redução na produção com o aumento de oxigênio na reação.

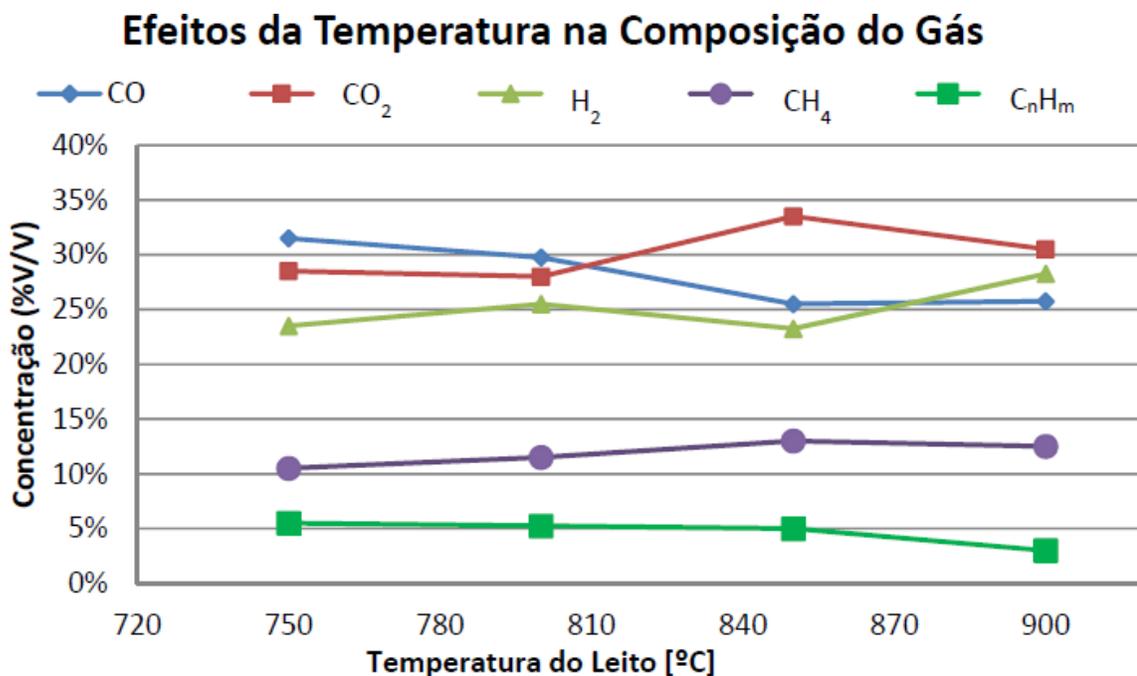


Figura 2.8 Efeitos da temperatura do leito na composição do gás na cogaseificação de *pellets* de palha e lodo de esgoto com uma mistura de 50/50 %. Fonte: Pinto et al, 2008

Efeitos da Relação de O₂ na Composição do Gás

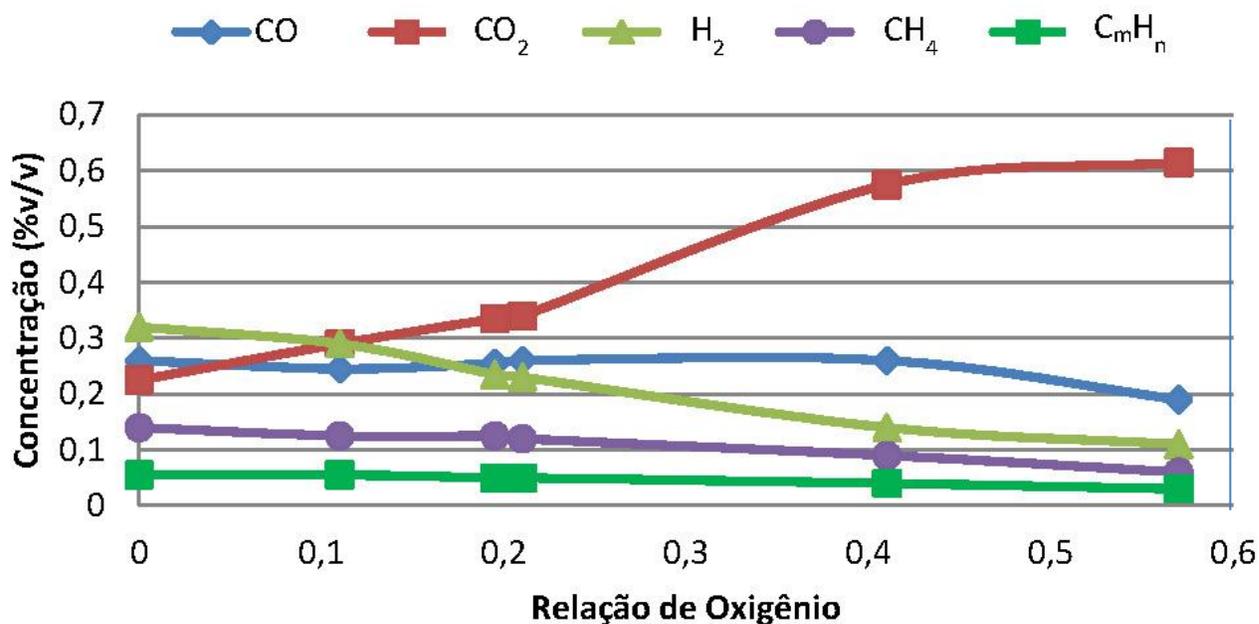


Figura 2.9 Efeitos da relação de oxigênio (ER) na composição do gás na cogaseificação de *pellets* de palha e lodo de esgoto com uma razão de mistura de 50/50 %. Fonte: Pinto et al, 2008

Na tabela 2.7 apresentam-se os resultados para as análises imediata, elementar e poder calorífico dos dois materiais gaseificados. O trabalho não apresenta qual a origem do lodo de esgoto estudado nem de qual planta é a palha utilizada.

Tabela 2.7 Caracterização Química dos Materiais.

	Biomassa	
	Pellets de Palha	Lodo Esgoto
Análise de Umidade (B.U.%)	9,06	8,70
Análise Imediata (B.S. %)		
Carbono Fixo	16,16	6,50
Voláteis	68,52	50,30
Cinzas	0,10	0,29
Análise Elementar (% B.S.)		
Carbono	49,27	55,80
Hidrogênio	6,21	7,40
Nitrogênio	0,77	7,40
Enxofre	0,15	1,90
Oxigênio	43,60	27,40
Cloro	0,28	0,14
Poder Calorífico Superior (B.S.)		
MJ/kg	19,80	23,90

Fonte: Pinto et al, 2008

2.6 Cinética da Volatilização

O estudo da cinética da degradação térmica incluindo a emissão dos voláteis é essencial para se compreender a dinâmica da gaseificação em leito fluidizado e os fenômenos envolvidos com vistas à otimização do processo. É importante reconhecer que existem variações de parâmetros cinéticos conforme cada pesquisador que não seguem apenas um único modelo. É afirmado que a volatilização ocorrida durante a gaseificação corresponde a 50 % da energia despendida no processo. (Sánchez et al, 2010)

Existem duas abordagens clássicas para o estudo da cinética da volatilização, uma a partir da curva de queda de massa, ou curva termogravimétrica (TGA) com elevação programada de temperatura. A outra é a partir da dinâmica de formação dos produtos da pirólise. Muitos trabalhos sobre pirólise são baseados na taxa de perda de massa da amostra original. Desde que a pirólise da madeira ocorra como resultado de uma série de reações competitivas consecutivas, a

determinação simples da cinética em termos de perda de massa pode ser imprópria para correlacionar a cinética de formação dos vários produtos da pirólise (Sánchez et al, 2010).

As informações existentes sobre a cinética do processo de pirólise e sobre a taxa de formação dos diferentes produtos da pirólise ainda são insuficientes para uma modelagem mais aprimorada. Para particulados finos, dos grupos classificados em Geldart A e B (Geldart, 1986), que são a maioria dos resíduos de biomassa, pode-se assumir que as partículas são isotérmicas e estão na mesma temperatura do meio. Sendo assim a taxa de volatilização é controlada apenas pela cinética das reações químicas envolvidas e também é considerado que nestas condições o gás de fluidização não vai afetar a taxa de volatilização. (Wildegger-Gaissmaier; Argawal, 1990 *apud* Sánchez et al.,2010). Deve-se ter ciência de que esta regra de transferência de calor para o interior da partícula tanto pela estrutura do carbono, quanto pelos gases não é validada para partículas grandes (Sánchez et al, 2010).

2.7 Cinética da Gaseificação em Leito Fluidizado

O modelamento de um gaseificador induz a determinar a composição do gás produzido através de equações termoquímicas que preveem o equilíbrio das reações básicas de gaseificação em função de pressão, temperatura, umidade e tipo do combustível além do teor de oxigênio do fluido de gaseificação e da dinâmica de fluidização.

Ao descrever um processo de gaseificação, deve-se estar ciente que a primeira etapa do processo como um todo é a pirólise e as reações envolvidas possibilitam análises em separado quando realizadas em reatores de leito fixo. Na gaseificação com reatores de leito fluidizado, não são observadas zonas separadas de pirólise, oxidação e redução. Esses processos acontecem simultaneamente em todo o volume do leito, assim, Bacon et al (1985) *apud* Sánchez et al (2010) considera que as reações químicas para a modelagem de gaseificadores de leito fluidizado são:

Oxidação do Carbono:





Reação de Boudouard: ($\Delta H = +172,6 \text{ kJ/mol}$)



Reação Carbono – Água: ($\Delta H = +131,4 \text{ kJ/mol}$)



Equação de formação do metano: ($\Delta H = - 74,93 \text{ kJ/mol}$)



A equações exotérmicas de oxidação fornecem o calor necessário para que as reações endotérmicas de redução ocorram. Ainda é destacado que os fatores que interferem nas reações são:

- Temperatura das correntes que entram nas zonas de reação;
- Perdas térmicas nas zonas de reação;
- Características do combustível (reatividade, cinzas e tamanho da partícula);
- Altura da zona de reação e
- Composição do agente gaseificante.

O processo quando realizado em leito fluidizado apresenta algumas vantagens se comparado com o reator de leito fixo, como a maior taxa de transferência de calor, devido maior contato das partículas da biomassa com a emulsão no interior do leito; homogeneidade do processo gerado pela agitação do leito na sua totalidade. A engenharia de fluidização classifica em diferentes maneiras os regimes de trabalho de um leito fluidizado com base no comportamento da emulsão no interior de um reator e estes são representados na figura 2.10.

O reator instalado no Laboratório De Combustão E Gaseificação Do Departamento De Engenharia Térmica E De Fluidos Da Faculdade De Engenharia Mecânica da UNICMAP é do tipo leito fluidizado borbulhante. A fluidização consiste na introdução de um fluido de maneira

ascendente no interior do reator e que provoca movimentação do leito de inerte. A partir de certo ponto a força peso das partículas é menor que a força do agente de fluidização, que é quando inicia a expansão do leito. Essa movimentação começa com expansão do leito e gradualmente muda o perfil do leito conforme a vazão do agente de fluidização aumenta, até chegar na elutriação das partículas, incitando o transporte pneumático do material do leito.

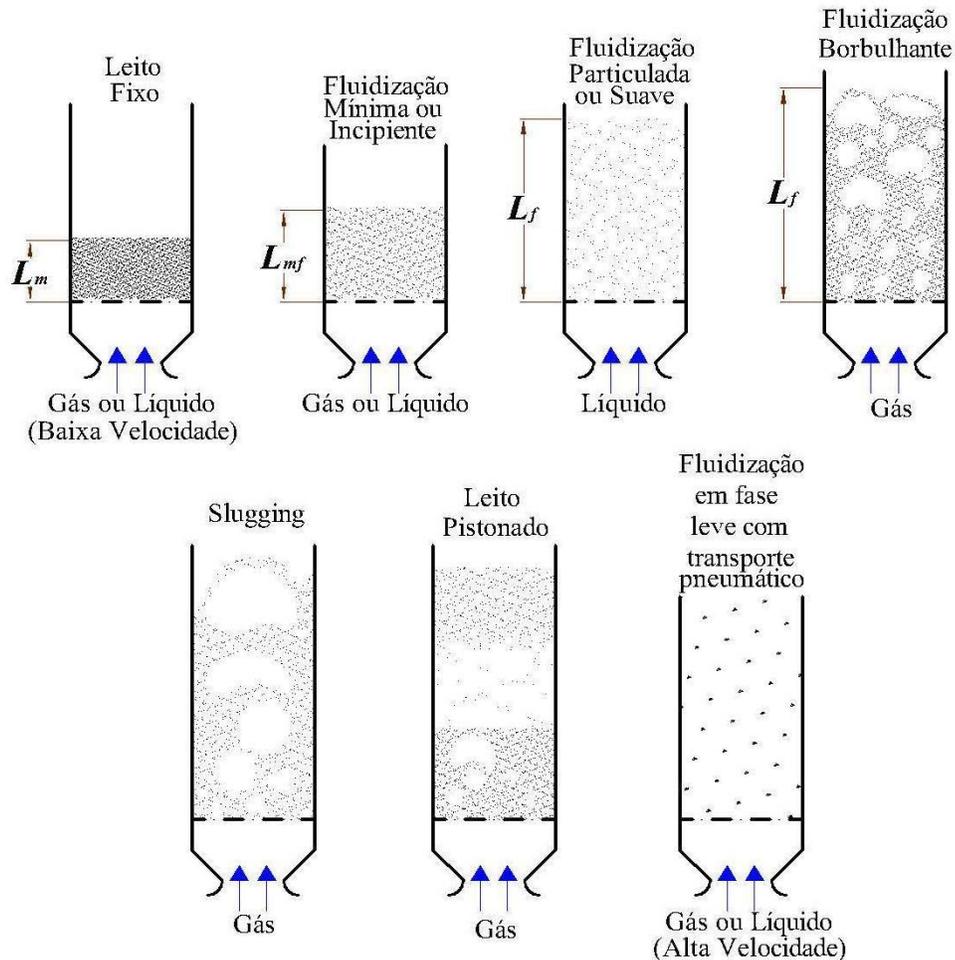


Figura 2.10 Diferentes tipos de leito fluidizado. Adaptado de: Kunii & Levenspiel (1991)

Os resultados presentes nas tabelas 2.6 e 2.7 permitem uma análise prévia do potencial do trabalho a ser realizado, uma vez que os valores apresentados por demais pesquisadores se assemelham ao potencial energético das biomassas em estudo.

2.8 Aplicações do Gás

É preciso ter conhecimento do produto produzido para se determinar a melhor aplicação, a gaseificação produz em atmosfera redutora um gás com propriedades combustíveis como já mencionado, porém, o modelo do reator de gaseificação determina sumariamente que tipo de gás é produzido. Em reatores de leito fluidizado, a temperatura de processo é menor a 1000°C, nesse regime o gás produzido é chamado apenas gás de gaseificação. Segundo Boerrigter e Rauch (2005), o gás de gaseificação ou gás produto é produzido em baixas temperatura de gaseificação, abaixo de 1000°C e contém CO, H₂, CH₄, C_nH_m, hidrocarbonetos alifáticos, benzeno, tolueno e alcatrão, ao lado de CO₂ e H₂O, esse é o gás de gaseificação.

O *BioSyngas* é produzido a alta temperatura, acima de 1200 °C ou por gaseificação catalítica. Nessas condições a biomassa é toda convertida em H₂ e CO, além de CO₂ e H₂O. O *BioSyngas* é quimicamente similar ao *syngas* derivado de combustíveis fósseis, e pode ter as mesmas aplicações. Também pode ser obtido a partir do craqueamento térmico ou reforma do gás de gaseificação. Ambos necessitam limpeza e condicionamento para dar ao gás a composição e especificações corretas para a aplicação final. Assim sendo, a escolha da aplicação que o gás terá depende de muitos fatores: do tipo de reator, da matéria prima e das condições de processo (Ciferno e Marano, 2002). As típicas aplicações do gás de gaseificação são em geração de potência: cofiring, ciclos de potência e calor (CHP); Ciclo combinado de gaseificação integrada (IGCC) e células de combustível; além do Gás Natural Sintético (SNG). O *Biosyngas* também pode ser utilizado para geração de potência; combustível para transporte, através de Síntese de Fischer-Tropsch e Metanol; Sínteses Químicas para: produção de fertilizantes a partir de amônia, hidroformulação de oleofinos, hidrogênio em refinarias e gás natural sintético. Além destas, pode-se ainda citar misturas de álcoois, produção de monóxido de carbono, oleofinos e aromáticos (Boerrigter e Rauch 2005). A figura 2.11 apresenta um diagrama que facilita o entendimento dessa lógica.

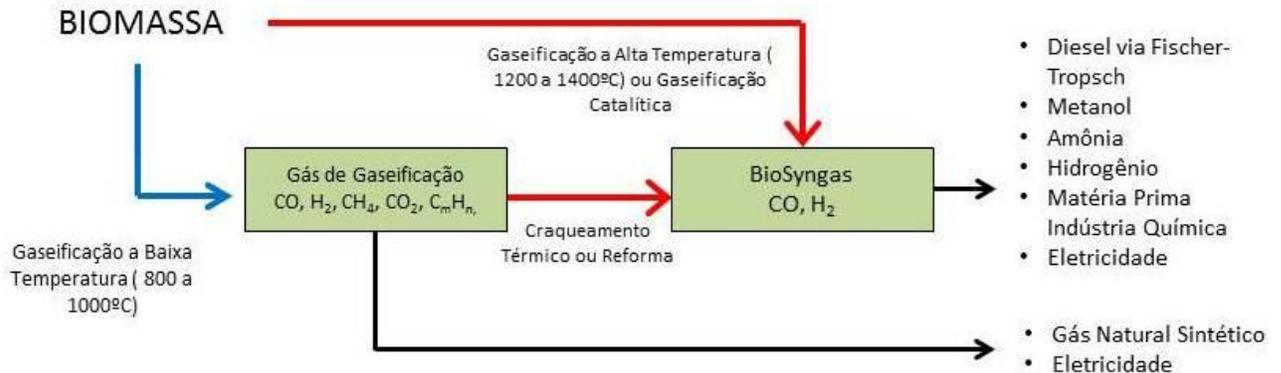


Figura 2.11 Diferença entre gás de gaseificação e biosyngas e suas aplicações. Adaptado de: Boerrigter e Rauch 2005

Em uma turbina a gás ou num motor de combustão interna, a composição do gás afeta o pico da temperatura de chama, que controla a formação de NO_x, e a relação ar/combustível. Os contaminantes presentes podem ser controlados com purificadores após a câmara de combustão para atender legislações, as quantidades podem variar entre 2 e 25 ppm de NO_x a uma taxa de 15 % de Oxigênio, semelhantes ao CO. Na Tabela 2.8 apresentam-se os efeitos fisiológicos que ocorrem em pessoas expostas a diferentes concentrações de monóxido de carbono.

Tabela 2.8 Concentração de CO no ambiente e impacto em seres humanos.

Concentrações de CO no ar	Tempo de inalação e sintomas
35 ppm	Concentração máxima permitida para exposição contínua em um período de 8 horas, de acordo com resolução do CONAMA no 003, 28/06/1990.
200 ppm	Leve dor de cabeça após 2-3 horas.
400 ppm	Dor de cabeça frontal dentro de 1-2 horas.
800 ppm	Náuseas e convulsões dentro de 45 min. Inconsciência em cerca de 2 horas.

Pertinente ao processo de gaseificação é o cuidado com a saúde de quem opera o reator. O monóxido de carbono somente pode ser detectado através de instrumentos de análise. Para segurança na condução dos experimentos se faz necessário o conhecimento das implicações que a inalação desses gases acarretam no ser humano.

Os processos de conversão termoquímica exigem pleno conhecimento das propriedades físico-químicas de um combustível, sendo de vital importância para os cálculos dos projetos. As propriedades inerentes à geometria da partícula, as propriedades físicas de materiais porosos, são necessárias especialmente quando se estudam processos em leito fluidizado, onde é preciso determinar a porosidade do leito, a queda de pressão, a densidade, a granulometria, etc. As propriedades químicas, a composição imediata, a composição elementar e o poder calorífico, são fundamentais para determinar a potencialidade de aplicação do combustível, ou seja, realizar os cálculos térmicos ou o balanço de energia em equipamentos energéticos (Sánchez et al, 2010). Atualmente é possível encontrar essas informações para os mais diversos combustíveis consultando a literatura disponível, porém, sempre é aconselhável realizar os testes para cada experimento para se obter melhores resultados.

2.9 Caracterização Físico – Química dos combustíveis e do material inerte

Os sistemas fluidizados contém partículas com tamanhos e formas diferentes, nesses sistemas é necessário o conhecimentos das propriedades estáticas e fluidodinâmicas do material inerte e da matéria prima de reação do processo (Yang, 2003).

2.9.1 Densidade aparente do leito

A determinação da densidade aparente de um material particulado é o quociente da sua massa pelo seu volume. Deve-se realizar a determinação da massa através de um volume de controle. A densidade aparente e o tamanho médio das partículas constituintes de um leito fluidizado são os parâmetros mais importantes que afetam o comportamento do leito (Yang, 2003). Na equação 3.1 temos a correlação descrita para o cálculo da densidade aparente:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_p} \quad (2.6)$$

além da densidade do leito, é importante saber a porosidade do mesmo, expressa por:

$$\varepsilon_f = 1 - \frac{\frac{M_L}{V_L}}{\rho_s} \quad (2.7)$$

onde:

M_s: Massa da partícula; V_p: Volume da partícula; M_L: Massa do leito ρ_s: densidade da partícula; V_L: Volume do Leito; ε_f: Porosidade do leito fixo levemente empacotado

2.9.2 Análise Granulométrica

A análise granulométrica visa determinar as frações em massa de cada dimensão característica que compõem a biomassa para ter embasamento ao realizar o dimensionamento do alimentador e a determinação da velocidade superficial do gás (Sánchez, 2010). O ensaio de granulometria é o processo utilizado para definir as faixas pré-estabelecidas de tamanhos de grãos e a percentagem em peso que cada faixa especificada de partículas representa na massa total ensaiada.

É realizada através de peneiramento em peneiras padronizadas da Série Tyler. O peneiramento é realizado através de um vibrador eletromecânico marca Produtest com controle de intensidade e tempo de processo. Conforme Pellegrino (2006), tempos de testes superiores a 5 minutos não interferem na quantidade de material separado, sendo assim este é o tempo que se utilizou para as análises.

O diâmetro médio das partículas é calculado através da equação:

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (2.8)$$

onde:

d_p : diâmetro médio das partículas, mm; x_i : fração mássica das partículas com diâmetro médio igual a d_{pi} ; d_{pi} : diâmetro médio das partículas retidas entre uma peneira e a sua subsequente, mm.

Após os testes, as partículas devem ser classificadas em diferentes regimes de fluidização, conforme o diagrama de Geldart, demonstrado na figura 2.12. As partículas do grupo A, são as menores, o comportamento observado é a expansão do leito antes do borbulhamento, tendem a apresentar comportamento de fluidização homogênea. As partículas do grupo B são de tamanho intermediário, tem comportamento borbulhante logo após a zona de condição de mínima fluidização. Do tipo C, são partículas mais coesas, são as de mais difícil fluidização. Já as partículas do tipo D, são as de maior diâmetro de partícula, o comportamento é similar ao de um jorro turbulento, com a formação de canais preferenciais no leito expandido.

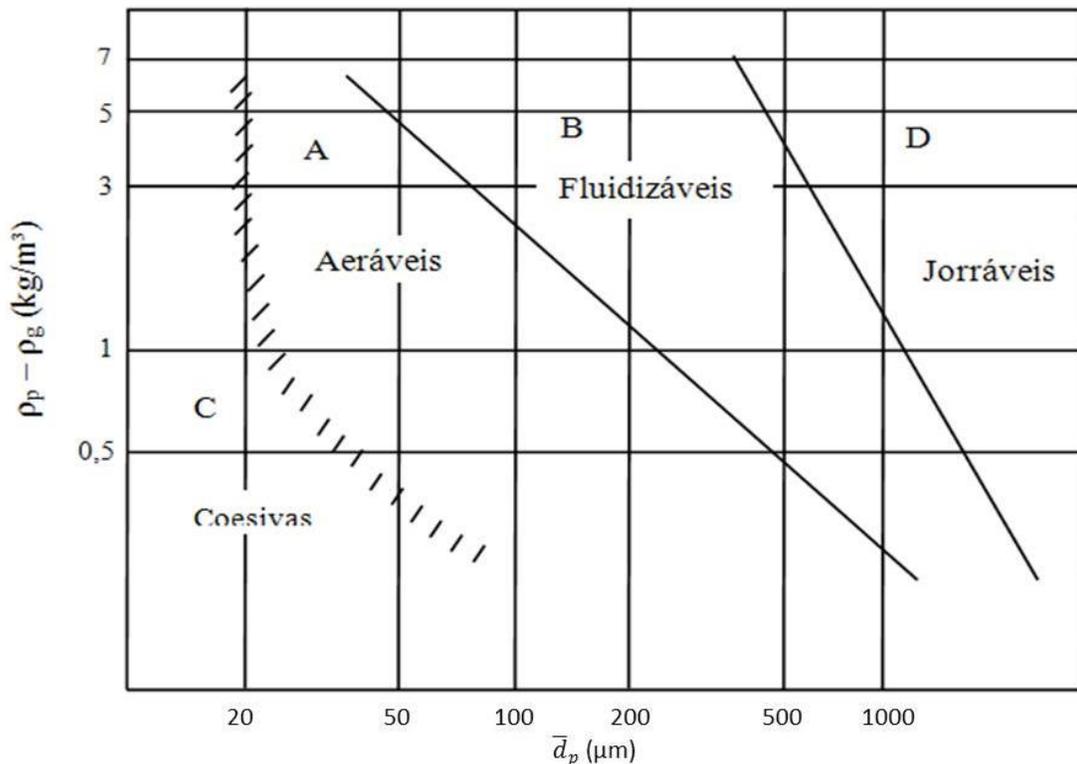


Figura 2.12 Diagrama de Geldart. Adaptado de Geldart, 1986

A biomassa vegetal deste trabalho é fornecida em lascas e de tamanho irregular entre 5 e 20mm de comprimento por 2 a 10mm de largura. Junto às lascas também existe um pouco de

particulados menores e que variam em largura e comprimento. A biomassa foi moída para homogeneização e redução do tamanho da partícula em um moinho de facas com peneira com furos de Ø 5,5mm a uma rotação de 570 revoluções por minuto, marca Rone[®].

2.9.3 Análise Imediata

A análise imediata fornece frações em peso do teor de carbono, cinzas, voláteis e umidade.

2.9.3.1 Análise de Umidade

A determinação de umidade deve ser realizada em forno de secagem e é a primeira análise a ser realizada e demonstra a aplicabilidade do material em processos termoquímicos, biomassas com umidade superior a 50% têm restrições quanto ao uso termoquímico. Para a determinação da umidade foi seguido um roteiro da norma: “E871 – 82 (Reapproved 2006) Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels”. Esta norma se aplica a combustíveis particulados de madeira: Pellets, serragem, cavacos de árvore verde, destocagem, madeira triturada ou qualquer tipo de combustível de madeira particulada de volume inferior a 1in³:

O cálculo do percentual de umidade é dado por:

$$\% \text{ umidade} = B = \left[\frac{(m_{iu} - m_{fs})}{(m_{iu} - m_c)} \right] \times 100 \quad (2.9)$$

onde:

m_{iu} = massa inicial da amostra úmida com o cadinho tampado; m_{fs} = massa final da amostra seca e estabilizada com o cadinho tampado; m_c = massa do cadinho vazio e tampado.

2.9.3.2 Análise de Voláteis

A determinação da fração volátil é importante para a previsão da chama que um combustível vai produzir, pois durante a devolatilização há o desprendimento de gases combustíveis formados durante a elevação da temperatura da biomassa. Seu conhecimento auxilia, por exemplo, no dimensionamento do volume de uma fornalha e fornece conhecimento sobre a dinâmica da chama formada durante a oxidação ou redução da biomassa. A parte volátil do combustível é formada praticamente de metano, monóxido de carbono e hidrogênio, além de gases não combustíveis, oxigênio e nitrogênio.

A determinação de voláteis em resíduos de madeiras segue roteiro adaptado da norma “ASTM- E872 – 82 (Reapproved 2006) Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels” e aplica-se aos mesmos combustíveis da norma anterior. O procedimento é sequência da análise de umidade. Este método de teste determina a porcentagem de produtos gasosos, exclusivo de vapor de umidade, na amostra de análise de combustível de partículas de madeira que é liberado nas condições específicas do teste conforme segue:

$$\% \text{ voláteis} = A - B \quad (2.10)$$

$$A = \left[\frac{(m_{fs} - m_{fv})}{(m_{fs} - m_c)} \right] \times 100 \quad (2.11)$$

onde:

m_{fs} = massa final da amostra seca e estabilizada com o cadinho tampado; m_{fv} = massa final da amostra volatilizada com o cadinho tampado; m_c = massa do cadinho vazio e tampado; B = Valor % de umidade calculada na norma E871 – 82

2.9.3.3 Análise de Cinzas

As cinzas provêm do material residual da oxidação completa do combustível sólido, composta basicamente por particulados inorgânicos, ou seja, todos os constituintes minerais do

combustível e dependendo do combustível original, poder-se-á ter a destinação como insumo agrícola. Esses minerais são encontrados sendo óxidos, citam-se o Óxido de alumínio (Al_2O_3); Óxido férrico (Fe_2O_3); Óxido de silício (SiO_2); Óxido de Potássio (K_2O); Óxido de Calcio (CaO); Óxido de Magnésio (MgO); etc. A determinação de cinzas segue roteiro das normas “*ASTM E1102 – 84 Standard Test Method for Ash in Wood*” e “*ASTM E1534 – 93 Standard Test Method Ash Content of Particulate Wood Fuels*”, como descrito:

$$\% \text{ cinzas} = \left[\frac{(m_{cz} - m_c)}{(m_{fs} - P_c)} \right] \times 100 \quad (2.12)$$

onde:

m_{cz} = Massa do cadinho tampado com as cinzas; m_c = massa do cadinho vazio e tampado; m_{fv} = massa final da amostra volatilizada com o cadinho tampado

2.9.3.4 Determinação do Carbono Fixo

A determinação do carbono fixo é dada pela diferença entre os teores (%) de umidade, matéria volátil e cinzas e 100%. (Sánchez et al, 2010)

$$\% \text{ carbono fixo} = 100\% - \% \text{ umidade} - \% \text{ voláteis} - \% \text{ cinzas} \quad (2.13)$$

2.9.4 Análise Elementar

A análise elementar possibilita o conhecimento das frações em massa dos elementos constituintes do combustível, a análise é realizada com os gases provenientes da pirólise da amostra (PerkinElmer, 2005). Neste trabalho, os resultados das análises elementares foram obtidos através do equipamento Perkin Elmer CHN-2400, realizadas na Central Analítica do Instituto de Química da USP. Segundo o manual do fabricante (PerkinElmer, 2005), o

equipamento tem uma acuracidade $\leq 0,3 \%$ e a precisão é $\leq 0,2 \%$. Figueiredo, 2009, relata que no resultado da análise elementar resta um resíduo que é considerado, primeiramente como cinzas e que raramente essa porção de resíduo se iguala à concentração de cinzas determinada pela análise imediata, devido a pequenos erros de diferença de técnicas. De qualquer modo, uma amostra com alto teor de cinzas possui um correspondente alto teor de resíduos.

2.9.5 Poder Calorífico

O poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de calor liberado por unidade de massa ou volume de um combustível quando completamente oxidado a uma dada temperatura e pressão (Pellegrino, 2006). O poder calorífico é determinado utilizando a técnica da bomba calorimétrica com um roteiro adaptado da norma *ASTM D-240-92 (Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbons Fuels by Bombs Calorimeter)*.

Para a realização do ensaio, a biomassa deve ser moída até um diâmetro inferior a 250 μ m e em seguida é comprimida em uma pastilha com aproximadamente 1g de massa. A pastilha é então oxidada sob uma atmosfera de oxigênio puro a 30bar de pressão. O ensaio da bomba calorimétrica determina o Poder Calorífico Superior (PCS) do combustível e inclui o calor latente de condensação da água formada na reação. Segundo Sánchez (1994) o Poder Calorífico Inferior (PCI) é determinado pela equação 12.

$$PCI = PCS - 0,21214 \cdot (H) \quad (2.14)$$

Onde H é a porcentagem de hidrogênio do combustível em base seca. O poder calorífico também pode ser calculado por equacionamentos, onde as mais conhecidas são as equação de Dulong-Petit (eq. 2.13 a 2.15) e a equação de Mendeleev, (Mendeleev, 1897), (eq. 2.16). Os resultados são determinados a partir dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio determinados na análise elementar.

$$PCS = 81C^t + 344 \left(H^t - \frac{O^t}{8} \right) + 25S^t \quad \left[\frac{kCal}{kg} \right] \quad (2.15)$$

$$PCI = 81C^t + 344 \left(H^t - \frac{O^t}{8} \right) + 25S^t - 6w \quad \left[\frac{kCal}{kg} \right] \quad (2.16)$$

Sendo que w é dado por:

$$w = 9H^t + u \quad (2.17)$$

$$PCI = 81C^t + 300H^t - 26(O^t - S^t) \quad \left[\frac{kCal}{kg} \right] \quad (2.18)$$

onde:

C^t = Teor de carbono; H^t = teor de hidrogênio; O^t = teor de oxigênio; S^t = teor de enxofre; u = umidade do combustível; PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior.

Nos resultados calculados por estas equações, o valor considerado para o teor de oxigênio na análise elementar foi determinado por diferença com o desconto das cinzas.

2.10 Demanda de Energia

Segue-se aqui a metodologia de cálculo apresentada em Sánchez, 1994; Behaine, 1999 e Pellegrino, 2006. Os cálculos energéticos do processo são apresentados na sequência:

2.10.1 Balanço de massa do gaseificador

A equação 2.17, tem seu resultado considerado ideal quando $B = 100\%$, (Sánchez, 2010)

$$B = \frac{1,3 \times V_{gás} + \dot{m}_{cinza}}{1,2 \times VA + \dot{m}_{comb}} \times 100 \quad (2.19)$$

sendo:

B = fechamento do balanço de massa, %; $V_{gás}$ = vazão de gás na saída do reator, Nm^3/s ;

\dot{m}_{cinza} = vazão mássica de cinzas, kg_{comb}/s ; \dot{m}_{comb} = vazão mássica de combustível, kg_{comb}/s

A vazão de ar real (VA) fornecida ao gaseificador é definida por (Sánchez, 1994):

$$VA = FA \cdot VA^* \cdot \dot{m}_{comb} \quad (2.20)$$

sendo:

VA = vazão real de ar, Nm^3/s ; FA = fator de ar, Nm^3/kg ; VA^* = vazão de ar estequiométrica, Nm^3/kg_{comb}

$$V_{gás} = \left(\frac{\dot{m}_{gás}}{\rho_{gás}} \right) = \frac{E(total)}{PCI_g} \quad (2.21)$$

$$\dot{m}_{gás} = \dot{m}_{comb} + \dot{m}_{ar} \quad (2.22)$$

$$\rho_{gás} = (C_{CO}\rho_{CO} + C_{H_2}\rho_{H_2} + C_{N_2}\rho_{N_2} + C_{O_2}\rho_{O_2} + C_{CO_2}\rho_{CO_2} + C_{CH_4}\rho_{CH_4} + \dots) \quad (2.23)$$

$$E(total) = V_{gás} \times PCI_g \quad (2.24)$$

A partir da equação 2.18, a vazão mássica de ar é determinada por:

$$\dot{m}_{ar} = FA \cdot VA^* \cdot \dot{m}_{comb} \cdot \rho_{ar} \quad (2.25)$$

sendo:

$V_{gás}$ = vazão de gás na saída do reator, Nm^3/s ; $\rho_{gás}$ = densidade do gás a t_s , kg/Nm^3 ; C_{CO} = concentração de monóxido de carbono, %; ρ_{CO} = densidade do monóxido de carbono a t_s , kg/Nm^3 ; C_{H_2} = concentração de hidrogênio; ρ_{H_2} = densidade do hidrogênio a t_s , kg/Nm^3 ; C_{N_2} = concentração de nitrogênio; ρ_{N_2} = densidade do nitrogênio a t_s , kg/Nm^3 ; C_{O_2} = concentração de oxigênio; ρ_{O_2} = densidade do oxigênio a t_s , kg/Nm^3 ; C_{CO_2} = concentração de dióxido de carbono,

$\%$; ρ_{CO_2} = densidade do dióxido de carbono a t_s , kg/Nm^3 ; C_{CH_4} = concentração de metano, $\%$; ρ_{CH_4} = densidade do Metano a t_s , kg/Nm^3 ; $\dot{m}_{gás}$ = vazão mássica de gás, kg/s ; \dot{m}_{comb} = Vazão mássica de combustível, kg_{comb}/s ; \dot{m}_{ar} = Vazão mássica de ar, kg/s ; PCI_g = poder calorífico inferior do gás, MJ/Nm^3 ; E_{total} = energia total do gás produzido no gaseificador, MW ; t_s = temperatura do gás na saída do free-board, $^{\circ}C$.

A partir da análise elementar dos combustíveis, a vazão de ar estequiométrica é dada por (Yurieniev; Lebediev, 1976). A vazão representa a condição ideal de vazão de ar para a combustão completa, por isso chamada de vazão de ar estequiométrica.

$$VA^* = 0,0889(C^t + 0,375.S^t) + 0,265.H^t - 0,033.O^t \quad (2.26)$$

Com o consumo de combustível

$$\dot{m}_{comb} = \frac{E(total)}{PCI_g \eta_{gaseif}} \quad (2.27)$$

ou determina-se experimentalmente conforme calibração do alimentador do gaseificador, a partir de um fator de ar pré-determinado antes do experimento.

$$\eta_{gaseif} = 100 \times \left(\frac{\dot{Q}_{útil}}{\dot{Q}_d} \right) \quad (2.28)$$

Sendo:

$$Q_{útil} = \frac{V_{gás}}{\dot{m}_{comb}} \times PCI_g \quad (2.29)$$

O gás produto gerado no processo tem seu poder calorífico calculado após ensaio cromatográfico, a partir da determinação de teores dos componentes e o PCI é calculado pela equação (Pêra, 1980):

$$PCI_g = 0,126.C_{CO} + 0,358.C_{CH_4} + 0,108.C_{H_2} \quad (2.30)$$

Outra equação para o cálculo do PCI de um gás combustível a partir da sua concentração é o modelo proposto por Dulong (José, 2009) que se apresenta menos conservador que a equação 2.30:

$$PCI_g = 3050. C_{CO} + 2580. C_{H_2} + 8530. C_{CH_4} + 13500. C_{C_2H_2} + 14050. C_{C_2H_4} \quad (2.31)$$

onde:

C_{CO} = concentração de monóxido de carbono, %; C_{H_2} = concentração de hidrogênio, %; C_{CH_4} = concentração de metano, %; $C_{C_2H_2}$ = concentração de acetileno, %; $C_{C_2H_4}$ = concentração de etileno, %.

A vazão volumétrica corrigida para a temperatura do leito é dada por

$$V_{gl} = \frac{VA \times (t_l + 273,15)}{273,15} \quad (2.32)$$

onde:

V_{gl} = vazão de gás na temperatura do leito, Nm^3/s ; t_l = temperatura do leito, °C.

2.10.2 Balanço de energia do sistema

O balanço de energia do sistema a base úmida é o somatório das energias geradas e perdas durante o processo, cujo valor total é dado por

$$Q_d = Q_{gás} + Q_{cinzas} + Q_{útil} + Q_{M.A.} = PCI_{comb} + Q_{ar} \quad (2.33)$$

onde:

Q_d = energia disponível, MJ/kg_{comb} ; $Q_{gás}$ = perda de energia pela entalpia do gás, MJ/kg_{comb} ; Q_{cinzas} = perda de energia total pelo arraste das cinzas, MJ/kg_{comb} ; $Q_{útil}$ = energia

útil, MJ/kg_{comb} ; $Q_{M.A.}$ = perda de energia para o meio ambiente, MJ/kg_{comb} ; Q_{ar} = energia do ar do compressor, MJ/kg_{comb} ; PCI_{comb} = poder calorífico inferior do combustível, MJ/kg_{comb} .

A energia perdida pelo gás é dada por

$$Q_{gás} = (h_{gás} - FA \cdot h_{a1}) \quad (2.34)$$

sendo que:

$$h_{gás} = (C_{CO}h_{CO} + C_{H_2}h_{H_2} + C_{N_2}h_{N_2} + C_{O_2}h_{O_2} + C_{CO_2}h_{CO_2} + C_{CH_4}h_{CH_4}) \cdot \frac{V_g}{m_{comb}}$$

(2.35)

onde:

$Q_{gás}$ = perda de energia pela entalpia do gás, MJ/kg_{comb} ; $h_{gás}$ = entalpia do gás a t_s , MJ/Nm^3 ; FA = fator de ar, Nm^3/kg_{comb} ; h_{a1} = entalpia do ar na entrada do compressor, MJ/Nm^3 ; C_{CO} = concentração de monóxido de carbono, %; h_{CO} = Entalpia do monóxido de carbono; C_{H_2} = concentração de hidrogênio; h_{H_2} = entalpia do hidrogênio a t_s , MJ/Nm^3 ; C_{N_2} = concentração de nitrogênio; h_{N_2} = entalpia do nitrogênio a t_s , MJ/Nm^3 ; C_{O_2} = concentração de oxigênio; h_{O_2} = entalpia do oxigênio a t_s , MJ/Nm^3 ; C_{CO_2} = concentração de dióxido de carbono, %; h_{CO_2} = entalpia do dióxido de carbono a t_s , MJ/Nm^3 ; C_{CH_4} = concentração de metano, %; h_{CH_4} = entalpia do Metano a t_s , MJ/Nm^3 ; $V_{gás}$ = vazão de gás na saída do reator, Nm^3/s ; \dot{m}_{comb} = Vazão mássica de combustível, kg_{comb}/s .

A perda de energia total pelo arraste das cinzas é dada por:

$$Q_{cinzas} = Q_{c.s.} + Q_{carb} \quad (2.36)$$

e a perda de energia pela entalpia das cinzas:

$$Q_{c.s.} = \left(\frac{\dot{m}_{cinza}}{\dot{m}_{comb}} \times 100 \right) \cdot cp_{cinza} \cdot (t_s - t_e) \quad (2.37)$$

onde:

$Q_{c.s.}$ = perda de energia pela entalpia das cinzas, MJ/kg_{comb} ; \dot{m}_{cinza} = Vazão mássica de cinzas, kg/s ; \dot{m}_{comb} = Vazão mássica de combustível, kg_{comb}/s ; cp_{cinza} = calor específico das cinzas nos

gases, MJ/Nm³; t_s = temperatura do gás antes do ciclone, °C; t_e = temperatura de entrada do combustível no reator, °C;

Conforme Yuriniev e Lebediev, (1976):

$$cp_{cinza} = 0,832 + 0,00167t_{cinzas} \quad (2.38)$$

onde:

t_{cinzas} = temperatura das cinzas no ciclone, °C;

A perda de energia pelo carbono não queimado é determinada por:

$$Q_{carb} = \left(\frac{\dot{m}_{cinza}}{\dot{m}_{comb}} \times 100 \right) \cdot (C_{carb} \times PCI_{carb}) \quad (2.39)$$

onde:

Q_{carb}. = perda de energia pelo carbono não queimado nas cinzas, MJ/kg_{comb}; \dot{m}_{cinza} = Vazão mássica de cinzas, kg/s; \dot{m}_{comb} = Vazão mássica de combustível, kg_{comb}/s; C_{carb} = concentração de carbono fixo nas cinzas dos gases,%; PCI_{carb} = poder calorífico inferior do carbono fixo (Raznjevic, 1970 apud Sánchez, 2010) = 32,804 MJ/kg.

A energia do ar do compressor é dada por:

$$Q_{ar} = FA(h_{a_2} - h_{a_1}) \quad (2.40)$$

$$h_{a_2} = VA \times CP_{a_2} \times t_{a_2} \quad (2.41)$$

$$h_{a_1} = VA \times CP_{a_1} \times t_{a_1} \quad (2.42)$$

onde:

Q_{ar}. = perda de energia pelo ar do compressor, MJ/kg_{comb}; h_{a1} = entalpia do ar na entrada do compressor, MJ/kg_{comb}; h_{a2} = entalpia do ar na saída do compressor, MJ/kg_{comb}; Cp_{a1} = calor específico do ar a t_{a1}, MJ/Nm³; Cp_{a2} = calor específico do ar a t_{a2}, MJ/Nm³; t_{a1} = temperatura do ar na entrada do compressor, °C; t_{a2} = temperatura do ar na saída do compressor, °C.

As perdas para o meio ambiente podem ser estimadas por:

$$Q_{M.A.} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_i \cdot A_i}{\dot{m}_{comb}} \right) \cdot (t_{si} - t_{amb}) \quad (2.43)$$

onde:

$Q_{M.A.}$ = perda de energia para o meio ambiente, MJ/kg_{comb}; A_i = área na secção do reator, m²; u_i = coeficiente de transferência de calor na secção i, MJ/m²; t_{si} = temperatura externa do reator numa secção i, °C; t_{amb} = temperatura do ar no ambiente, °C.

2.10.3 Eficiência do gaseificador

Define-se que:

$$q_{\text{útil}} = \left(\frac{Q_{\text{útil}}}{Q_d} \right) \times 100 \quad (2.44)$$

$$q_{\text{gás}} = \left(\frac{Q_{\text{gás}}}{Q_d} \right) \times 100 \quad (2.45)$$

$$q_{\text{carb}} = \left(\frac{Q_{\text{carb}}}{Q_d} \right) \times 100 \quad (2.46)$$

$$q_{\text{c.s.}} = \left(\frac{Q_{\text{c.s.}}}{Q_d} \right) \times 100 \quad (2.47)$$

$$q_{\text{M.A.}} = \left(\frac{Q_{\text{M.A.}}}{Q_d} \right) \times 100 \quad (2.48)$$

e dividindo-se a equação 2.30 por 100%, temos

$$q_{\text{útil}} + q_{\text{gás}} + q_{\text{carb}} + q_{\text{cinzas}} + q_{\text{M.A.}} = 100 \quad (2.49)$$

Pode-se então definir que a eficiência a frio é determinada por:

$$Ef_f = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_d} \quad (2.50)$$

e a eficiência a quente determina-se com:

$$Ef_q = Ef_f + q_g \quad (2.51)$$

onde:

Ef_f = eficiência a frio; Ef_q = eficiência a quente

Na falta de informações com maior precisão, o $Q_{M.A.}$ pode ser determinado através da equação 2.46.

2.10.4 Velocidade de fluidização

A velocidade de mínima fluidização é dada por (Kunii, 1991):

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 \cdot (\rho_p - \rho_g) g}{150 \cdot \mu_g} \cdot \frac{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi^2}{1 - \varepsilon_{mf}} \quad (2.52)$$

O valor da velocidade superficial é um item que varia muito de autor para autor, assim, a velocidade superficial do gás é dada por uma ampla faixa, sendo necessária a determinação experimental do melhor valor:

$$U_o = (5 \text{ a } 10) U_{mf} \quad (2.53)$$

onde:

U_{mf} = velocidade de mínima fluidização, m/s; d_p = diâmetro de partícula, μm ; ρ_p = densidade da partícula, kg/m^3 ; ρ_g = densidade do gás produzido, kg/m^3 ; g = aceleração da gravidade, m/s^2 ; ε_{mf} = porosidade de mínima fluidização, adimensional; ϕ = esfericidade, adimensional; μ_g = viscosidade dinâmica do gás, Pa.s; U_o = velocidade superficial, m/s.

2.10.5 Queda de pressão no leito

A queda de pressão no leito é dada por (Kunii, 1991):

$$\Delta P_{leito} = L_{mf} \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_{inerte} - \rho_g) g \quad (2.54)$$

onde:

ΔP_{leito} = queda de pressão no leito, Pa; L_{mf} = altura do leito de mínima fluidização, m³;
 ρ_{inerte} = densidade do material inerte do leito, kg/m³.

2.10.6 Velocidade Terminal da Partícula

Para Souza-Santos (1996) a velocidade terminal da partícula é uma propriedade que deve ser conhecida, pois é a velocidade máxima de fluidização que a partícula suporta antes da elutriação. Para a estimativa do valor dessa propriedade, o mesmo autor apresenta duas equações para diferentes faixas de Reynolds da partícula (Re_p). Primeiramente é calculado o Reynolds da partícula através da equação:

$$Re_p = \frac{d_p \cdot \rho_g \cdot U_t}{\mu_g} \quad (2.55)$$

sendo que:

$$U_t = d_p \left[\frac{4 \cdot (\rho_p - \rho_g)^2 \cdot g^2}{225 \cdot \rho_g \cdot \mu_g} \right]^{1/3} \quad (2.56)$$

para $0,4 < Re_p < 500$. Caso a condição dessa faixa de Reynolds não seja cumprida, deve então utilizar a seguinte equação para uma faixa de $Re_p < 0,4$:

$$U_t = \frac{g \cdot (\rho_p - \rho_g)^2 \cdot d_p^2}{18 \cdot \mu_g} \quad (2.57)$$

Para uma faixa de Reynolds da partícula > 500, deve-se então, utilizar:

$$U_t = \left[\frac{3,1 \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g \cdot d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad (2.58)$$

onde:

Re_p = número de Reynolds da partícula; d_p = diâmetro da partícula, m; g = aceleração da gravidade, m/s²; ρ_g = densidade do gás, kg/m³; ρ_p = densidade da partícula, kg/m³; U_t = velocidade terminal da partícula, m/s; μ_g = viscosidade dinâmica do gás, Pa.s;

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo é descrito o equipamento utilizado, as análises laboratoriais inerentes ao processo de gaseificação e o procedimento seguido para a realização dos experimentos.

3.1 O Reator

O reator utilizado é o mesmo que Pellegrino (2006) utilizou para gaseificar carvão mineral com adição de dolomita e vapor d'água, figura 3.1, os detalhes construtivos aqui descritos são baseados no mesmo trabalho.



Figura 3.1 Reator utilizado no experimento

A coluna de reação consiste em um tubo cilíndrico calandrado a partir de uma chapa de aço inoxidável AISI 310 com 2m de comprimento e 3 mm de espessura. Este comprimento corresponde à zona de leito até o free-board. Externamente está revestido com uma camada de 150 mm de manta refratária KAWOOL e proteção mecânica por chapa *plissada* em alumínio. O diâmetro interno do reator é de 200 mm.

A placa distribuidora de ar localizada na base do tubo foi construída com uma chapa de aço inox de 4 mm de espessura composta por 39 bicos de 10 mm de diâmetro e 25 mm de altura, distribuídos em toda a seção transversal da placa onde cada bico possui 4 orifícios de saída do ar de 2 mm. Todas as interligações entre elementos do reator são através de flanges parafusadas. O sistema de aquecimento localiza-se na parte inferior do corpo do reator e emprega o GLP como combustível, é um tubo cilíndrico revestido de cimento refratário com sensor ótico de chama para corte da alimentação do GLP. A alimentação de serragem é feita através de um conjunto composto por um silo de armazenagem com capacidade de 1 m³, abaixo do silo há uma válvula rotativa do tipo eclusa que dosa a quantidade de combustível e um transportador rosca sem-fim com passo constante e Ø 55 mm que tem a função de introduzir a serragem no leito. A válvula rotativa e a rosca sem fim possuem sistema de tração por motor/correia e motor/corrente respectivamente. Para controle da dosagem de serragem no silo, foi construído um novo rotor da válvula dosadora com volume calculado de 1 litro nas cavidades do rotor da eclusa, visualizados na figura 3.2.

Os detalhes dimensionais do rotor fabricado são apresentados no anexo B. O rotor é construído em aço carbono SAE1020. Para o controle da rotação da válvula dosadora e da rosca de alimentação foram instalados inversores de frequência da marca WEG modelo CFW-08 e CFW-10 respectivamente. O reator necessitou de manutenção e alterações para operar nas condições deste trabalho. Durante a manutenção do mesmo, foi desmontada toda a tubulação de saída de gases e o ciclone e retirados particulados aderidos às paredes internas. A rosca de alimentação de biomassa necessitou de substituição dos passos helicoidais que estavam enferrujados e deteriorados. A rosca sem-fim possui um tubo interno que conduz água de refrigeração e para medir a vazão da água utilizada na refrigeração foi instalado um rotâmetro para visualização da vazão necessária, com escala de 0 a 1500 l/hora. Todas as vedações de

flanges foram substituídas para garantir a vedação do sistema, pois os gases produzidos no processo de gaseificação são tóxicos.

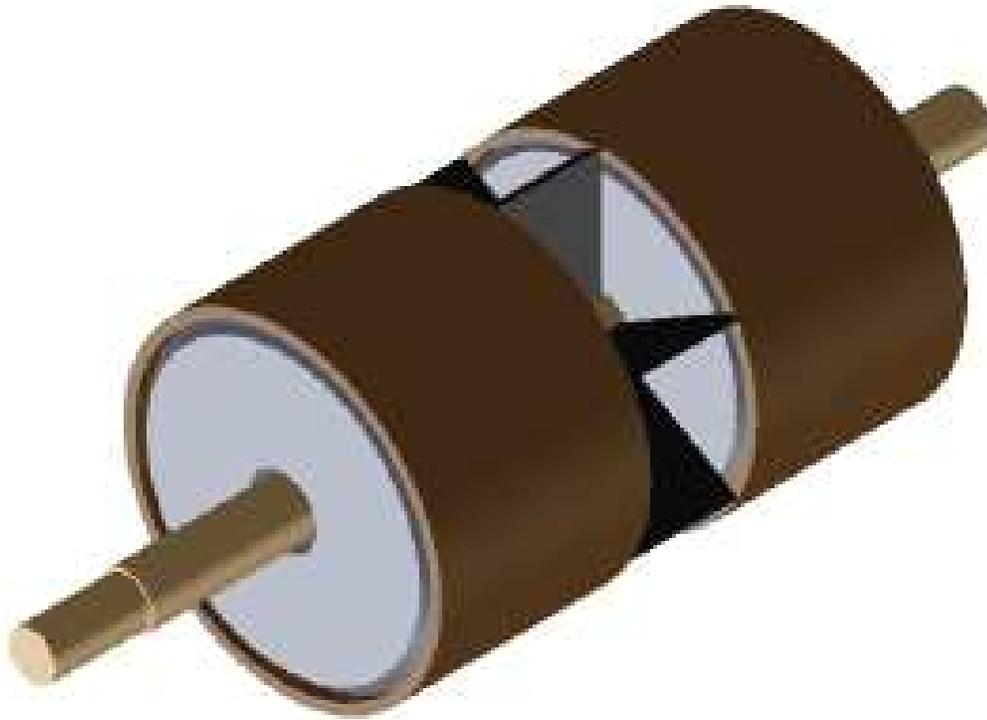


Figura 3.2 Rotor Construído para a válvula dosadora

Para alimentação do GLP necessário para a partida do reator, foi construída uma nova rede de alimentação, exclusiva para o abastecimento do reator, conforme croqui apresentado na figura 3.3.

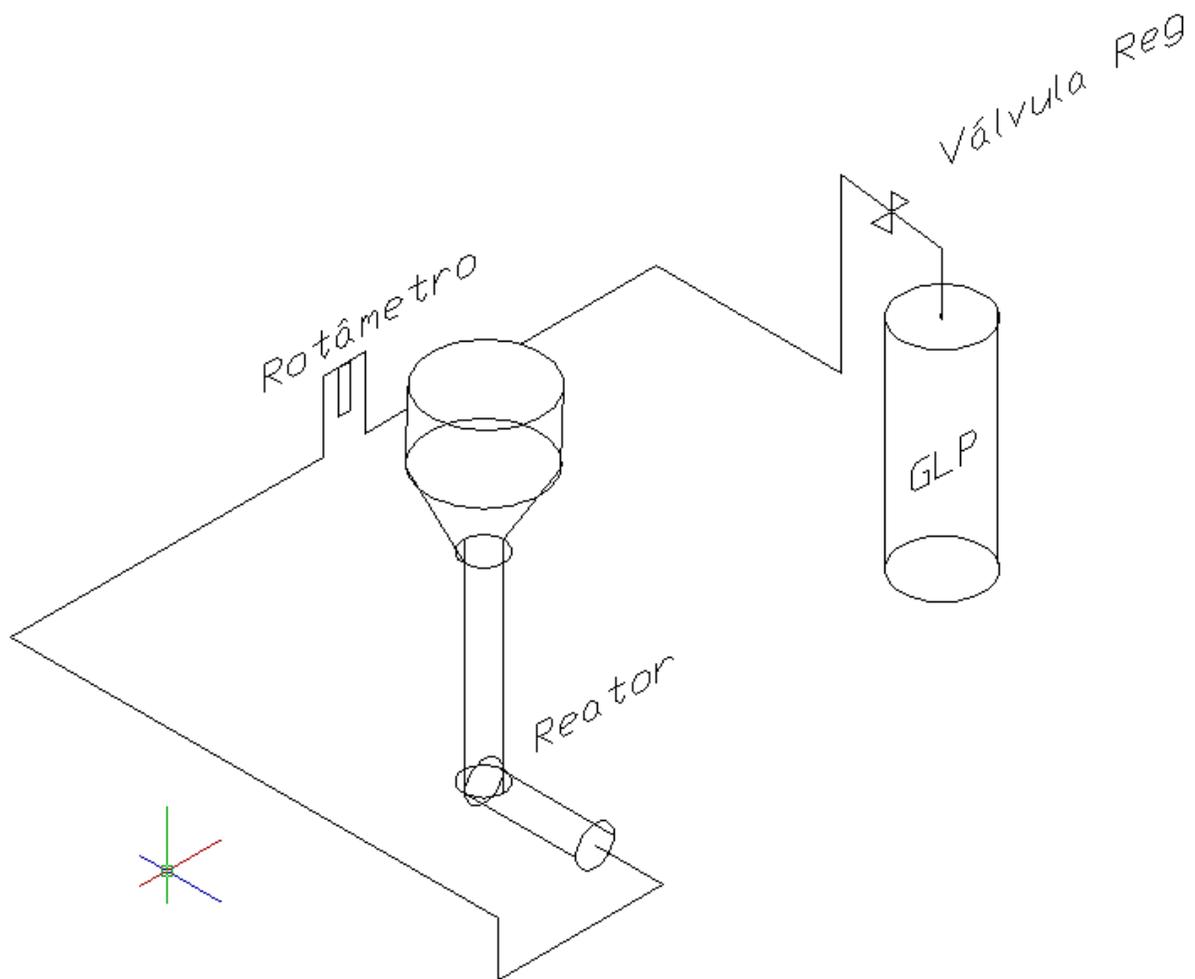


Figura 3.3 Croqui da rede de distribuição do GLP

A tubulação que conduz o GLP desde os cilindros de 90 kg é construída toda em tubos flexíveis de cobre de $\text{Ø}3/16''$ e as uniões são soldadas. A vazão de entrada do GLP no reator é controlada por um rotâmetro marca OMEL com escala de 0 a 10 NI/min com precisão de 0,2 NI/min.

O controle da vazão de ar no sistema é feito através de um manômetro de coluna d'água, conectado em um ponto a jusante e outro a montante de uma placa de orifício com a calibração conforme a figura 3.4.

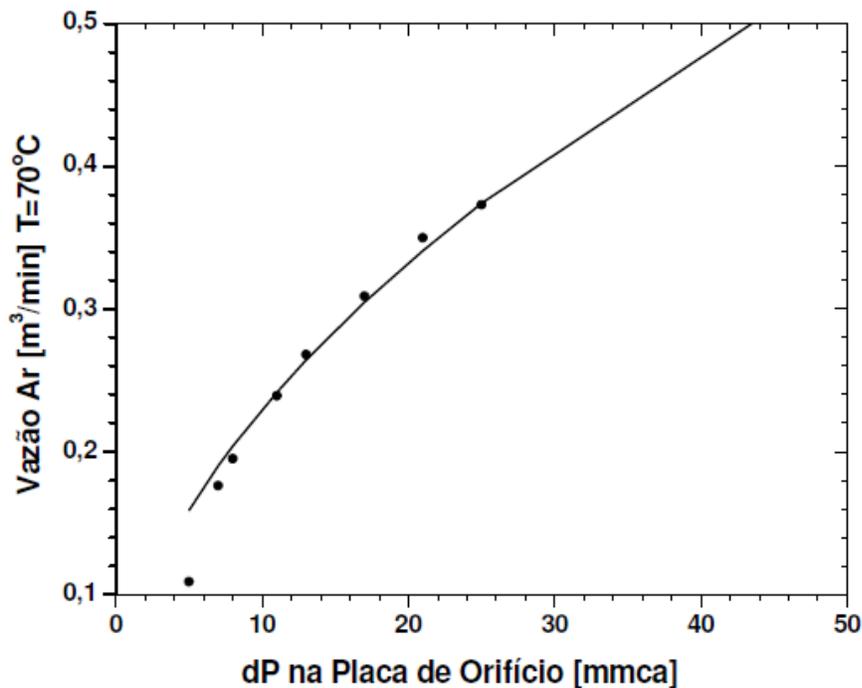


Figura 3.4 Curva de calibração da placa de orifício.

A curva da placa de orifício segue a equação 3.1 apresentada por Behaine (1999).

$$\dot{V}_{ar@70^{\circ}C} = 1,10602 \cdot 10^{-3} \sqrt{\Delta p} \quad (3.1)$$

Onde:

$$\dot{V}_{ar} = \text{Vazão de ar} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \right]$$

Δp = Queda de pressão na placa [mmH₂O]

Como essa calibração foi realizada para ar a 70°C, a equação teve que ser corrigida em função das diferenças de densidade e viscosidade dinâmica do ar, assim, utilizando o equacionamento apresentado por Miller (1996), e equação corrigida para a vazão de ar fica:

$$\dot{V}_{ar_{20^{\circ}C}} = 8,26731 \cdot 10^{-4} \sqrt{\Delta p} \quad (3.2)$$

O esquema de montagem do reator é apresentado na figura 3.5, retirado de Pellegrino (2006).

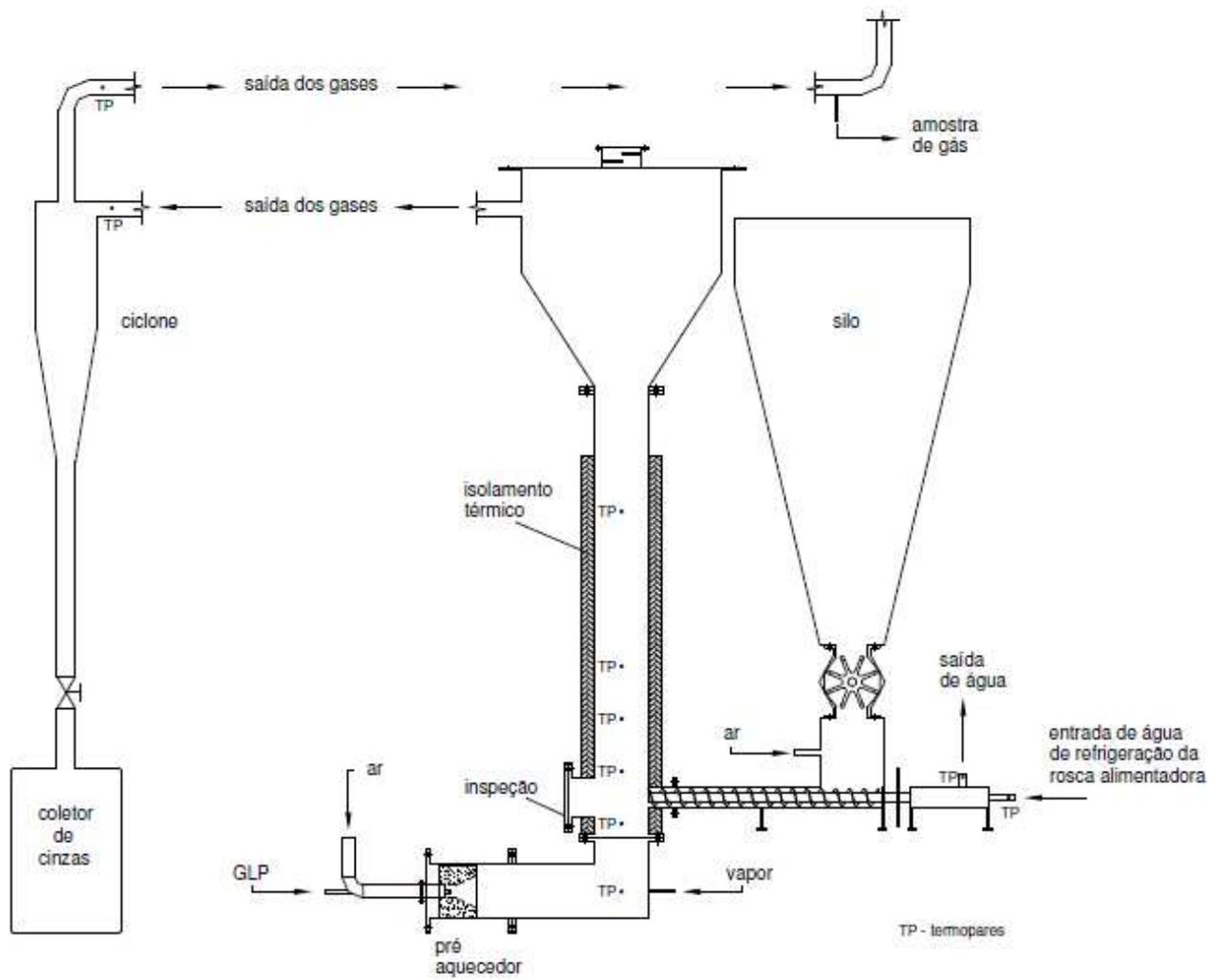


Figura 3.5 Representação esquemática do reator.

3.2 Análise de Metais Pesados

Para determinação de metais pesados nas cinzas, foi realizado ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) no Departamento de Materiais da FEM. As cinzas foram obtidas na mufla do Laboratório do DETF, simulando o tempo de residência da biomassa no reator. As biomassas foram acondicionadas a uma temperatura de 850 °C durante 30 min, desconsiderando a atmosfera redutora do reator de gaseificação.

O objetivo deste ensaio é saber previamente aos ensaios de gaseificação se as cinzas resultantes do ensaio de gaseificação podem ter destinação como insumo agrícola. O ensaio de MEV é capaz de determinar qualquer metal com massa molecular superior ao Oxigênio. O equipamento é da marca ZEISS, modelo EVO MA 15 e sua capacidade de ampliação é de até 1.000.000 de vezes. Uma amostra de lodo de esgoto *in natura* seco foi encaminhada para a mesma análise e após os ensaios de gaseificação as cinzas obtidas no reator foram encaminhadas também para ser realizada a comparação de valores após a biomassa passar pelo processo de gaseificação no reator.

3.3 Análise do gás produzido

As análises da quantidade de cada componente produzidos no gás durante os experimentos serão realizadas em cromatografia gasosa, que uma técnica amplamente difundida para separação e identificação de misturas voláteis. O equipamento utilizado é um cromatógrafo modelo CG-90 da marca Ciola & Gregori, dotado de detector de condutividade térmica e habilitado para utilizar argônio ou hidrogênio como gás de arraste. As colunas de trabalho utilizadas são uma peneira molecular de 5Å com 2m de comprimento, uma coluna Porapack N com 6 m de comprimento e malha interna de 60/80 mesh e uma coluna de referência Chromosorb

101 de 1 m de comprimento. Para a determinação do CO₂, é necessário fechar a válvula de passagem do gás isolando a peneira molecular do sistema, e depois do pico do CO₂ aparecer, retorna-se a válvula para a posição inicial a fim de determinar o CO. A quantificação de cada elemento será através do programa Peak Simple[®].

Antes de realizar os experimentos, as colunas são condicionadas e o equipamento calibrado com gás padrão, de composição conhecida conforme tabela 3.1.

Tabela 3.1 Gás padrão para calibração do cromatógrafo

	Componente	Quantidade
Gás padrão 1	H ₂	10,6 %
	CH ₄	10,0 %
	CO	10,0 %
	CO ₂	10,0 %
	N ₂	59,4 %
Gás padrão 2	O ₂	21,0 %
	N ₂	79,0 %

As condições de operação para o cromatógrafo estão apresentadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 Condições de operação do cromatógrafo

Gás de Arraste	Argônio
Vazão	26 L.min ⁻¹
Pressão	Acima de 8bar
Temperatura do Detector	100 °C
Corrente do Filamento	110 mA
Gases Analisados	H ₂ , O ₂ , N ₂ , CH ₄ , CO e CO ₂
Tempo do Ensaio	20 min

3.4 Procedimento Experimental

3.4.1 O Experimento

O experimento foi montado de maneira a permitir uma combinação de ensaios suficientes para atingir os objetivos deste trabalho durante os ensaios. As variáveis do resultado geral do processo, conforme Sánchez (1994) são o Poder Calorífico Inferior (PCI) e a composição do gás produzido (%CO, %CH₄, %CO₂, %N₂). As variáveis de influência são altura do leito, fator de ar e a temperatura do leito. Ainda segundo Sánchez (1994), a temperatura do leito é relacionada com o fator de ar, sendo assim, eliminada da matriz de variáveis.

A altura do leito de inerte foi mantida fixa em 500 mm, pois conforme Sánchez et al (2010), após uma série de experimentos variando a altura do leito entre 280mm e 570mm, obteve-se como maior variante o arraste de cinzas e para as demais variáveis do processo insignificantes alterações de resultados. Já Angulo (2002) em seus testes trabalhou com a altura do leito variando de 0,5 a 1,2 m e observa que conforme aumenta a altura do leito, há a redução na concentração dos gases, afetando diretamente o PCI do gás produto. Esse fenômeno é explicado uma vez que com o aumento da altura de leito, se faz necessária maior quantidade de ar de fluidização, o que afeta a cinética das reações com a maior entrada de oxigênio no sistema, favorecendo a formação de CO₂, como um dos objetivos deste trabalho é o melhor PCI possível, justifica-se a escolha pela altura do leito já mencionada.

A variação do fator de ar foi entre 0,30 e 0,50. Os melhores resultados obtidos em Pinto (2008) para a produção de monóxido de carbono ocorrem na faixa de fator de ar que varia entre 0,3 e 0,6. Já em Fernandes (2006) o melhor PCI encontrado na gaseificação de casca de arroz foi com fator de ar de 0,35. Em Sánchez (1994,) com um fator de ar de 0,25, obteve-se os melhores rendimentos na produção de CO, H₂ e CH₄ gaseificando serragem misturada.

Para alcançar esses objetivos foi montada a matriz de experimentos apresentada pela tabela 3.3, que determina quais os fatores de ar que serão utilizados durante o processo. Cada fator de ar foi realizado em tréplica para calcular o desvio padrão dos resultados.

Tabela 3.3 Matriz dos Ensaio

Ensaio	Biomassa	% em Massa	Fator de Ar
A	Serragem	100%	0,30
B	Serragem	100%	0,50

Após a realização destes testes, foi adicionado o lodo de esgoto no ensaio que obteve o melhor resultado para o PCI do gás produto com a serragem pura. A adição de lodo foi na proporção de 25% em massa do total alimentado no reator. O valor é abaixo do máximo de 40 % recomendado para a adição de lodo, baseado nos experimentos de Seggiani et al (2012) que apresentaram resultados insatisfatórios com valores superiores a 50 % na razão de mistura. A mistura das biomassas ocorreu antes da alimentação de maneira mecânica.

3.4.2 Secagem do lodo sanitário

O lodo de esgoto é acondicionado em um secador, figura 3.8, em que a secagem se dá através da insuflação de ar quente no lodo. O secador foi fabricado a partir de um tonel de descarte de 200 litros, posicionado na horizontal. Para a distribuição do ar foi instalada uma tubulação com arranjo em “U” perfurados na parte inferior formando um leque de 45 graus equidistantes 5cm um do outro.



Figura 3.6 Secador de lodo construído. A) Trocador de Calor; B) Ventilador; C) Tonel para secagem aberto.

A temperatura do ar insuflado foi de 60°C , controlada por um termostato marca Full Gage modelo TIC 17 RGT. Para atingir essa temperatura o ar passará por uma resistência elétrica de 880W, ligada em 220V instalada dentro de um trocador de calor, parte inferior da figura. Após desumidificado o lodo foi peneirado em uma peneira com abertura de $\frac{1}{4}''$. Já com seu tamanho homogêneo, seguiu para o ensaio de fluidização em leito frio, para comparar seu comportamento fluidodinâmico com a serragem. O ensaio ocorreu em um leito fluidizado frio, ou seja, à temperatura ambiente, o dispositivo possui corpo em acrílico com diâmetro interno de 110 mm. A placa distribuidora de ar apresenta furação com arranjo quadrático, com 137 furos distantes 8 mm entre centros. A figura 3.9 apresenta o dispositivo utilizado nos ensaios. O altura do leito durante os ensaios foi de 150 mm, sendo metade de material inerte, areia, e metade da biomassa. Os ensaios foram realizados em duas etapas, a primeira: leito de areia e serragem, a segunda: leito de areia e lodo de esgoto seco.



Figura 3.7 Dispositivo para testes de fluidização a frio

4 Resultados

4.1 Caracterização Físico-Química do Material

Os seguintes resultados foram obtidos partir das metodologias de análises descritas no item 2.9 do capítulo 2.

4.1.1 Resultados da Análise Imediata

A análise imediata foi realizada no laboratório de caracterização de biomassas do DETF da FEM, e foram feitas quatro amostragens para cada biomassa, seguindo o procedimento descrito no item 2.9 do capítulo 2.

Tabela 4.1 Análise Imediata da Serragem de Pinus e do Lodo de Esgoto.

	Pinus	Lodo de Esgoto
Umidade (B.U.%)	8,62% ± 0,58	92,71% ± 0,88
Análise Imediata (B.S. %)		
Carbono Fixo	9,93% ± 0,69	6,43% ± 0,61
Voláteis	89,69% ± 0,66	51,06% ± 6,88
Cinzas	0,38% ± 0,04	42,52% ± 6,26

4.1.2 Resultados da Análise Elementar

A análise elementar, como citado no item 2.9.4 do capítulo 2 e foi realizada no Instituto de Química da USP, e foram feitas três amostragens para cada biomassa.

Tabela 4.2 Análise Imediata (DAF) da Serragem de Pinus e do Lodo de Esgoto

	Pinus	Lodo de Esgoto
Carbono	47,66 ± 0,20	26,84 ± 0,20
Hidrogênio	6,35 ± 0,20	4,34 ± 0,20
Nitrogênio	0,14 ± 0,20	3,01 ± 0,20
Enxofre	ND	1,68 ± 0,20
Cloro	ND	0,58 ± 0,20
Oxigênio*	45,47	21,04

ND – Não Determinado. * - Oxigênio determinado por diferença considerando cinzas da análise imediata.

DAF = base seca sem cinzas

4.1.3 Resultados do Poder Calorífico

Os valores medidos e apresentados na tabela 4.3 seguiram o procedimento apresentado no item 2.9.5 do capítulo 2.

Tabela 4.3 Análise Imediata da Serragem de Pinus e do Lodo de Esgoto, determinado pelo método da bomba calorimétrica LCG - DETF

Poder Calorífico (B.S.) [MJ/kg]	Pinus	Lodo de Esgoto
PCS	18,56 ± 0,05	12,41 ± 0,53
PCI	17,19 ± 0,05	11,48 ± 0,53

4.1.4 Resultados da Análise de Metais

Conforme descrito no capítulo 3.2, os resultados dos metais encontrados nas cinzas analisadas estão na tabela 4.4.

Tabela 4.4 Análise de Metais nas Cinzas do Lodo de Esgoto Puro

Componente	O	Na	Mg	Al	Si	P
mg/kg	535,00	8,50	14,53	102,63	143,00	38,83
Desvio Padrão	1,95	0,33	0,78	1,15	1,11	0,41
Componente	S	K	Ca	Ti	Fe	Zn
mg/kg	8,93	8,33	55,67	21,87	58,67	4,03
Desvio Padrão	0,33	0,05	1,36	0,29	0,82	0,14

Comparando-se esses resultados com os limites determinados na norma da CETESB, tabela 2.2, pode-se afirmar que as cinzas, desde que similares às geradas na mufla podem ser destinadas à adubação agrícola, pois não apresentam metais, como o Arsênio (As), chumbo (Pb), Cádmio (Cd), Mercúrio (Hg), Alumínio (Al) e prata (Ag). As cinzas também não apresentaram metais que, dependendo da concentração, podem ser contaminantes, cita-se o Cobre (Cu), Níquel (Ni) e o Manganês (Mn). Uma análise do lodo *in natura* e seco foi realizada

4.1.5 Resultados da Granulometria

Os resultados de granulometria forneceram o dimensional das partículas, os materiais ensaiados, serragem, areia e lodo de esgoto foram então classificados em regimes de fluidização seguindo o Diagrama de Geldart, figura 2.12.

4.1.5.1 Granulometria da Areia Inerte

A areia inerte utilizada é do tipo quartzosa e recebe a especificação comercial AG 40/50 do tipo JL 40, procedente do município de Analândia – SP e comercializada pela empresa SAND JL COMÉRCIO DE MINÉRIOS LTDA, localizada no município de Descalvado – SP. A distribuição granulométrica está apresentada na figura 4.1.

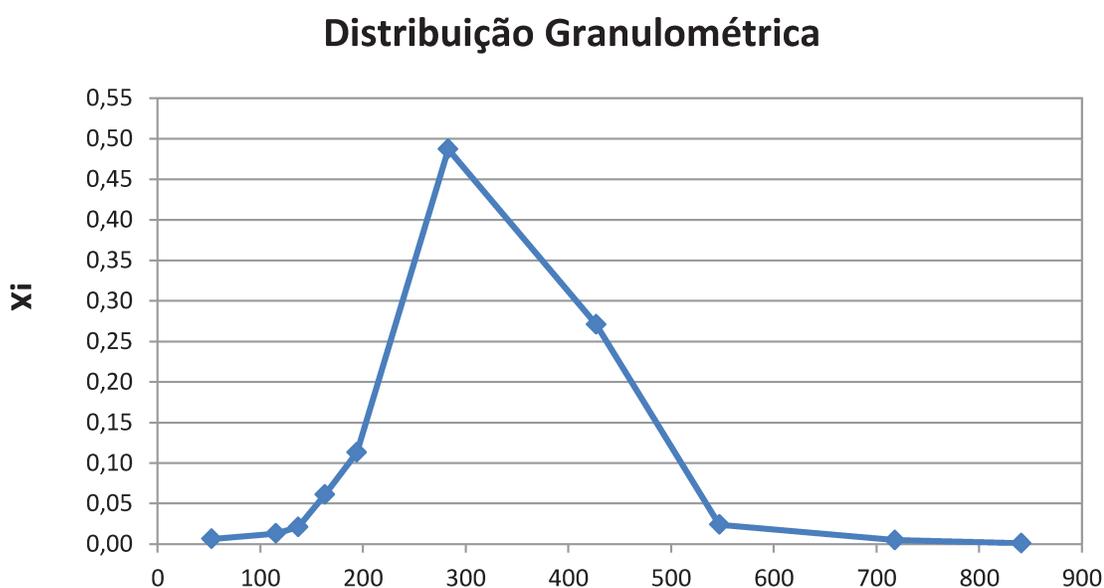


Figura 4.1 Distribuição granulométrica da areia inerte.

Os resultados do ensaio de granulometria para a areia utilizada como material inerte do leito é apresentado na tabela 4.5.

Tabela 4.5 Análise Granulométrica da Areia Inerte

Peneira ABNT	Abertura da Malha (mm)	D _{p_i} (mm)	Peso (g)	Fração x _i	X _i (%)	X _i /D _{p_i}	D _s (mm)
20	0,841	0,8410	0,1795	0,001	1,000	0,0013	0,2757
30	0,595	0,7180	0,8897	0,005	0,995	0,0073	
35	0,500	0,5475	4,1590	0,024	0,970	0,0446	
45	0,354	0,4270	46,0702	0,271	0,700	0,6339	
70	0,212	0,2830	82,8262	0,487	0,213	1,7195	
80	0,177	0,1945	19,1827	0,113	0,100	0,5794	
100	0,149	0,1630	10,3570	0,061	0,040	0,3733	
120	0,125	0,1370	3,6449	0,021	0,018	0,1563	
140	0,105	0,1150	2,1841	0,013	0,005	0,1116	
Fundo			1,0792	0,006			
		Total	170,2085				

Conforme o diagrama de Geldart, figura 2.12, a classificação da areia é de partículas do tipo B.

4.1.5.2 Granulometria da Serragem

Na figura 4.2 é visualizada a biomassa já moída para o uso no reator.



Figura 4.2 Serragem de *pinus* moída pronta para uso no reator. Fonte: o autor

A distribuição granulométrica foi gerada a partir das médias entre as três análises demonstradas na tabela 4.6 e demonstrada na figura 4.3.

Tabela 4.6 Análise Granulométrica do Pinus

Peneira ABNT	Abertura da Malha (mm)	D _{p_i} (mm)	Peso (g)	Fração x _i	X _i (%)	X _i /D _{p_i}	D _s (mm)
12	1,680	1,680	6,0097	0,0623	1,0000	0,0371	0,683
14	1,410	1,545	3,2752	0,0340	0,9660	0,0220	
16	1,190	1,300	6,6724	0,0692	0,8968	0,0532	
18	1,000	1,095	15,9650	0,1656	0,7313	0,1512	
20	0,841	0,921	13,0442	0,1353	0,5960	0,1469	
30	0,595	0,718	19,1428	0,1985	0,3975	0,2765	
40	0,420	0,508	20,9993	0,2178	0,1798	0,4291	
70	0,212	0,316	8,7391	0,0906	0,0892	0,2868	
80	0,177	0,195	1,1495	0,0119	0,0772	0,0613	
Fundo			1,4383	0,0149			
Total			96,436	1,000			

Distribuição Granulométrica

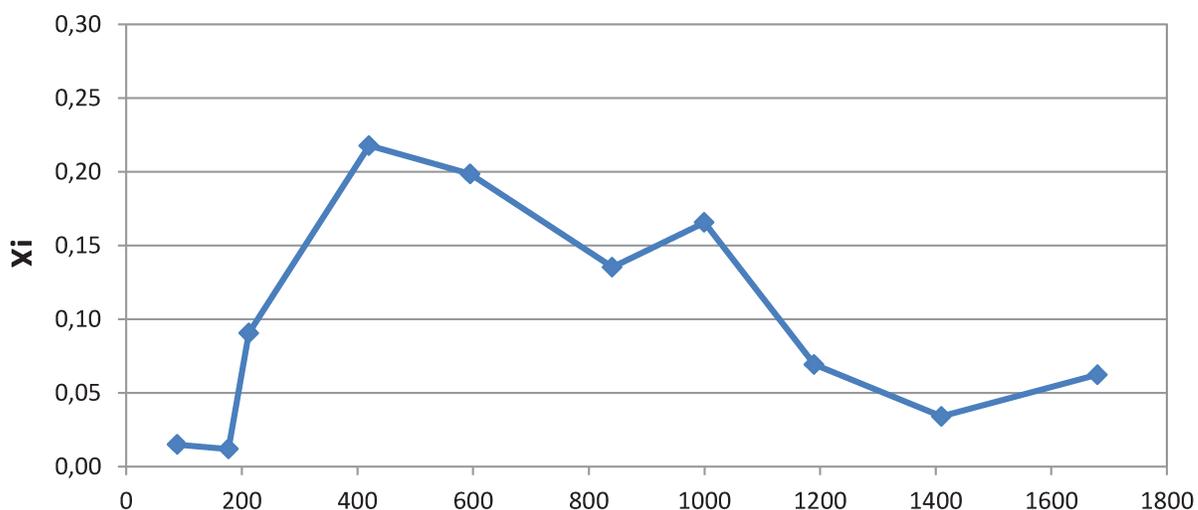


Figura 4.3 Distribuição Granulométrica da Serragem de *pinus*.

Com o valor calculado para o diâmetro de Sauter ($D_s=683\mu\text{m}$) e conforme o diagrama de Geldart, figura 2.12, a classificação da serragem é de partículas do tipo B.

4.1.6 Fluidização a Frio das biomassas

A figura 4.4 apresenta o lodo de esgoto *in natura*, conforme foi determinado na análise imediata, a partir desta imagem é visível sua alta umidade. As velocidades de mínima fluidização obtidas nos ensaios de fluidização a frio estão num mesmo patamar, o que facilita o processo de cogaseificação quando misturadas as biomassas no interior do reator.



Figura 4.4 Lodo de esgoto. Fonte: o autor

O comportamento do ensaio de fluidização a frio da serragem é visualizado na figura 4.5, onde são destacados dois pontos na figura, o primeiro é o ponto da transição de leito fixo para leito fluidizado, representado por setas vermelhas opostas, a uma velocidade de fluidização da ordem de 0,10m/s. Já a velocidade de mínima fluidização é encontrada em aproximadamente

0,13m/s. Na figura 4.6 é apresentado o comportamento do ensaio de fluidização a frio do lodo de esgoto, também destacando-se as mesmas informações.

A transição de leito fixo para leito fluidizado se dá com velocidade de 0,10m/s, mesmo valor que para a serragem, uma pequena diferença é encontrada para a velocidade de mínima fluidização, onde o valor encontrado ficou mais próximo a 0,14m/s. Os ensaios foram realizados com elevação de pressão (aumento da velocidade) e redução da pressão (redução da velocidade), por esse motivo em cada valor são apresentados 2 pontos medidos para cada velocidade do gás (histerese). A semelhança de valores é dada pelo motivo de que é o material inerte quem determina o comportamento da fluidização do leito.

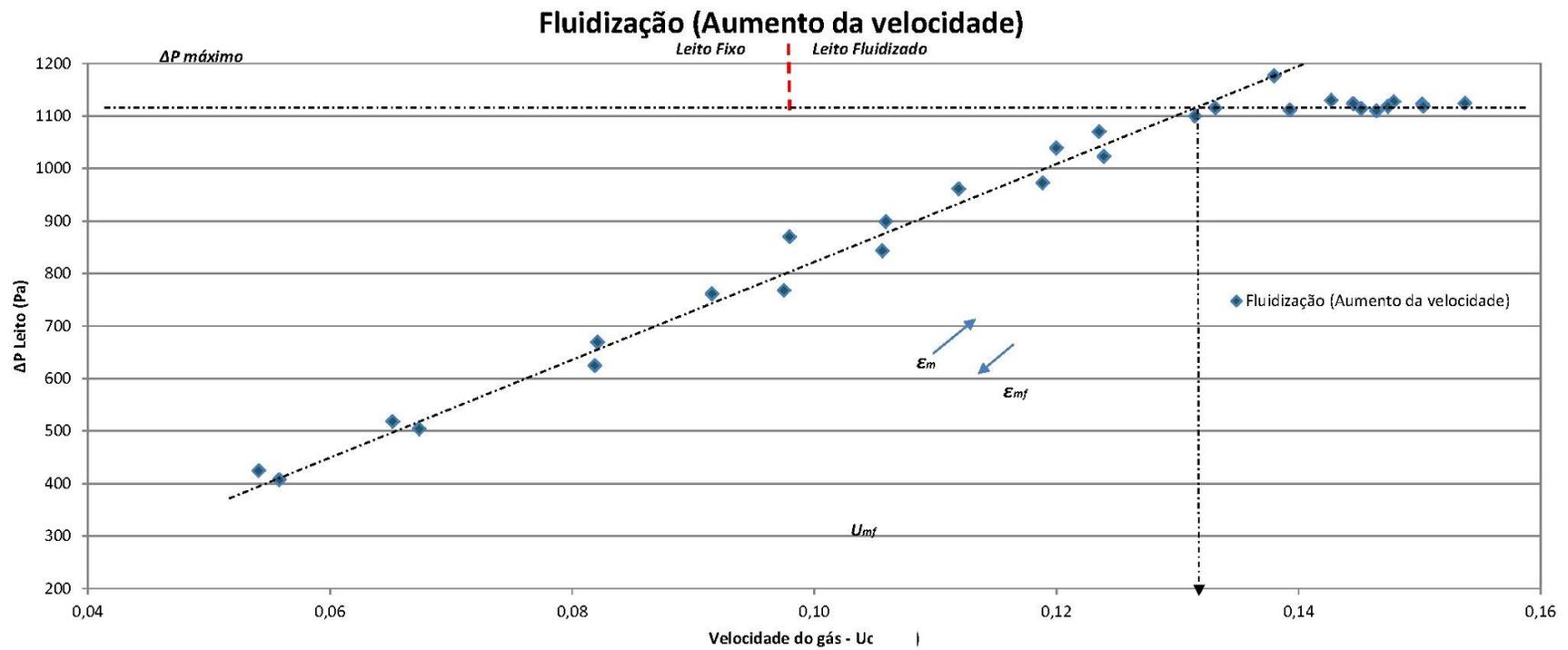


Figura 4.5 Fluidização a frio da serragem

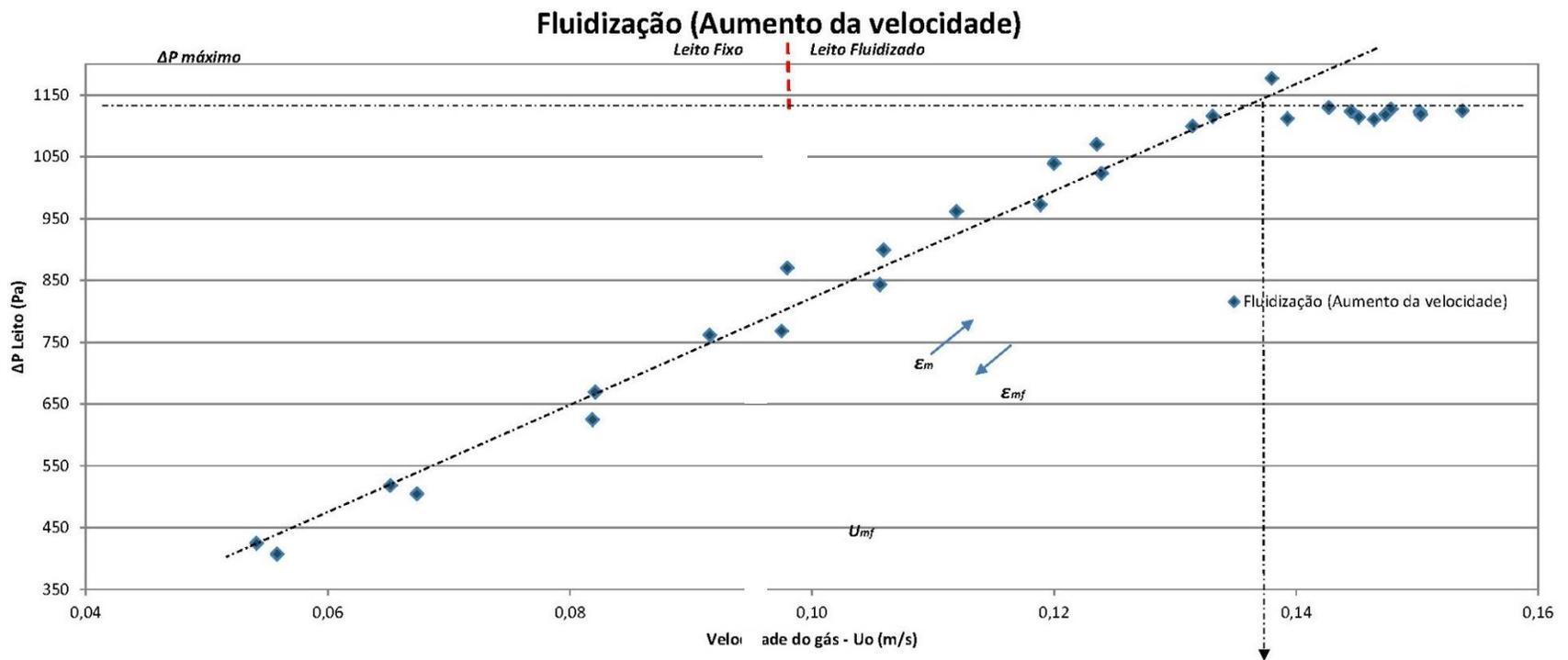


Figura 4.6 Fluidização a frio do lodo

4.2 Resultados da Gaseificação

Após a reforma do equipamento, conforme descrito no capítulo 3.1 foram realizados alguns ensaios para treinamento da operação do sistema, onde foram observados quais problemas eram eminentes ao processo e quais ações deveriam ser tomadas de imediato para manter a estabilidade do processo de gaseificação. Nesses ensaios foi utilizada serragem pura.

O problema que mais ocorreu durante os testes foi a intermitência na alimentação de biomassa, que gerou instabilidade na temperatura do reator. Neste ensaio pode-se destacar os seguintes eventos, conforme o horário em que ocorreram: 13:13h foi dada a ignição com GLP para aquecimento do leito, às 14:50h é acionada a alimentação da biomassa em regime de combustão para elevação da temperatura do leito até a temperatura de gaseificação, o objetivo foi atingir 750°C, durante a combustão da biomassa foi feita uma reposição de biomassa no silo, isso causou uma queda brusca de temperatura no leito, pois quando o silo é aberto o sistema é despressurizado e tem fuga de calor pela tampa do silo. Às 15:53 h foi necessária nova ignição do GLP para reaquecimento do leito; 16:30h alimentação para combustão e o corte do GLP foi às 17:00h; o reator entrou em regime de gaseificação às 17:10h com a temperatura oscilando entre 775°C e 800°C. A coleta do gás teve início às 17:10h até às 17:30h; em seguida as temperaturas começam a baixar novamente devido ao término de biomassa no interior do silo. Essa estabilização ocorre após o término da biomassa que estava no silo e com a nova alimentação evitou-se a compactação da biomassa no silo por tempo de armazenamento. Assim, ficou estabelecido que o abastecimento do silo deve sempre ser realizado momentos antes da ignição do reator.

4.2.1 Influência do fator de ar

Para verificar a influência do fator de ar, conforme descrito no capítulo 3.4.1 os ensaios foram realizados com serragem pura, sempre buscando que a temperatura do leito se estabilizasse em torno de $750 \pm 25^\circ\text{C}$. Conforme a figura 4.7 os melhores resultados obtidos para o PCI do gás, em MJ/Nm^3 foram para fatores de ar na faixa de 0,30. O melhor resultado de PCI foi com um fator de ar real de 0,32 e a temperatura média do leito neste ensaio foi de $737,73 \pm 14^\circ\text{C}$.

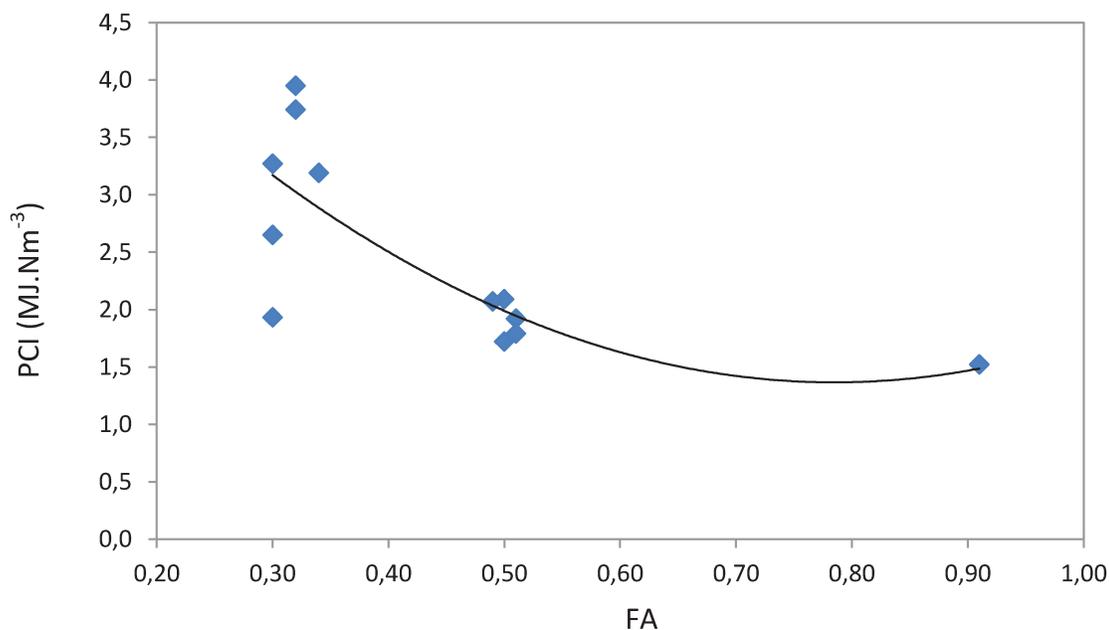


Figura 4.7 Valores do PCI do gás em função do FA

Já a composição volumétrica média dos gases obtidos nos ensaios é apresentada na figura 4.6 para fatores de ar real médio de 0,33 e 0,50.

Com um fator de ar acima de 0,3, a produção de CO é reduzida, pois com maior quantidade de ar, o oxigênio reage com o CO, oxidando o monóxido de carbono, conforme visto na equação 4.1 (Pellegrino, 2006)



Ainda assim, analisando-se este gráfico, não é visualizado um aumento significativo de CO_2 entre o fator de ar 0,3 e 0,5. Isto ocorreu devido erros de leitura do cromatógrafo, pois durante os testes com fator de ar 0,5 o mesmo apresentou avaria, e foi conduzido para manutenção, paralisando toda a sequência de experimentos por aproximadamente 90 dias.

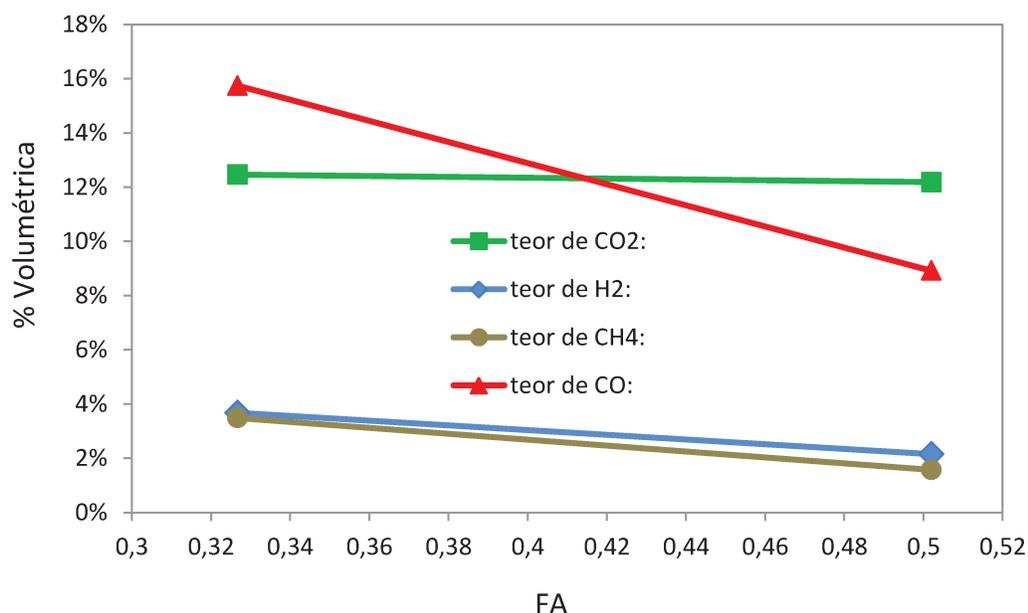


Figura 4.8 Composição volumétrica do gás obtido em função do fator de ar real médio

As tabelas do Apêndice A apresentam os resultados para os ensaios de gaseificação da serragem pura, baseados no roteiro de cálculo apresentado item 2.10 do capítulo 2.

Nos ensaios 8 e 9 a análise cromatográfica foi realizada em um cromatógrafo Micro-Cromatógrafo a gás, MicroGC 3000, marca Agilent, configurado para analisar gases inorgânicos e orgânicos leves. O equipamento tem dois módulos com colunas capilares: Coluna 1 de Peneira Molecular 5A e pré-coluna Poraplot U; Coluna 2 de Poraplot U; a fase móvel em ambas as colunas é Argônio 5,0, com filtro adicional para retirada de umidade. Cada módulo possui um detector por condutividade térmica com limite de detecção estimado em 0,01 %mol/mol para as análises realizadas. As incertezas analíticas calculadas com base nas incertezas do padrão e nos desvios das áreas analisadas foram estimadas em:

- H₂, O₂, N₂, CH₄, CO: 1,5% ou $\pm 0,05\%$ mol/mol, o que for maior.
- CO₂, etileno e etano: 1% ou $\pm 0,03\%$ mol/mol, o que for maior.

Ao utilizar este cromatógrafo, o mesmo detectou a presença de Etileno, Etano e Acetileno no gás analisado influenciando o resultado do trabalho, pois depois de calculado o PCI do gás com a equação de Dulong para combustíveis gasosos (equação 2.31), houve aumento do PCI, obtendo valores de 4,58 MJ.Nm⁻³ para o ensaio 8 e de 4,79 MJ.Nm⁻³ para o ensaio 9. Estas diferenças foram desconsideradas na tabela do Anexo A mantendo o padrão das análises anteriores, sem considerar estes hidrocarbonetos em todos os ensaios.

4.2.2 Cogaseificação

Conforme descrito nos objetivos, a intenção do trabalho foi avaliar experimentalmente a mistura de uma biomassa de baixa umidade e outra de alta umidade, porém durante os testes isso não foi possível. A bomba de parafuso que utilizamos para alimentação do lodo não conseguiu operar com o lodo de esgoto disponível, sendo assim, o lodo foi seco com o dispositivo apresentado na figura 3.7, até chegar a uma umidade de 12% e depois misturado com a serragem antes de inserir dentro do silo. A mistura foi feita de maneira manual, buscando a melhor homogeneização possível entre os combustíveis, conforme visualizado na figura 4.9.

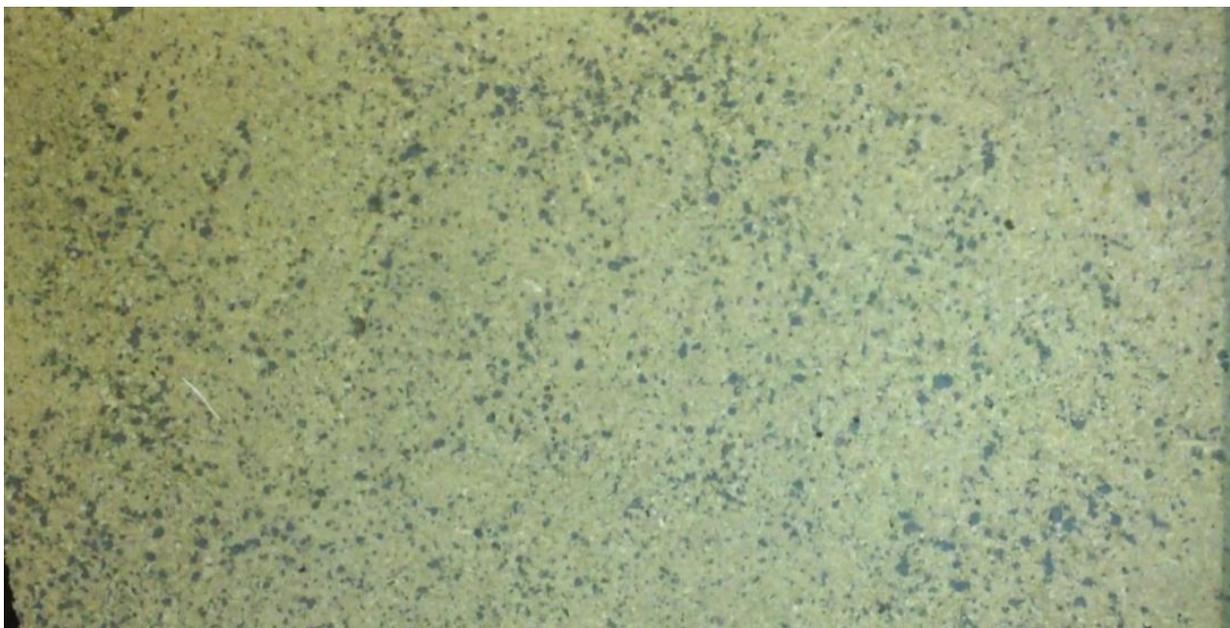


Figura 4.9 Serragem e lodo de esgoto misturados

A mistura de lodo de esgoto ocorreu na proporção de 25%, para um fator de ar de 0,3 e velocidade de fluidização de 0,75m/s. O resultado o PCI do gás encontrado médio foi de $2,96 \pm 0,44 \text{ MJ.Nm}^{-3}$. Em um dos ensaios o PCI do gás chegou a $1,93 \text{ MJ. Nm}^{-3}$ e foi desconsiderado da média, pois foi um ensaio em que a temperatura caiu para $732 \pm 8^\circ\text{C}$ ante $743 \pm 8^\circ\text{C}$ que obteve um gás com PCI de $3,27 \text{ MJ/Nm}^{-3}$. Esse erro também pode ter sido provocado pela segregação dos combustíveis no interior do silo, pois a cada golpe no silo, o material menos denso tende a ficar na superfície e a mistura fica mais heterogênea.

Na tabela 4.7 temos um comparativo entre os gases obtidos na gaseificação e na cogaseificação, é observado que os resultados da cogaseificação são inferiores aos da gaseificação, pois ao misturar o lodo na serragem, diminuem-se o poder calorífico do combustível de entrada do reator.

Tabela 4.7 Comparativo entre gaseificação e cogaseificação

		Gaseificação			Cogaseificação		
FA real:		0,32	±	0,01	0,30	±	0,00
Temp. Leito:	°C	752	±	27	743	±	0,00
PCI combustível:	MJ/kg _{comb}	17,54	±	0,00	15,89	±	0,00
Análise do Gás Produzido							
teor de H ₂ :	%	3,68	±	0,30	4,42	±	0,77
teor de O ₂ :	%	1,89	±	1,69	ND		
teor de N ₂ :	%	62,74	±	5,12	61,41	±	2,25
teor de CH ₄ :	%	3,49	±	0,40	2,58	±	0,47
teor de CO:	%	15,74	±	1,75	12,40	±	1,46
teor de CO ₂ :	%	12,46	±	1,01	19,21	±	0,47
PCI do gás:	MJ.Nm ⁻³	3,63	±	0,40	2,96	±	0,44
E_{ff} :	%	37,11	±	3,17	29,24	±	4,61

É observada uma redução na eficiência a frio do processo. Nos ensaios de gaseificação de serragem pura foi de 37,11% e para a cogaseificação foi de 29,24% ambas com o mesmo fator de ar. A diferença entre as eficiências é considerada um valor elevado. O poder calorífico do gás formado também obteve redução significativa, assim como os demais valores apresentados, ainda assim, deve-se valorizar a destinação energética para lodos de esgotos como maneira de mitigar impactos ambientais, seja pela redução de volume de despojos ou pela diluição de contaminantes, o lodo estudado neste trabalho não necessitou de diluição, pois os índices medidos estão dentro da norma CETESB. Na análise cromatográfica dos ensaios de cogaseificação o cromatógrafo não estava calibrado para a determinação do teor de oxigênio, o que supostamente pode ter aumentado a área do pico do hidrogênio, estes gases aparecem em sequência de picos na análise cromatográfica, assim sendo, ocorre um aumento na concentração de H₂, e conseqüentemente uma melhora no PCI do gás.

Na tabela 4.8 observa-se menores diferenças entre os valores para o fechamento do balanço de massa, energia perdida na entalpia do gás, para a potência do gaseificador (queda de 5,81kW térmicos) na faixa de 8 a 13%.

Tabela 4.8 Comparativo do balanço de massa e energia entre gaseificação e cogaseificação

		Gaseificação			Cogaseificação		
Balanço de Massa:	%	71	±	5	65	±	3
$Q_{\text{gás}}$:	MJ/kg _{comb}	0,96	±	0,03	0,85	±	0,02
Q_{total} :	kW _{térmicos}	47	±	8	41	±	7

Comparando os resultados com Pinto (2008) que realizou cogaseificação de serragem e lodo de esgoto sanitário, observa-se que o potencial energético do lodo seco deve ser valorizado, porém para um melhor comparativo é necessário que o material inerte do leito suporte temperaturas acima de 750°C, para favorecer as reações de formação de metano, hidrogênio e monóxido de carbono (Sánchez, 2010). Pinto apresenta uma melhora na formação de metano com temperatura em torno de 850°C, e em nosso reator essa temperatura não foi atingida. Ainda no mesmo trabalho o autor apresenta resultados de cogaseificação onde obteve um PCI para o gás na faixa entre 12,3 e 15,0 MJ.Nm⁻³ em base seca e livre de inertes.

4.3 Problemas encontrados

- a) Na etapa de calibração da vazão da bomba de lodo, a mesma não conseguiu operar com o lodo sanitário, entupiu ao ponto de travar o motor, impossibilitando a utilização do lodo *in natura*;
- b) Em um dos testes, a rosca de alimentação de biomassa travou, pois foi tentado elevar a temperatura do leito acima de 835°C. Esse travamento deve-se à fusão do inerte, que ficou aderido no eixo do alimentador. Esse fato comprova que é mais indicado, para a gaseificação em leito fluidizado, outro material inerte que possua maior ponto de fusão. A figura 4,10 mostra a areia aderida ao eixo do alimentador;



Figura 4.10 Areia fundida aderida ao eixo do alimentador

- c) Problemas de alimentação são críticos e recorrentes, pois desestabilizaram a temperatura do leito em todos os ensaios. Durante os ensaios foi necessário golpear o pescoço do silo seguidamente para manter o fluxo de biomassa de maneira que a flutuação da temperatura do leito fosse a menor possível;
- d) Durante os ensaios, quando se utilizou maiores fatores de ar, foi observada formação de alcatrão e acúmulo do mesmo na tubulação de gases, a tubulação de saída dos gases

entupiu por 2 vezes. Na limpeza foi encontrado muito alcatrão condensado aderido às paredes da tubulação. Este alcatrão não foi mensurado e está embutido nas perdas para o meio ambiente.

- e) Durante os testes foi constatada a necessidade de melhorias no sistema de alimentação, pois a geometria do silo não favorece o escoamento da serragem. Durante o processo, vapor d'água da combustão do GLP durante o aquecimento é conduzido pela rosca de alimentação para o interior do silo, e esta umidade faz com que a serragem, que é um material altamente higroscópico, ganhe maior aderência, a biomassa fica aglomerada, o que faz com que a alimentação oscile com intervalos de intermitência, assim a temperatura do leito perde estabilidade. Um agitador no silo é aconselhável para coibir esse empacotamento de material particulado. Também é aconselhável refazer o silo, construindo um silo de menor altura e maior comprimento, com uma rosca extratora de passos variáveis, para favorecer o escoamento de toda a serragem armazenada e também para ter um abastecimento mais rápido.
- f) O sistema de refrigeração da rosca sem fim apresentou vazamento durante todos os ensaios, convém revisar sua concepção e aumentar a quantidade de gaxetas de vedação.
- g) Foi projetado um sistema de alimentação do lodo úmido diretamente no reator. Foi desenvolvida uma nova tampa de inspeção para o silo com o ponto de alimentação do lodo e uma tomada de pressão logo acima do mesmo, conforme figura 4.11.

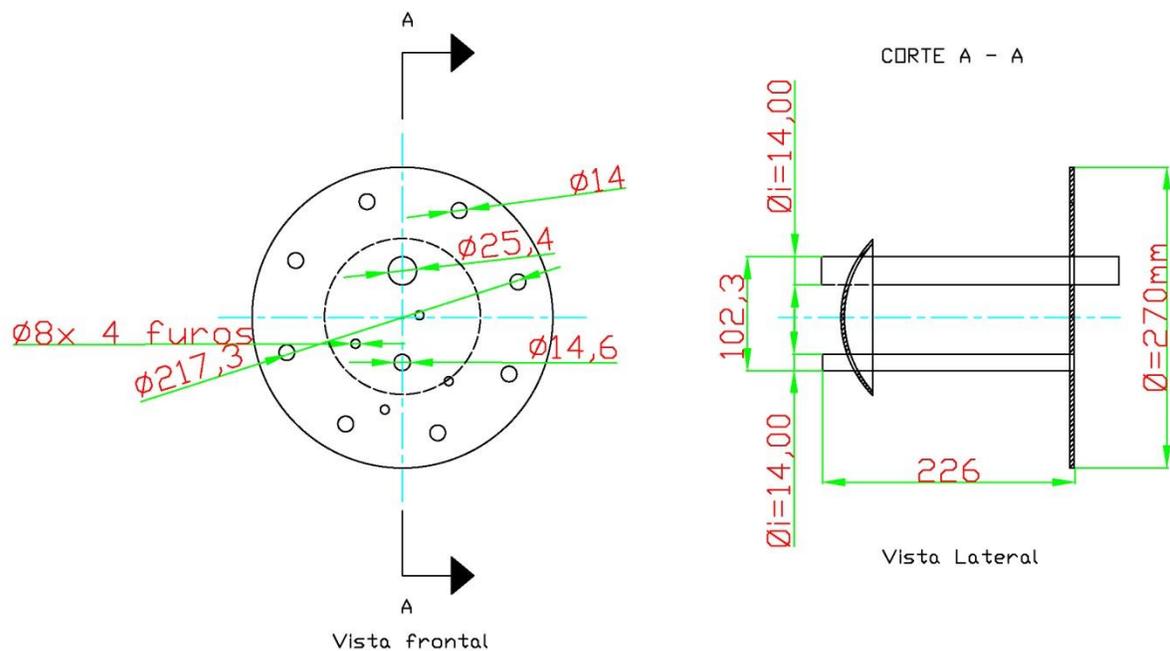


Figura 4.11 Projeto da nova tampa de inspeção do reator com os dutos de alimentação e tomada de pressão.

Para a alimentação do lodo de esgoto úmido no reator, fora instalado uma bomba tipo parafuso e a rotação do motor da bomba foi controlada através de inversor de frequência marca WEG modelo CFW-08. A figura 4.12 apresenta um esquema de montagem, adaptado de Pellegrino (2006), com a instalação da bomba de lodo. Após tentativas de calibração a bomba mostrou-se ineficiente, pois devido a alta viscosidade do lodo, ouve um calço na bomba com travamento do rotor, impossibilitando a utilização do sistema. Por esse motivo, abandonou-se toda a concepção de alimentação de lodo úmido para prosseguir os ensaios com o lodo seco e misturado com a serragem antes de alimentar o silo.

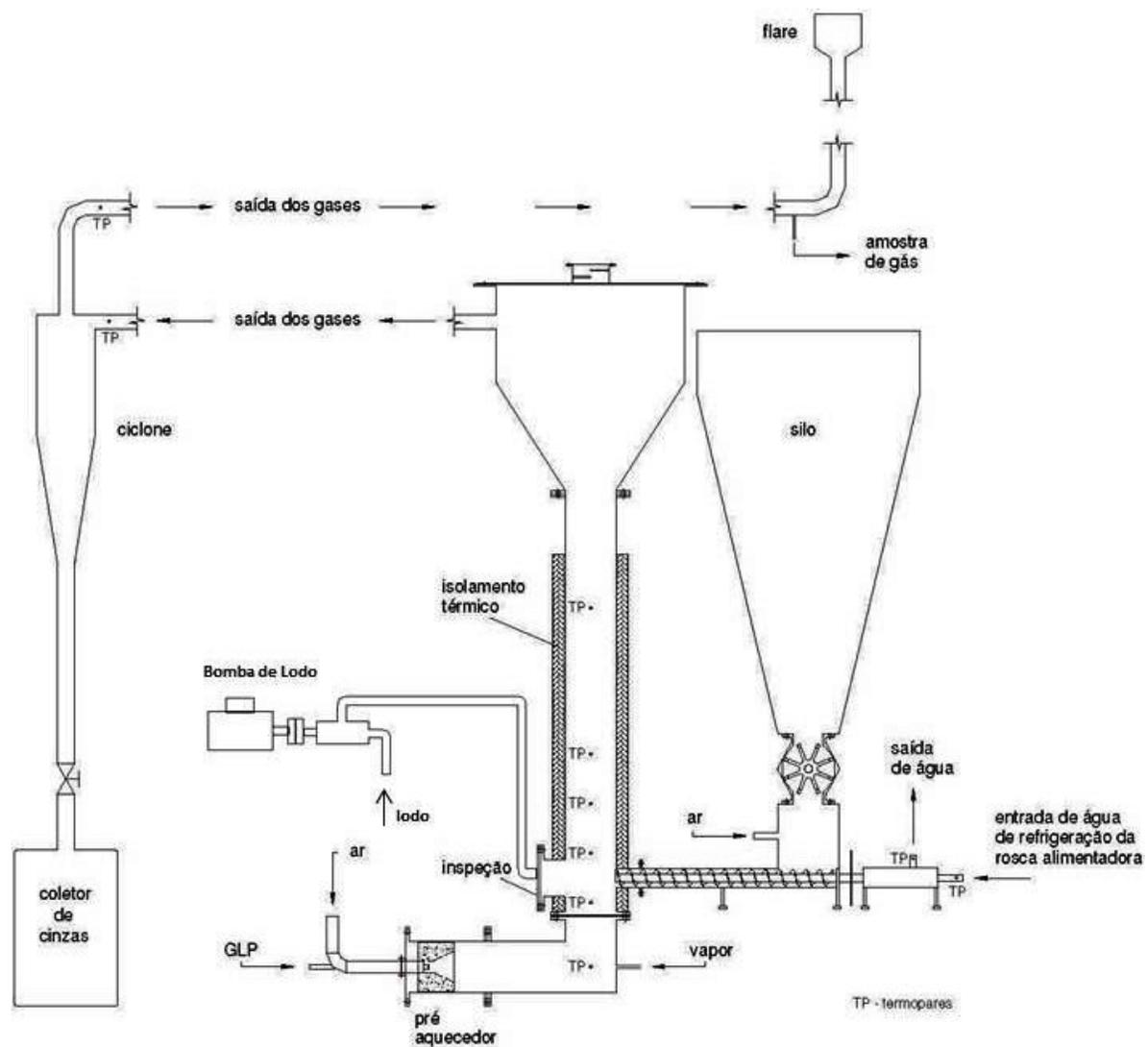


Figura 4.12 Esquema demonstrativo do reator com a instalação da bomba de lodo. Adaptado de: *Pellegrino, 2006*

5 Conclusões

A partir dos resultados apresentados conclui-se:

- a) Em Sánchez, 1994, ao realizar gaseificação de serragem mista, seus resultados obtidos para o fechamento do balanço de massa variaram entre 76,0% e 85,7%. Neste trabalho, quando gaseificada apenas a serragem de pinos, os resultados obtidos variam entre 65% e 82%. O valor ideal de fechamento de balanço de massa é de 100%, porém há dificuldades em coletar informações sobre todas as parciais que compõem o balanço de massa a partir do aparato utilizado.
- b) Os melhores resultados obtidos nos ensaios de gaseificação de serragem de pinus pura foram quando o gaseificador operou com fator de ar de 0,32. Foi obtida uma eficiência a frio de 39,79%, eficiência a quente de 45,34%. O valor de PCI para o gás foi de 3,95 MJ.Nm⁻³. Mesmo sendo este valor próximo aos encontrados na literatura, não foi o suficiente para afirmar que seja ponto ótimo de operação deste reator com essa biomassa, necessita-se de mais testes com fatores de ar menores para encontrar o ponto ótimo de operação com essa biomassa e com essa granulometria. Segundo Sánchez (1994), o aumento do tamanho da partícula da biomassa interfere no resultado da produção do gás, pois diminui a elutriação de partículas e favorece a formação de CO, H₂ e CH₄;
- c) Para a cogaseificação foi observado que com a diminuição do poder calorífico do combustível no reator (mistura de serragem e lodo seco com valor médio do PCI em 15,89 Mj. kg⁻¹) e maior teor de cinzas (aproximadamente 11%) não foi possível atingir temperaturas de leito superiores a 750°C.
- d) Devido a quantidade de ensaios realizados, não foi possível comprovar a existência do efeito sinérgico na cogaseificação destas biomassas, além de ter sido necessário utilizar o lodo seco para o processo, e não úmido como era a intenção inicial do trabalho.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para comprovação do efeito sinérgico entre biomassas de alta umidade e outra de baixa umidade, é preciso instalar no reator uma bomba para material úmido e pastoso que consiga operar com constância, sem entupimentos. Um número maior de ensaios de cogaseificação entre diferentes biomassas é indicado, com variação de fator de ar e taxas de misturas.

Conforme a destinação que o gás vai obter, caso seja direcionado para motor de combustão interna ou turbina a gás, a presença de alcatrão é proibitiva, assim é necessário um sistema de limpeza do gás. Porém se a destinação do gás for para queima em fornalha, a presença do alcatrão é desejada, pois aumenta o poder calorífico do combustível;

Como o reator utilizado é em escala piloto, é interessante colocar um condensador de alcatrão após o ciclone de separação de particulados, para evitar novos entupimentos e como maneira de mensurar o alcatrão produzido no processo e analisar quanto em energia é perdida.

Para melhor precisão dos cálculos de balanço de massa e de vazão de combustível, é indicado colocar células de carga no silo. Também determinar as perdas de energia com o resfriamento da rosca alimentadora.

É aconselhável que a análise do gás sempre ocorra no mesmo cromatógrafo, e que este tenha a capacidade de detectar hidrocarbonetos leves, pois como apresentado nos resultados dos ensaios 8 e 9, anexo A, tabela A.1., houveram melhores resultados encontrados para PCI, eficiências a frio e a quente.

Também é necessário verificar o efeito da mistura lodo/ biomassa na estabilização de parâmetros ambientais que por norma encontram-se fora do permitido, ou seja, aplicar a metodologia diferentes tipos de lodo e que estes necessitem de diluição de contaminantes antes da destinação final.

6 Publicações resultantes deste trabalho

6.1 Anais e Eventos Científicos

VISSOTTO, J. P.; Mazzonetto, A. W.; Neves, R. C.; Sanchez, E. M. S.; Sánchez, C. G.;" *Caracterização de Pinus, Eucaliptus, Casca de Eucaliptus e Resíduos Florestais e de Destoca para fins energéticos*". **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 31 de julho a 03 de agosto, 2012, São Luis – MA**

Mazzonetto, A. W.; VISSOTTO, J. P.; Neves, R. C.; Sanchez, E. M. S.; Sánchez, C. G.;" *Caracterização de resíduos de poda, capina e serragem urbana para geração de energia*". **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 31 de julho a 03 de agosto, 2012, São Luis - MA**

Neves, R. C.; VISSOTTO, J. P.; Mazzonetto, A. W.; Sánchez, C. G.;" *Preliminary study of product gas reformation using plasma torch*". **8th International Conference on Plasma Assisted Technologies (ICPAT), February, 26th, 2013, Rio de Janeiro, Brazil**

6.2 Trabalhos Apresentados em Eventos: Paineis

Apresentação em painel: **3rd School of Combustion (Salvador - BA), realizado de 04 à 08/07/2011,** "*Cogasification of Eucalyptus Waste with Industrial Sewage Sludge in Fluidized Bed*". VISSOTTO, J. P.; MAZZONETTO, A. W.; CRUZ, R. N.; SANCHEZ, E. M. S.; SÁNCHEZ, C. G.

Apresentação em painel: **3rd School of Combustion (Salvador - BA), realizado de 04 à 08/07/2011;** "Design and Development Of The Reform Of Syngas Through Plasma Torch" ; CRUZ, R. N.; MAZZONETTO, A. W.; VISSOTTO, J. P.; SANCHEZ, E. M. S.; SÁNCHEZ, C. G.

Apresentação em painel: **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (São Luis - MA), realizado de 31/07 à 03/08/2012,** "*Caracterização de resíduos de poda, capina e serragem urbana para geração de energia*". MAZZONETTO, A. W.; VISSOTTO, J. P.; CRUZ, R. N.; SANCHEZ, E. M. S.; SÁNCHEZ, C. G.

Apresentação em painel: **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (São Luis - MA), realizado de 31/07 à 03/08/2012,** "*Caracterização de Pinus, Eucaliptus, Casca de Eucaliptus e Resíduos Florestais e de Destoca para fins energéticos*". VISSOTTO, J. P.; MAZZONETTO, A. W.; CRUZ, R. N.; SANCHEZ, E. M. S.; SÁNCHEZ, C. G.

7 Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 1102-84 (Reapproved): **Standard Test Method for Ash in Wood**. West Conshohocken, 2007. 2 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 872-82 (Reapproved): **Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels**. West Conshohocken, 2006. 3 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM E871-82: **Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels**, 2006, 2 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM D-240-92: **Heat of Combustion of Hydrocarbons Fuels by Bombs Calorimeter**. Philadelphia, 1995, 8p.

ÂNGULO, M. B. B., **Experimentos de Gaseificação de Casca de Arroz em Leito Fluidizado**, 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Unicamp, Campinas-SP, 2002.

ARACRUZ Papel e Celulose S/A, disponível em:

<<http://www.aracruz.com.br/eucalipto/pt/index.html>>, acesso em maio 2011.

AROLA, R. A. 1976 - Wood Fuels - How do they stack up? **Forest Products Research Society**, November 15-17, Atlanta, Georgia, 12 p.

BEN - **Balanco Energético Nacional** - Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de desenvolvimento. Ano base: 2003. Brasília, 2004.

BEN - **Balanco Energético Nacional** - Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de desenvolvimento. Ano base: 2011. Brasília, 2012.

BAZU, P. **Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory**. Burlington, MA, EUA; Elsevier; 365p, 2010

BOERRIGTER, H.; RAUCH, R. *Syngas production and utilisation*. In: KNOEF, H. A. M. (Ed.). **Handbook Biomass Gasification**. Netherlands: Biomass Technology Group (BTG), 2005. cap. 10.

BRITO, J. O., 2007, “**O uso energético da madeira**” Estudos Avançados 21 (59) <http://www.inee.org.br/down_loads/eventos/JoseBrito%20ESALQ.pdf>. Acesso em 15 de fevereiro de 2012.

COMPANIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB, **NORMA TÉCNICA P4.230: Aplicação de lodos sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - critérios para projeto e operação: manual técnico**. São Paulo, agosto 1999, 34p.

CHARLSON, S. ; TAYLOR, B. **Bubbling Fluidized Bed Installation Capitalizes on Sludge**. In: TAPPI Engineering Conference. Anaheim, California: September 12-16, 1999.

CIFERNO, J. P., MARANO, J. J., **Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production**, Prepared for U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory, June, 2002.

CRONIN, J. F. **From Liquor to Sludge-Conversion of a Recovery Boiler to a Bubbling Fluid Bed**. In: TAPPI Engineering Conference. Anaheim, California: September 12-16, 1999.

DAE AMERICANA, Departamento de água e esgoto da cidade de Americana – SP, acessado em 10/09/2012.

http://www.daeamericana.com.br/2012/index.php?option=com_content&view=article&id=270:es-tacao-de-tratamento-de-esgoto-carioba&catid=55:declaracao-universal-dos-direitos-da-agua&Itemid=66

FERNANDES, M. C.; **Investigação Experimental de Gaseificação de Biomassa em Leito Fluidizado**; 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), UNICAMP. Campinas – SP. Ano 2004.

FIGUEIREDO, F. A. B.; **Pirólise e Gaseificação da casca de castanha de caju: Avaliação da Produção de Gás, Líquidos e Sólidos**. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – UNICAMP. Ano 2009.

GELDART, D. **Gas fluidization technology**. New York: John Wiley & Sons, 1986. 468 p.
GROß, B., EDER, C., GRZIWA, P., HORST, J., KIMMERLE, K., **Energy recovery from sewage sludge by means of fluidised bed gasification**, Waste Management, 28, p 1819-1826, 2008.

GÓMEZ, E. O.; **Projeto, construção e avaliação preliminar de um reator de leito fluidizado para gaseificador de bagaço de cana-de-açúcar**. 200 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – UNICAMP. Ano 1996.

HAMILTON, C. J.; **Gasification as an Innovative Method os Sewage-Sludge Disposal**, CIWEM's Innovation 2000 Conference, Cambridge University, UK.

HUEBLIN, H. J., **Modelo para a aplicação da metodologia ZERI sistema de aproveitamento integral da biomassa de árvores de reflorestamento**. 2001,.Dissertação (Mestrado em Tecnologia). - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2001.

INSTITUTO CARBONO BRASIL, acessado em 08/11/2012
<http://www.institutocarbonobrasil.org.br/mudancas_climaticas/gases_do_efeito_estufa>.

JENKINS, B.M. **Fuel Properties for Biomass Materials**, International Symposium on application of Energy in Agriculture: The Role of Biomass Fuels, preprint, Delhi, India, 1990.
KNOEFF, H., **Handbook: biomass gasification**, RTG – Biomass Technology Group, The Netherlands, 2005.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O.,**Fluidization engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1991. 491p.

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**. 216f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UNIFEI, Itajubá-MG, 2006.

MENDELEEV, D.I., **Sochineniya (Collection of Works)**, Moscow: Akad. Nauk SSSR, 1897, vol. 15.

MILLER, B.G., TILLMAN, D.A.;**Combustion Engineering Issues for Solid Fuels**, Burlington USA, Elsevier, 2008, 521p.

MILLER, R. W.; **Flow measurement engineering handbook**, 3rd ed.; USA, Mc Graw Hill, 1996. 1168p.

MME, **Ministério de Minas e Energia**, disponível em: <www.mme.gov.br>, acesso em maio 2012

MORAIS, L.C., DWECK, J., CAMPOS, V., TOLEDO, A.C.T., BÜCHLER, P.; **Características e reaproveitamento do lodo de esgoto para fins cerâmicos e fonte alternativa de energia**. 32^a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química, Fortaleza – CE, 2009.

OLIVEIRA, F.C., **Central de Compostagem de lodo de esgoto de Lavapés**, 11^o Audiência de Sustentabilidade –30/09/2008 Tema: Compostagem de Resíduos Orgânicos.

PAIVA, S. N.; **Compósito cimento-lodo de ETE de indústria de papel para aplicações na construção civil**. 111f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais), ESALQ-USP, Piracicaba - SP, 2007.

PARODI, F. A., SÁNCHEZ, C. G., **Aspectos da Co-gaseificação de Resíduos Agroindustriais e Municipais**, AGRENER 2002 – 4^o Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas – SP, 2002

PELLEGRINO, R.; **Gaseificação de carvão mineral com adição de vapor e remoção de H₂S, em leito fluidizado**. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UNICAMP. 2006.
PÊRA, H. **Geradores de Vapor**. São Paulo: Ed. Fama, 1980.

PERKIN-ELMER, **EA 2400 Series II Specifications**, Waltham, MA, USA: PerkinElmer, Inc.2005-2011.

PINTO, F., ANDRÉ, R. N., LOPES, H., DIAS, M., GULYURTHU, I., CABRITA, I.; **Effect of Experimental Conditions on Gas Quality and Solid Produced by Sludge Gasification. 2. Sewage Sludge Mixed with Biomass**. Energy & Fuels Magazine Vol. 22, No. 4, p 2134-2325, 2008.

PORTAL CELULOSE ONLINE, disponível em:

<http://www.celuloseonline.com.br/artigos/Casca+de+eucalipto+para+a+produo+de+bioetanol_>
e <http://www.celuloseonline.com.br/artigos/Hidreltrica+ou+biomassa_>, acesso em abril 2011.

REED, T. B.; **Biomass Gasification: principles and technology**. Noyes Data Corporation, 1981
ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R.; HAN, J.S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A., 2005, “**Cell Wall Chemistry**” **Chapter 03 Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Editora Taylor & Francis Group. New York, USA.

SANCHEZ, C. G.; **Estudo da volatilização e gaseificação de biomassa em leito fluidizado**. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), UNICAMP. Campinas – SP. Ano 1994.

SANCHEZ, C. G. *org.*; **Tecnologia da gaseificação da biomassa**. Campinas, SP : Editora Átomo, 2010.

SEGGIANI, M., VITOLO, S., PUCCINI, M., BELLINI, A., **Cogasification of sewage sludge in an updraft gasifier**. *Fuel*, 93, (2012), pp. 486-491.

YANG, W. C. *et al*, **HANDBOOK of FLUIDIZATION and FLUID-PARTICLE SYSTEMS**, New York, U.S.A, Marcel Dekker, 839p, 2003.

YURIENIEV, V. N.; LEBEDIEV, P.D. **Manual Termotécnico**. M. Energia, T.2, 1976

ZEITUONI, R.; **ANÁLISE CRÍTICA DA NORMA CETESB P 4.230 – “APLICAÇÃO DE LODOS DE SISTEMAS DE TRATAMENTO BIOLÓGICO EM ÁREAS AGRÍCOLAS – CRITÉRIOS PARA PROJETO E OPERAÇÃO”**. 211 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical), IAC, 2005.

ZHANG, L. , MASAHIDE, I. ,SATO, A., NIMOMIYA, Y., SAKANO, T., KANAOKA, C., MASUI, M., **Combustibility of dried sewage sludge and its mineral transformation at different oxygen content in drop tube furnace**. *Fuel Magazine* 83, Japan, 2003.

APÊNDICE A – RESULTADOS CALCULADOS NA SÉRIE DE EXPERIMENTOS REALIZADOS

Tabela A.1 Resultados dos experimentos de gaseificação da serragem de pinus puro

Variável	Unidade	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
Δp placa:	mm _{H2O}	100,00	100,00	120,00	100,00	45,00
vazão de ar:	kg/h	35,47	34,84	38,58	35,78	24,06
vel. Fluidização:	m/s	0,97	1,06	1,10	1,01	0,65
FA real:		0,51	0,50	0,91	0,51	0,34
Temp. Leito:	°C	737,72	826,79	770,47	774,34	735,78
Análise Elementar do Combustível						
Carbono:	%	43,55	43,55	43,55	43,55	43,55
Hidrogênio:	%	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80
Nitrogênio:	%	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Enxofre:	%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oxigênio:	%	41,55	41,55	41,55	41,55	41,55
Umidade:	%	7,88	7,88	7,88	7,88	7,88
Cinzas:	%	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
PCI combustível:	MJ/kg _{comb}	17,54	17,54	17,54	17,54	17,54
Análise do Gás Produzido						
teor de H ₂ :	%	1,92	2,02	2,96	2,76	3,33
teor de O ₂ :	%	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d
teor de N ₂ :	%	75,93	73,30	73,55	80,40	68,43
teor de CH ₄ :	%	1,51	1,37	1,73	1,46	3,06
teor de CO:	%	9,31	10,94	4,65	7,73	13,76
teor de CO ₂ :	%	11,33	12,38	18,49	7,65	11,42
PCI do gás:	MJ.Nm ⁻³	1,92	2,09	1,52	1,79	3,19
Alimentador:	RPM	204,60	204,60	120,00	205,20	210,30
Vazão combustível:	kg/h	22,08	22,08	13,45	22,14	22,66
Balanco de Massa:	%	68,34	68,34	82,38	90,71	65,00
Q _{útil} :	MJ/kg _{comb}	4,54	4,54	5,27	4,36	5,90
Q _{gás} :	MJ/kg _{comb}	1,25	1,25	2,17	1,53	0,99
Q _{disp} :	MJ/kg _{comb}	17,54	17,54	17,55	17,54	17,54
Q _{cinzas} :	MJ/kg _{comb}	0,00	0,00	0,00	10,83	0,23
Q _{carb} :	MJ/kg _{comb}	0,00	0,00	0,00	9,10	0,20

$Q_{c.s.}$: MJ/kg _{comb}		0,00	0,00	0,00	1,73	0,03
Q_{ar} : MJ/kg _{comb}		0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
$Q_{m.a.}$: MJ/kg _{comb}		11,75	11,75	10,10	0,81	10,41
E_{ff} : %		25,87	25,87	30,03	24,87	33,62
E_{fq} : %		33,00	33,00	42,42	33,62	39,28
Q_{total} : kW _{térmicos}		27,82	27,82	19,68	26,82	37,11
$\eta_{gaseificador}$: %		25,87	25,87	30,03	24,87	33,62
$h_{gás}$: MJ.Nm ⁻³		1,27	1,27	2,21	1,55	1,00
$q_{útil}$: %		25,87	25,87	30,03	24,87	33,62
$q_{gás}$: %		7,14	7,14	12,39	8,75	5,66
q_{carb} : %		0,00	0,00	0,00	51,89	1,17
$q_{c.s.}$: %		0,00	0,00	0,00	9,86	0,17
$q_{m.a.}$: %		67,00	67,00	57,58	4,62	59,39
Variável	Unidade	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8	Ensaio 9	
Δp placa:	mm _{H2O}	58,00	58,00	55,00	55,00	
vazão de ar:	kg/h	27,51	27,04	27,28	27,13	
vel. Fluidização:	m/s	0,80	0,79	0,75	0,72	
FA real:		0,50	0,49	0,32	0,32	
Temp. Leito:	°C	820,34	797,05	783,26	737,72	
Análise Elementar do Combustível						
Carbono:	%	43,55	43,55	43,55	43,55	
Hidrogênio:	%	5,80	5,80	5,80	5,80	
Nitrogênio:	%	0,13	0,13	0,13	0,13	
Enxofre:	%	0,00	0,00	0,00	0,00	
Oxigênio:	%	41,55	41,55	41,55	41,55	
Umidade:	%	7,88	7,88	7,88	7,88	
Cinzas:	%	0,38	0,38	0,38	0,38	
PCI combustível:	MJ/kg _{comb}	17,54	17,54	17,54	17,54	
Análise do Gás Produzido						
teor de H ₂ :	%	1,78	2,29	3,84	3,87	
teor de O ₂ :	%	N/d	N/d	2,42	3,26	
teor de N ₂ :	%	69,66	76,57	61,30	58,49	
teor de CH ₄ :	%	1,40	2,12	3,53	3,87	
teor de CO:	%	8,16	8,44	16,37	17,09	
teor de CO ₂ :	%	19,00	10,58	12,53	13,43	

PCI do gás:	MJ.Nm ⁻³	1,72	2,07	3,74	3,95
Alimentador:	RPM	160,00	160,00	256,10	256,10
Vazão combustível:	kg/h	17,53	17,53	27,33	27,33
Balanco de Massa:	%	73,94	66,87	71,83	75,11
Q _{útil} :	MJ/kg _{comb}	3,84	4,80	6,65	6,98
Q _{gás} :	MJ/kg _{comb}	1,18	1,19	0,93	0,97
Q _{disp} :	MJ/kg _{comb}	17,54	17,54	17,54	17,53
Q _{cinzas} :	MJ/kg _{comb}	0,00	0,00	0,00	0,00
Q _{carb} :	MJ/kg _{comb}	0,00	0,00	0,00	0,00
Q _{c.s.} :	MJ/kg _{comb}	0,00	0,00	0,00	0,00
Q _{ar} :	MJ/kg _{comb}	0,01	0,00	0,00	0,00
Q _{m.a.} :	MJ/kg _{comb}	12,53	11,55	9,96	9,58
E _{ff} :	%	21,89	27,35	37,93	39,79
E _{fq} :	%	28,60	34,12	43,23	45,34
Q _{total} :	kW _{térmicos}	18,69	23,35	50,51	52,96
η _{gaseificador} :	%	21,89	27,35	37,93	39,79
h _{gás} :	MJ.Nm ⁻³	1,19	1,20	0,94	0,98
q _{útil} :	%	21,89	27,35	37,93	39,79
q _{gás} :	%	6,71	6,77	5,29	5,55
q _{carb} :	%	0,00	0,00	0,00	0,00
q _{c. s.} :	%	0,00	0,00	0,00	0,00
q _{m.a.} :	%	71,40	65,88	56,77	54,66

Tabela A.2 Resultados dos experimentos de cogaseificação

Cogaseificação				
Variável	Unidade	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Δp placa:	mm _{H2O}	55,00	55,00	55,00
vazão de ar:	kg/h	0,01	0,01	0,01
vel. Fluidização:	m/s	0,73	0,73	0,72
FA real:		0,30	0,30	0,30
Temp. Leito:	°C	742,63	742,63	732,44
Análise Elementar do Combustível				
Carbono:	%	38,57	38,57	38,57
Hidrogênio:	%	5,31	5,31	5,31
Nitrogênio:	%	0,76	0,76	0,76
Enxofre:	%	0,37	0,37	0,37
Oxigênio:	%	35,79	35,79	35,79
Umidade:	%	8,91	8,91	8,91
Cinzas:	%	10,92	10,92	10,92
PCI combustível:	MJ/kg _{comb}	15,89	15,89	15,89
Análise do Gás Produzido				
teor de H ₂ :	%	4,96	3,87	2,47
teor de O ₂ :	%	0,00	0,00	0,00
teor de N ₂ :	%	59,82	63,00	67,01
teor de CH ₄ :	%	2,91	2,24	1,72
teor de CO:	%	13,43	11,36	8,28
teor de CO ₂ :	%	18,88	19,54	20,52
PCI do gás:	MJ.Nm ⁻³	3,27	2,65	1,93
Alimentador:	RPM	300,00	300,00	300,00
Vazão combustível:	kg/h	0,01	0,01	0,01
Balanco de Massa:	%	66,98	63,54	59,76
Q _{útil} :	MJ/kg _{comb}	5,16	4,13	2,95
Q _{gás} :	MJ/kg _{comb}	0,86	0,83	0,84
Q _{disp} :	MJ/kg _{comb}	15,89	15,89	15,89
Q _{cinzas} :	MJ/kg _{comb}	0,00	0,00	0,00
Q _{carb} :	MJ/kg _{comb}	0,00	0,00	0,00
Q _{c.s.} :	MJ/kg _{comb}	0,00	0,00	0,00
Q _{ar} :	MJ/kg _{comb}	0,00	0,00	0,00

$Q_{m.a.}$: MJ/kg _{comb}		9,87	10,93	12,10
E_{ff} :	%	32,50	25,98	18,59
E_{fg} :	%	37,92	31,21	23,86
Q_{total} :	kW _{térmicos}	45,63	36,48	26,10
$\eta_{gaseificador}$:	%	32,50	25,98	18,59
$h_{gás}$:	MJ.Nm ⁻³	0,87	0,84	0,85
$q_{útil}$:	%	32,50	25,98	18,59
$q_{gás}$:	%	5,42	5,23	5,27
q_{carb} :	%	0,00	0,00	0,00
$q_{c.s.}$:	%	0,00	0,00	0,00
$q_{m.a.}$:	%	62,08	68,79	76,14

ANEXO A - ROTEIRO BÁSICO DE OPERAÇÃO DO GASEIFICADOR

Neste anexo foi realizado um roteiro de operação do gaseificador em leito fluidizado. Suponha inicialmente que o reator esteja com o material inerte, o silo esteja carregado com combustível a ser gaseificado, o sistema de aquisição de dados e o cromatógrafo estejam funcionando adequadamente. Neste roteiro, será apresentado o procedimento, possível problema, provável causa e solução somente para as etapas que envolvem o processo de ignição, gaseificação e desligamento do sistema. A Tabela A1 apresenta o roteiro.

Tabela A1 - Roteiro de operação do gaseificador em leito fluidizado

Roteiro	Procedimento	Possível problema	Provável causa	Solução
1	Abrir válvula GLP	Vazamento nas uniões	Junta não foi bem vedada ou falta de aperto nas uniões de GLP	Marcar os pontos de vazamentos; fechar GLP; consertar vazamentos; ligar o exaustor até o GLP sumir; voltar no roteiro 1
2	Abrir válvula de alívio do ar			
3	Ligar compressor	Não liga	Fusível queimado ou fio de energia muito fino e a chave desliga	Fechar GLP; verificar problema no compressor; consertar compressor; voltar ao roteiro 1
4	Ajustar os rotâmetros de GLP para acender pré-aquecedor			
5	Ajustar vazão de ar para acender o pré-aquecedor			
6	Energizar programador de combustão	Lâmpadas do programador não ligam	Lâmpadas queimadas ou fios de energia soltos ou sujos	Desenergizar programador de combustão; verificar que as lâmpadas não estejam queimadas; verificar conexões do programador e limpar

				circuito; voltar ao roteiro 6
7	Fazer ignição do pré-aquecedor	Não houve ignição da chama	Vela ignição suja e não produz faíscas	Deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; desenergizar programas de combustão; retirar vela de ignição; limar e limpar vela de ignição; colocar de volta no pré-aquecedor; voltar ao roteiro 6
		Houve ignição mas a chama apagou imediatamente	Sensor óptico sujo ou quebrado	Deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; desenergizar programador de combustão; retirar sensor óptico; limpar o sensor e colocá-lo novamente; voltar ao roteiro 6
		Houve ignição mas o aquecedor desligou após alguns segundos	Mistura de ar e GLP estão na relação errada	Deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; reajustar as vazões de ar e GLP; voltar para o roteiro 7
		Pré-aquecedor acendeu e houve vazamento de gás nas juntas do reator	Falta de aperto nos parafusos das juntas	Desenergizar programador de combustão; deixar passar ar pelo reator para retirar o GLP não queimado; ligar o exaustor até a fumaça acabar; apertar juntas; voltar ao roteiro 7
		Continua o vazamento nas juntas do reator	Vedação velha ou queimada	Desenergizar programador de combustão; deixar passar ar pelo reator para retirar o GLP não queimado; ligar o exaustor até a fumaça

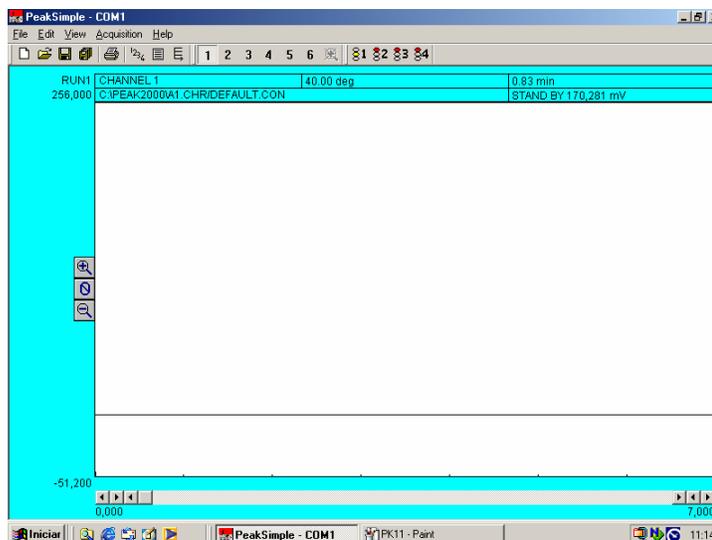
			acabar; desligar todos os sistemas; fechar válvulos de GLP; refazer as vedações das juntas; voltar ao roteiro 1
8	Aumentar a vazão de GLP e ar numa vazão maior para incrementar a taxa de aquecimento	Chama desliga ao modificar vazões	A proporção entre GLP e ar não é correta
			Verificar a proporcionalidade entre GLP e ar; deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; voltar ao roteiro 4
		Continua apagando quando se modificam as vazões de ar e GLP	Sensor óptico sujo
			Deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; desenergizar programador de combustão; retirar sensor óptico; limpar sensor e voltar a colocá-lo; voltar ao roteiro 4
		Chama apagou antes de atingir a temperatura desejada	Sensor óptico quebrou ou sujou
			Deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; desenergizar programador de combustão; retirar sensor óptico; verificar que não esteja quebrado, limpar e colocá-lo de voltar; caso esteja quebrado, trocar por um de reposição; voltar ao roteiro 4
		Vazamento de gás nas juntas do reator	Falta de aperto nos parafusos das juntas
			Desenergizar, programador de combustão; deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; ligar o exaustor até a fumaça acabar; apertar juntas;

				voltar ao roteiro 4
	Continua o vazamento nas juntas		Vedação velha	Desernegizar, programador de combustão; deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; ligar o exaustor até a fumaça acabar; desligar todos os sistemas e refazer as vedações das juntas; voltar ao passo 1
9	Ligar exaustor			
10	Esperar temperatura desejada e começar a alimentação de combustível com o fator de ar desejado	Temperatura do leito não chega a temperatura desejada	Calor fornecido pelo combustor não é suficiente	Aumentar vazão de GLP e ar; voltar ao roteiro 10
		Temperatura do leito não chega a temperatura desejada ainda	Calor fornecido pelo combustor não é suficiente ainda	Começar a alimentação de combustível em taxa de combustão com o fator de ar entre 0,8 e 1,0; desligar pré-aquecedor/programador de combustão; esperar até atingir a temperatura desejada para gaseificação; voltar ao roteiro 10
		Vazamento de gás nas juntas do reator	Falta de aperto nos parafusos das juntas	Desligar programador de combustão; deixar passar ar pelo reator para retirar o GLP não queimado; apertar juntas; voltar ao roteiro 4

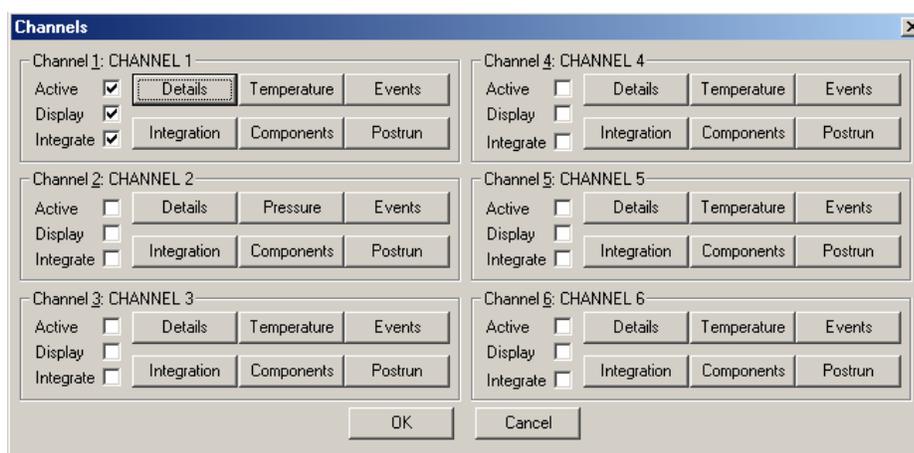
		Continua o vazamento nas juntas do reator	Vedação velha	Desligar programador de combustão; deixar passar ar pelo reator para retirar o GLP não queimado; desligar todos os sistemas e refazer as vedações das juntas; voltar ao passo 1
11	Esperar a temperatura ficar constante e começar retirar amostras de gás para o cromatógrafo	A temperatura sobe e logo o leito começa a esfriar	O material não entra uniformemente	Alimentação inconstante; movimentar material do silo; voltar ao roteiro 11
12	Ao terminar o ensaio, interromper a alimentação e queimar a cinza e combustível do leito continuando o fornecimento de ar	A temperatura sobe mais de que 950 °C	Muito carbono sem queimar no leito	Diminuir o ar de fluidização e esperar a temperatura abaixar; voltar ao roteiro 11
		A temperatura continua subindo acima de 950 °C	Ainda tem carbono não queimado no reator	Retirar fornecimento de ar; ir para o roteiro 13
13	Deixar o reator esfriar por 10 horas			
14	Abrir o silo utilizando máscara de proteção para monóxido de carbono	Sai fumaça do silo	O material está quente e pirolisando	Tampar o silo imediatamente e ligar o exaustor; voltar ao roteiro 13
15	Limpar o reator e silo			

ANEXO B - ROTEIRO BÁSICO DE OPERAÇÃO DO SOFTWARE PEAKSIMPLE[®] PARA ANÁLISES NO CROMATÓGRAFO

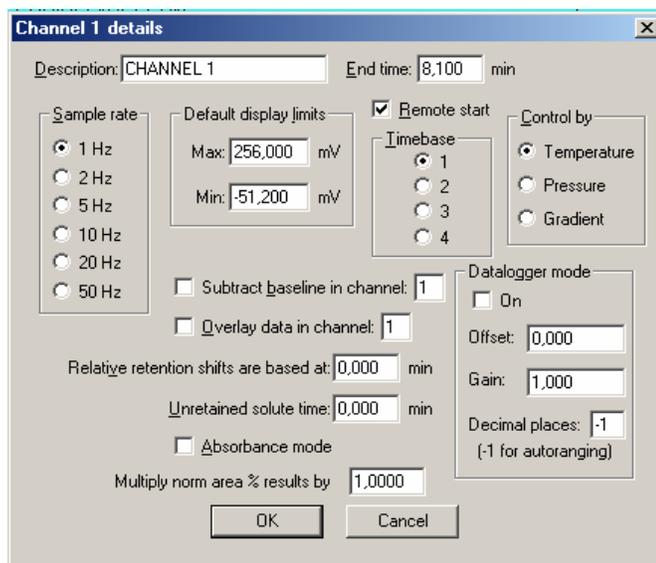
1. Ao abrir o programa, você irá visualizar a seguinte tela:



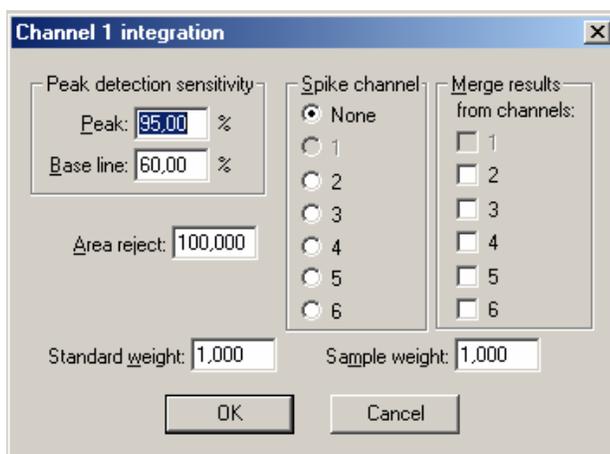
2. Primeiro passo é ajustar todos os parâmetros de configuração do software, de forma que se obtenha o melhor desempenho de análise, para isso clique em “Edit” e “Channels”. Você visualizará a seguinte tela:



- Se o seu software possuir apenas um canal ativo as opções “Active”, “Display” e “Integrate”, referente ao canal 1. Caso possua mais de um canal ativo as opções referentes aos outros canais e clique em “OK”.
- Ainda na tela “Channels” clique sobre o botão “Details” e visualizará a tela abaixo:



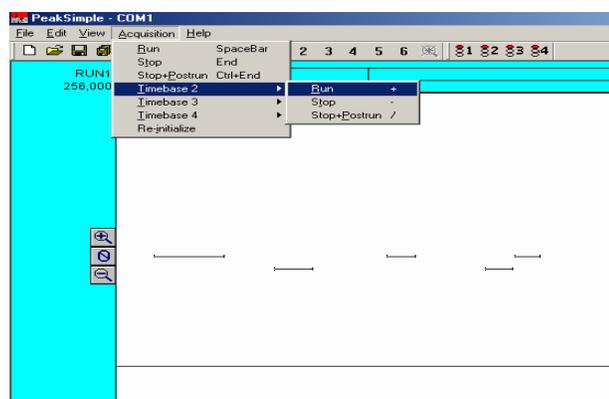
- No momento da instalação do software, um técnico estabelecerá os melhores valores para que seu equipamento adquira a melhor performance possível. Registre estas configurações e guarde em local de fácil acesso para futuras consultas.
- Retornando a tela “Channels” clique no botão “Integration” e visualizará a tela abaixo:



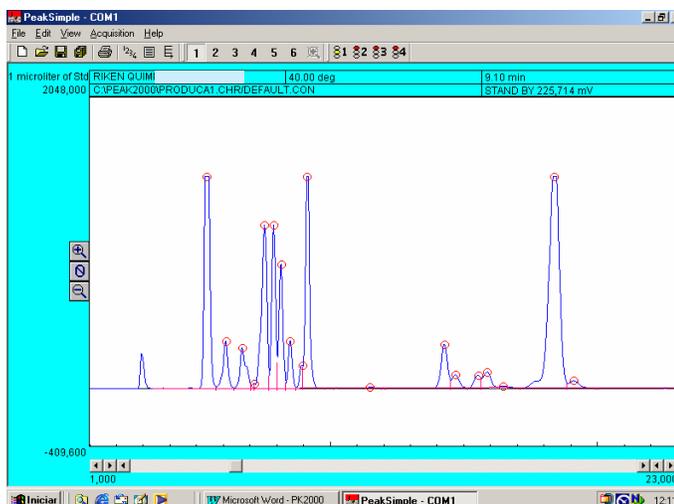
7. Os valores de “Peak” e “Base Line” serão estabelecidos na instalação, bem como os outros parâmetros. No item “Area Reject” será estabelecido um valor inicial, mas você poderá alterá-lo conforme a necessidade de sua análise.

A Injeção do Padrão e a Elaboração de uma Tabela de Calibração

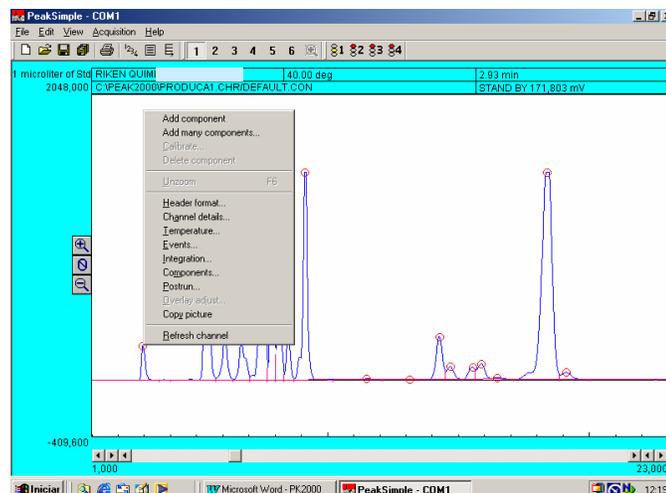
1. Após a injeção de um padrão ou amostra, você deve dar início a corrida acionando a tecla “Espaço”. Caso queira encerrar a corrida teclé “End”.
2. Caso seu software comporte mais de um canal verifique as teclas correspondentes para cada canal, acionando o comando “Acquisition” e “Timebase 2,3,4,5 ou 6”.



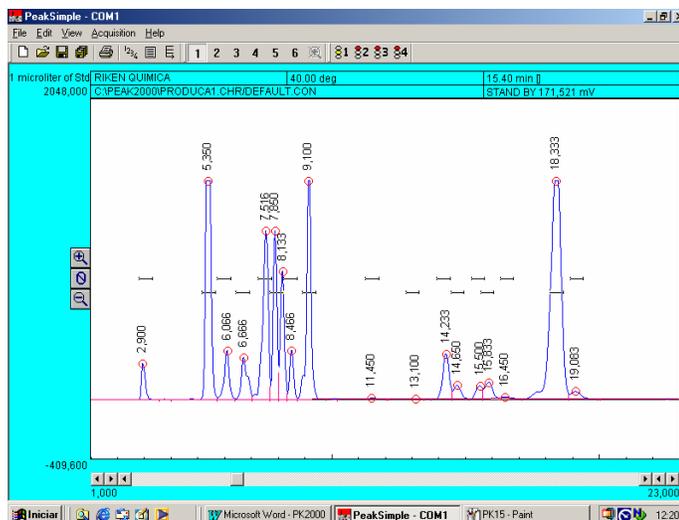
3. Após a injeção do padrão, você obterá um cromatograma conforme exemplo abaixo



- Com o cursor, Clique com o botão direito do mouse bem em cima do círculo apresentado na ponta dos picos. Em seguida selecione a opção “Add Component”.



- Logo em seguida, acima do pico, você poderá visualizar o tempo de retenção. Repita a mesma operação em todos os picos. Repare que surgirão traços acima ou sobre os picos. Estes traços limitam o tempo inicial e o tempo final do pico.



- Agora você precisa identificar cada pico e dar os nomes dos componentes a quem eles se referem. Para isso, clique novamente com o botão direito do mouse em cima do círculo localizado na ponta do pico e clique em “Edit Component”.

Component details

Peak number: 1

Peak name: Acetona

Start: 2.68 End: 3.18 Expected: 0.00

Internal standard: 20 Units: ppm

Internal standard peak: 0 Ref peak: 0

In case of multiple peaks:

- Show each peak separately
- Show first peak only
- Show last peak only
- Show largest peak only
- Show total of all peaks

Measure peak:

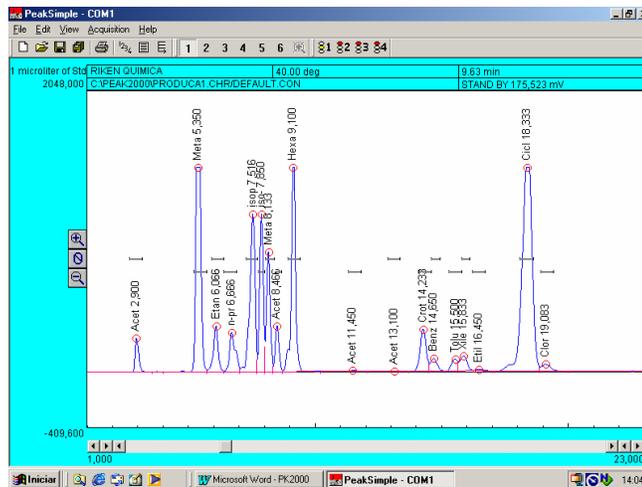
- Area
- Height

Alarms...

Multiplication factor: 0.000 Calculate area as time-slice

OK Cancel

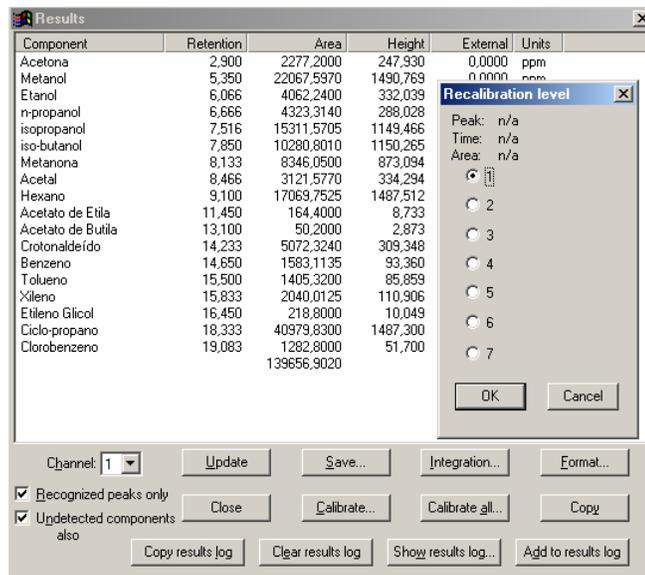
7. Em “Peak number” determine o número de identificação do pico.(Ex: 1,2,3,4....)
8. Em “Peak name”, digite o nome do componente. (Ex: Acetona, n-propanol....)
9. Em “Start” e “End” estarão pré-estabelecidos os limites de tempo inicial e final, conforme citado anteriormente. Caso os picos do cromatograma sejam muito juntos pode haver a necessidade de pequenas alterações nesses tempos.
10. Ex: Se o pico 1 tem tempo inicial de 1,00 e final de 1,50 o tempo inicial do pico 2 deve ser no mínimo 1,51, pois pode haver sobreposição dos picos.
11. Em “Internal standard” digite a concentração do componente.
12. Em “Units”, digite a unidade de concentração em que foi preparado o padrão. (Ex.: ppm, mg/100mL,
13. Depois de concluído todos os picos, você deverá ter um cromatograma como o exemplo abaixo:



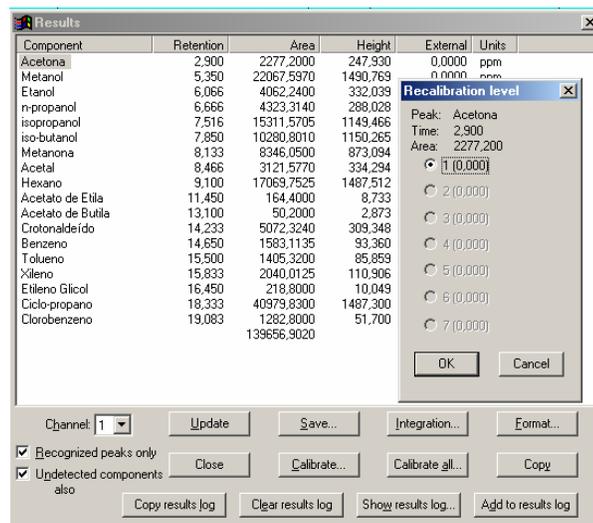
- Agora que todos os picos estão identificados e nomeados, temos que montar uma tabela de calibração para que os valores de área sejam relacionados com as quantidades injetadas.
- Clique em “View” e “Results”, onde você poderá visualizar todos os componentes, suas áreas e suas concentrações (External) com valor ZERO.

Component	Retention	Area	Height	External	Units
Acetona	2.900	2277.2000	247.930	0,0000	ppm
Metanol	5.350	22067.5970	1490.769	0,0000	ppm
Etanol	6.066	4062.2400	332.039	0,0000	ppm
n-propanol	6.666	4323.3140	288.028	0,0000	ppm
isopropanol	7.516	15311.5705	1149.466	0,0000	ppm
iso-butanol	7.850	10280.8010	1150.265	0,0000	ppm
Metanona	8.133	8346.0500	873.094	0,0000	ppm
Acetal	8.466	3121.5770	334.294	0,0000	ppm
Hexano	9.100	17069.7525	1487.512	0,0000	ppm
Acetato de Etila	11.450	164.4000	8.733	0,0000	ppm
Acetato de Butila	13.100	50.2000	2.873	0,0000	ppm
Crotonaldeído	14.233	5072.3240	309.348	0,0000	ppm
Benzeno	14.650	1583.1135	93.360	0,0000	ppm
Tolueno	15.500	1405.3200	85.859	0,0000	ppm
Xileno	15.833	2040.0125	110.906	0,0000	ppm
Etileno Glicol	16.450	218.8000	10.049	0,0000	ppm
Ciclo-propano	18.333	40979.8300	1487.300	0,0000	ppm
Clorobenzeno	19.083	1282.8000	51.700	0,0000	ppm
		139656.9020		0,0000	

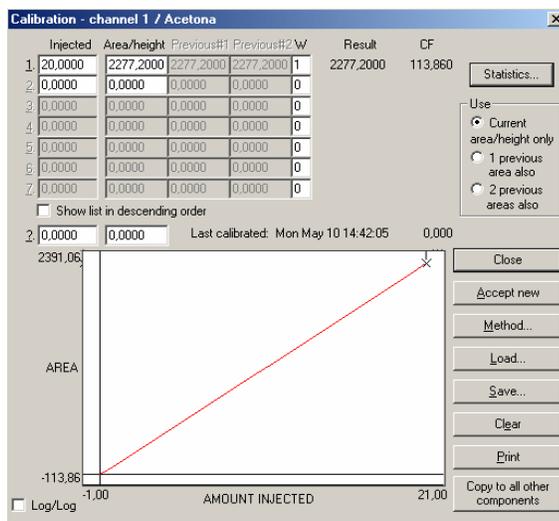
- Selecione as opções “Recognized peaks only” e “Undetected components also”.
- Clique no botão “Calibrate all...” e em seguida “OK” para “Recalibration level” estipulado em 1.



18. Selecione o primeiro componente, clique em “Calibrate” e “OK” para “Recalibration level” estipulado em 1.

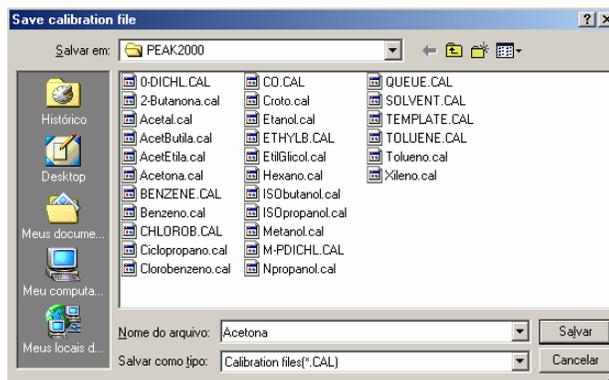


Em seguida aparecerá a tela:



19. No campo “Inject” digite a concentração do padrão utilizado e no campo “W” digite 1 e poderá perceber a formação de uma curva de calibração deste componente.

20. Clique em “Salvar” e dê um nome ao arquivo desta curva, como no exemplo abaixo:



21. Repita este passo para todos os componentes da tabela.

22. Após salvar todos os componentes, feche as janelas de “Calibration” e “Results” Clique em “Edit” “Chanel” e “Component”.

Channel 1 components

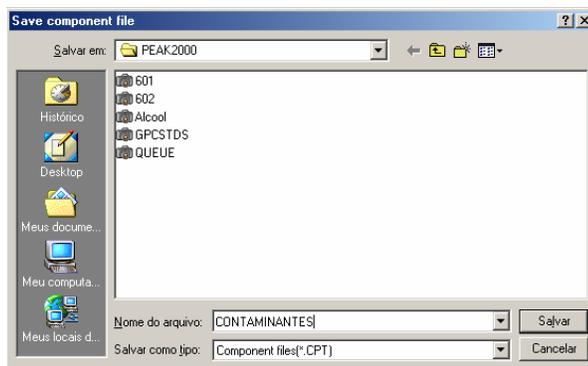
CON

Peak	Name	Start	End	Calibration
1*	Acetona	2,680	3,180	Acetona.cal
2*	Metanol	5,220	5,720	Metanol.cal
3*	Etanol	5,900	6,400	Etanol.cal
4*	n-propanol	6,400	6,900	Npropanol.cal
5*	isopropanol	7,270	7,720	ISOpropanol.ca
6*	iso-butanol	7,760	8,030	ISObutanol.cal
7*	2-butanona	8,040	8,410	2-Butanona.cal
8*	Acetal	8,420	8,680	Acetal.cal
9*	Hexano	8,920	9,420	Hexano.cal
10*	Acetato de Eti	11,330	11,830	AcetEtila.cal
11*	Acetato de But	12,880	13,380	AcetButila.cal
12*	Crotonaldeído	14,100	14,600	Croto.cal
13*	Benzeno	14,610	14,950	Benzeno.cal
14*	Tolueno	15,300	15,800	Tolueno.cal
15*	Xileno	15,810	16,120	Xileno.cal
16*	Etileno Glicol	16,220	16,720	EtilGlicol.cal
17*	Ciclo-propano	18,100	18,620	Ciclopropano.c

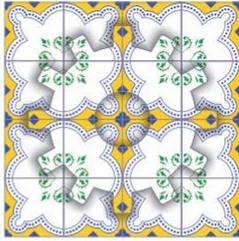
Buttons: Add... Change... Remove Calibrate... Load... Save... Clear Print OK

23. Note que a coluna “Calibration” possui os nomes dos arquivos salvos, de cada componentes.

24. Clique em salvar e determine um nome específico para esta curva. Ex: Álcool, Contaminantes, Padrão 1, etc....



ANEXO C – PUBLICAÇÕES A PARTIR DESTE TRABALHO



Caracterização de *Pinus*, *Eucaliptus*, Casca de *Eucaliptus* e Resíduos Florestais e de Destoca para fins energéticos.

João Paulo Vissotto, vissotto@fem.unicamp.br¹
Alexandre Witier Mazzonetto, awmazzonetto@fem.unicamp.br²
Renato Cruz Neves, renatocruz@fem.unicamp.br¹
Elisabete Maria Saraiva Sánchez, bete@fem.unicamp.br³
Caio Glauco Sánchez, caio@fem.unicamp.br⁴

¹ Faculdade de Engenharia Mecânica – Dpto Engenharia Térmica e de Fluidos – DETF/FEM/UNICAMP - aluno de Mestrado, Rua Mendeleiev, 200; Cidade Universitária "Zeferino Vaz"; Barão Geraldo - Campinas - SP CEP 13083-970

² Faculdade de Engenharia Mecânica – Dpto Engenharia Térmica e de Fluidos – DETF/FEM/UNICAMP – aluno de Doutorado, Rua Mendeleiev, 200; Cidade Universitária "Zeferino Vaz"; Br. Geraldo - Campinas - SP CEP 13083-970; FAAP – Engenharia – Professor, Rua Alagoas, 903 – Prédio – 4 CEP: 01242-902 awmazzonetto@faap.br

³ Faculdade de Engenharia Mecânica – Dpto Engenharia Térmica e de Fluidos – DETF/FEM/UNICAMP – Dra. Pesquisadora, Lab. Caract. de Resíduos e Biomassas, Rua Mendeleiev, 200; Cidade Universitária "Zeferino Vaz"; Barão Geraldo - Campinas - SP CEP 13083-970

⁴ Faculdade de Engenharia Mecânica – Dpto Engenharia Térmica e de Fluidos – DETF/FEM/UNICAMP – Professor Associado, Rua Mendeleiev, 200; Cidade Universitária "Zeferino Vaz"; Barão Geraldo - Campinas - SP CEP 13083-970

Resumo: O setor de produção de papel e celulose movimenta números interessantes no Brasil, mais de 115.000 empregos diretos e 575.000 indiretos, 222 empresas em 539 municípios distribuídos por 18 estados; 2,2 milhões de hectares de florestas plantadas para fins industriais, representa mais de 3% das exportações brasileiras (em 2010) e a produção de papel em 2011 totalizou 9,8 milhões de toneladas. É um setor em expansão, com alta demanda de energia e muita produção de resíduos. A importância do setor, seus números grandiosos e sua alta demanda por energia motivaram esta pesquisa. Este trabalho apresenta os resultados da caracterização da Serragem de *Pinus* e *Eucaliptus*, Casca de *Eucaliptus* e Resíduos Florestais para fins energéticos, assim sendo, determinou-se o poder calorífico superior (PCS), composição elementar (C,H,N), umidade, teor de voláteis, teor de cinzas e carbono fixo. As biomassas são da região de Limeira, Americana e Piracicaba. O resultado demonstra o potencial energético de um material que tem sido deixado no campo (resíduos florestais) ou levado para produção de compostagem (serragens e casca). O PCS do *Pinus* (18,56 MJ/kg) e do *Eucaliptus* (17,73 MJ/kg) mostra o potencial para geração de energia e uma fonte renovável para atender a crescente demanda por energia do setor. A completa caracterização possibilita definir a melhor rota tecnológica para aplicação do potencial energético do material, que até então tem sido desprezado. Assim a serragem pode ser usada na co-gaseificação e o syngas produzido utilizado em caldeiras em co-firing com o combustível original.

Palavras-chave: Biomassa, resíduos florestais, poder calorífico, energia renovável

1. INTRODUÇÃO

A importância do setor de papel e celulose no cenário nacional é demonstrada por números grandiosos, como área plantada (2,2 milhões de hectares de florestas plantadas para fins industriais e 2,9 milhões de hectares de florestas preservadas), 115.000 de empregos diretos e 575.000 indiretos e 222 empresas, BRACELPA (2012), a relevância das quantidades de biomassas disponíveis que não são utilizadas para fins energéticos motivam uma discussão maior sobre as possibilidades de gerar-se energia para consumo do próprio setor, bem como disponibilizar-se o excedente para o sistema elétrico nacional.

A empresa CONPACEL, em 2009, produziu 500 toneladas mensais de serragem de eucalipto e 1300 toneladas mensais de casca (além do residual da colheita no campo), os quais foram destinados para compostagem. A compostagem é um processo que demora aproximadamente sessenta dias para estabilizar a matéria orgânica e necessita

controlar a umidade e aeração ou movimentação da matéria, ou seja, “investe-se mais energia” na biomassa (Conpacel, Central de Compostagem, 2012).

Com a crescente preocupação da utilização mais eficiente do potencial energético disponível, há um aumento nas pesquisas em fontes renováveis de energia visando apresentar alternativas ao uso de fontes fósseis. Em 2010 a matriz energética no setor de papel e celulose dependeu de 13,5% de combustíveis fósseis (8,0% de gás natural e 5,5% de óleo combustível) e o volume de resíduos não aproveitados, que são cerca de 1800 toneladas mensais, despertou nos autores a disposição de analisar o potencial energético destas biomassas.

De acordo com Sánchez *et al.* (2010), a caracterização de biomassas deve ser baseada em seu uso e apresentar elementos que auxiliem na compreensão das propriedades determinantes, inerentes a de cada biomassa. O emprego da biomassa com fins energéticos requer um pleno conhecimento das propriedades físico-químicas do combustível. Em 2010, o Governo Federal do Brasil, através da Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (D.O.U., 2010) que visa normatizar a destinação de resíduos sólidos e possibilita o emprego dos mesmos para fins energéticos. Perante as diretrizes estabelecidas, as biomassas aqui apresentadas são classificadas como Resíduos Classe II-A, que são materiais não inertes e podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Para que se tenha uma correta escolha quanto ao processo energético escolhido para cada biomassa, faz-se então, a necessidade de caracterização das mesmas, cujos resultados serão apresentados e discutidos a seguir.

O presente trabalho é uma fração inicial de um projeto que está sendo desenvolvido no Laboratório de Combustão e Gaseificação da FEM/UNICAMP que avaliará o potencial energético das biomassas do setor de papel e celulose que hoje não recebem destinação energética.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Madeira e Resíduos Florestais

É sabido que desde a pré-história, gera-se fogo com combustível de biomassa, ou seja, lenha. Desde então sua importância tem sido vital no desenvolvimento da humanidade pois até meados do século XVIII os combustíveis fósseis ainda não tinham um valor significativo na matriz energética mundial. Atualmente, a madeira ainda tem extrema importância, principalmente em países subdesenvolvidos e com ausência de jazidas de combustíveis fósseis, pois é fundamental para o preparo de alimentos para um enorme número de pessoas e comunidades. Estima-se que, a cada seis pessoas, duas utilizam a madeira como a principal fonte de energia, particularmente para famílias de países em desenvolvimento, sustentando processos de secagens, cozimentos, fermentações e produções de eletricidade, etc. (FAO, 2003).

Para Hüebelin (2001) os principais resíduos da indústria madeireira são: a) a serragem, originada da operação das serras, que pode chegar a 12% do volume total de matéria-prima; b) os cepilhos ou maravalhas, gerados pelas plainas, que podem chegar a 20% do volume total de matéria prima, nas indústrias de beneficiamento; c) a lenha ou cavacos, composta por costaneiras, aparas, refilos, cascas e outros, que pode chegar a 50% do volume total de matéria-prima, nas serrarias e laminadoras. Mady (2000) ressalta o desperdício no setor madeireiro ainda é muito grande, apesar dos avanços tecnológicos. Estima-se que do volume total de uma tora, seja aproveitado cerca de 40% a 60%, significando que a cada 10 árvores cortadas, apenas 5 serão aproveitadas comercialmente.

De acordo com Brito (2007), o uso da madeira para energia engloba diminuir a dependência energética externa e uma maior segurança quanto ao suprimento da demanda, algo que muitos dos combustíveis hoje empregados não proporcionam. Além do mais, graças ao seu alto potencial renovável e produtivo, especialmente no caso brasileiro, a madeira representa uma matriz energética ambientalmente mais limpa e socialmente mais justa, pois é uma das fontes de energia que permite uma das maiores taxas de geração de emprego por recurso monetário investido.

Segundo Rowell, *et al* (2005), quimicamente, a madeira é melhor definida como um biopolímero tridimensional, formado por celulose, hemicelulose e lignina, com uma menor quantidade de extrativos e materiais inorgânicos. A substância química mais abundante numa árvore viva é a água, mas na madeira em base seca, toda a parede celular da madeira é formada por polímeros de açúcares (carboidratos, 65 a 75%), que são combinados com a lignina (18 a 35%).

Quando a casca e a madeira são queimadas, geralmente 75 a 80% são materiais voláteis e cerca de 20 a 24% são carbono fixo. Em comparação, o carvão mineral tem muito mais carbono fixo, quase sempre acima de 60%. A proporção entre os componentes voláteis e carbono fixo influencia as características de queima do combustível pelo fato dos componentes voláteis, quando aquecidos, saírem do material e se queimarem rapidamente na forma gasosa. O carbono fixo queima-se vagarosamente na fase sólida como carvão, conforme Arola (1976).

Na Tabela (1) Camargo (2006) obteve a caracterização do bagaço de cana de açúcar, biomassa amplamente utilizada para co-geração de energia no Estado de São Paulo.

Tabela 1. Caracterização do bagaço da cana de açúcar (Base Úmida)

<i>Bagaço de Cana</i>			
<i>Composição Imediata (%)</i>		<i>Composição Elementar (%)</i>	
Carbono Fixo	8,0 ± 0,3	Carbono	57,19 ± 0,07
Voláteis	85,3 ± 1,0	Hidrogênio	6,10 ± 0,33
Cinzas	6,7 ± 0,8	Nitrogênio	0,35 ± 0,04
Umidade	11,0 ± 0,3	Oxigênio	36,36 ± 0,28
<i>Poder Calorífico Superior</i>	J/g	1014 ± 66	

2.2. Metodologia

As biomassas tem origem nas cidades de Americana, Limeira e Piracicaba – SP, por serem cidades com vocação industrial nos ramos madeireiro e de papel e celulose.

Segundo Sánchez.(1994) estudos sobre a conversão termoquímica de biomassas em energia necessitam de quatro classes de informações: Granulometria, Análise Imediata, Análise Elementar e Poder Calorífico. A granulometria fornece as frações de peso em cada dimensão característica que compõem a biomassa, sendo importante para o dimensionamento do alimentador do reator e para do sistema de fluidização, temas que não serão tratados nesse artigo. De acordo com Sánchez *et al.*(2010), a análise imediata fornece as frações em peso de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo de uma amostra de biomassa.

2.2.1. Análise Imediata

A análise imediata fornece as frações em peso de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo de uma amostra de biomassa.

2.2.1.1. Análise de Umidade

A determinação de umidade é a primeira análise a ser realizada e demonstra a aplicabilidade do material em processos termoquímicos, biomassas com umidade superior a 50% têm restrições quanto ao uso termoquímico. Para a determinação da umidade foi seguido um roteiro da norma: “E871 – 82 (Reapproved 2006) Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels”. Esta norma se aplica a combustíveis particulados de madeira: Pellets, serragem, cavacos de árvore verde, destocagem, madeira triturada ou qualquer tipo de combustível de madeira particulada de volume inferior a 1in³.

O cálculo do percentual de umidade é dado por:

$$\% \text{ umidade} = \left[\frac{(P_i - P_f)}{(P_i - P_c)} \right] \times 100$$

onde:

Pi = Peso inicial da massa úmida com o cadinho tampado;

Pf = Peso final da amostra seca e estabilizada com o cadinho tampado;

Pc = Peso do cadinho vazio e tampado.

2.2.1.2. Voláteis

A determinação da fração volátil é importante para a previsão da chama a ser gerada pelo combustível sólido, pois durante a devolatilização há o desprendimento de gases combustíveis formados durante a elevação da temperatura da biomassa. Seu conhecimento auxilia, por exemplo, no dimensionamento do volume de uma fornalha e fornece conhecimento sobre a dinâmica da chama formada durante a oxidação ou redução da biomassa. A parte volátil do combustível é formada praticamente de metano, monóxido de carbono e hidrogênio, além de gases não combustíveis, oxigênio e nitrogênio.

A determinação de voláteis em resíduos de madeiras segue roteiro adaptado da norma “ASTM- E872 – 82 (Reapproved 2006) Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels” e aplica-se aos mesmos combustíveis da norma anterior. O procedimento é sequência da análise de umidade. Este método de teste determina a porcentagem de produtos gasosos, exclusivo de vapor de umidade, na amostra de análise de combustível de partículas de madeira que é liberado nas condições específicas do teste conforme segue:

- $\% \text{ voláteis} = A - B$
- $A = \left[\frac{(P_i - P_f)}{(P_i - P_c)} \right] \times 100$

onde:

Pi = Peso inicial da massa desumidificada na análise de umidade e com o cadinho tampado;

Pf = Peso final da amostra volatilizada com o cadinho tampado;

Pc = Peso do cadinho vazio e tampado.

B = Valor % de umidade calculado na norma E871 – 82

2.2.1.3. Análise de Cinzas

As cinzas são o material residual da oxidação completa do combustível sólido, composta basicamente por constituintes inorgânicos, ou seja, todos os constituintes minerais do combustível e dependendo do combustível original, poderá ter a destinação como insumo agrícola. Esses minerais são apresentados na forma de óxidos, como por exemplo Óxido de alumínio (Al₂O₃); Óxido férrico (Fe₂O₃); Óxido de silício (SiO₂); Óxido de Potássio (K₂O); Óxido de Cálcio (CaO); Óxido de Magnésio (MgO); etc. A determinação de cinzas segue roteiro das normas “ASTM E1102 – 84 Standard Test Method for Ash in Wood” e “ASTM E1534 – 93 Standard Test Method Ash Content of Particulate Wood Fuels”, como descrito:

$$\% \text{ cinzas} = \left[\frac{(P_z - P_c)}{(P_i - P_c)} \right] \times 100$$

onde:

Pc = Peso do cadinho vazio e tampado;

Pi = Peso inicial da massa volatilizada com o cadinho tampado;

Pz = Peso do cadinho tampado com as cinzas;

2.2.1.4. Determinação do Carbono Fixo

A determinação do carbono fixo é feita por diferença entre a soma dos teores (%) de umidade, matéria volátil e cinzas e 100%.

$$\% \text{ carbono fixo} = 100\% - \% \text{ umidade} - \% \text{ voláteis} - \% \text{ cinzas}$$

2.2.1.5. Determinação do Poder Calorífico

O poder calorífico de combustíveis sólidos pode ser determinado através de ensaio de bomba calorimétrica e segue a norma ASTM E711-87 (2004), também pode ser calculado através de equações empíricas quando não se tem disponibilidade de realização de ensaio e desde que conhecida a composição elementar do combustível. A bomba calorimétrica (Sánchez, 1994) é utilizada para medir o calor liberado durante a combustão do combustível em atmosfera oxigenada. Essa técnica determina o poder calorífico superior a volume constante.

Em algumas aplicações, como em dimensionamentos de sistemas preliminarmente, é suficiente conhecer-se o poder calorífico a partir das equações empíricas, porém, para uma melhor precisão e aplicação real do combustível se faz necessário o teste em bomba calorimétrica.

2.2.2. Análise Elementar

A análise elementar nos fornece os teores de elementos orgânicos, o ensaio é destrutivo e a análise realizada com os gases provenientes da pirólise da amostra. Neste trabalho, os resultados das análises elementares foram obtidos através do equipamento Perkin Elmer CHN-2400, com precisão $\leq 0,2\%$, realizadas na Central Analítica do Instituto de Química da USP.

Na literatura podem-se encontrar várias referências para as biomassas estudadas, Jenkins (1990) realizou um extenso trabalho de caracterização na Universidade da Califórnia. Foram caracterizados 62 tipos de biomassas, com análises imediata e elementar e poder calorífico. Não fora comentado se há dispersão dos resultados para uma mesma biomassa. Foram criados modelos de correção para obtenção do poder calorífico superior a partir das análises imediata e elementar da biomassa, já Brito & Barrichello (1978) pesquisaram características do eucalipto e sua casca como combustíveis, a Tab. (1) apresenta esses valores encontrados nestes trabalhos e que podem fornecer uma avaliação preliminar do potencial do combustível.

Apesar dos estudos de Miller & Tillman (2008) e Jenkins (1990) terem sido realizados em épocas distintas, os valores apresentados são semelhantes. A Tab. (2) apresenta os valores de análise elementar e poder calorífico encontrado nas referências citadas. Para o resíduo de destoca não fora encontrada bibliografia que apresentasse valores para as propriedades desejadas.

Tabela 1: Valores de análise imediata

<i>Análise</i>	<i>Combustível</i>				
	<i>Pinus¹</i>	<i>Pinus²</i>	<i>Eucaliptus²</i>	<i>Casca de Eucalipto³</i>	<i>Serragem Misturada¹</i>
Umidade (B.U.%)	45,00	23-38	20-24	n/d	40,00
Análise Imediata (B.S. %)					
Carbano Fixo	15,20	17,30	17,82	20-24	19,00
Voláteis	84,70	82,54	81,42	75-80	80,00
Cinzas	0,10	0,29	0,79	3,48	1,00

Fontes: 1 – Miller & Tillman, 2008; 2 - Jenkins, 1990; 3 - Brito & Barrichello, 1978; n/d - não disponibilizado

Os valores da Tab. (3) mostram que todas as biomassas possuem semelhanças para os parâmetros analisados, com redução do poder calorífico dos derivados de eucalipto. As possíveis tecnologias para conversão dessas biomassas residuais em energia são os processos termoquímicos: Combustão, Pirólise e Gaseificação. A combustão direta destas biomassas pode ser realizada em unidades geradoras de vapor, que devem ser construídas de forma a obter um melhor aproveitamento da energia liberada pela queima desse tipo de combustível.

Tabela 3: Valores de análise elementar e poder calorífico

<i>Análise</i>	<i>Combustível</i>				
	<i>Pinus¹</i>	<i>Pinus²</i>	<i>Eucaliptus²</i>	<i>Casca de Eucalipto³</i>	<i>Serragem Misturada¹</i>
Análise Elementar (% B.S.)					
Carbono	49,10	49,25	49,00	51,20	49,20
Hidrogênio	6,40	5,99	5,87	6,00	6,00
Nitrogênio	0,20	0,06	0,30	0,40	0,04
Enxofre	0,20	0,03	0,01	0,03	<0,01
Oxigênio	44,00	44,36	43,97	37,80	43,00
Poder Calorífico Superior (B.S.)					
MJ/kg	19,79	20,02	19,42	18,00	19,56

Fontes: 1- Miller & Tillman, 2008; 2 - Jenkins, 1990; 3 – Brito & Barrichello, 1978

As temperaturas no interior da câmara de combustão variam na faixa de 900° a 1400°C (Bazzo, 1995). Outra possível utilização é a conversão dos mesmos em combustível líquido ou gasoso, a conversão em combustível líquido se dá através do processo de pirólise que produz a partir do resíduo, um bio-óleo e gases combustíveis de baixo poder calorífico, também podem ser utilizado em co-firing com o combustível primário da unidade de geração de vapor. A gaseificação conversão de combustível ou resíduo sólido em combustível gasoso, com uma reação em atmosfera redutora e produz o syngas, composto basicamente de metano, monóxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio e traços de hidrocarbonetos leves (Sánchez, 2010).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Seguindo as metodologias anteriores, os resultados dos ensaios de análise imediata realizados nos laboratórios da FEM-UNICAMP são apresentados na Tab. (4).

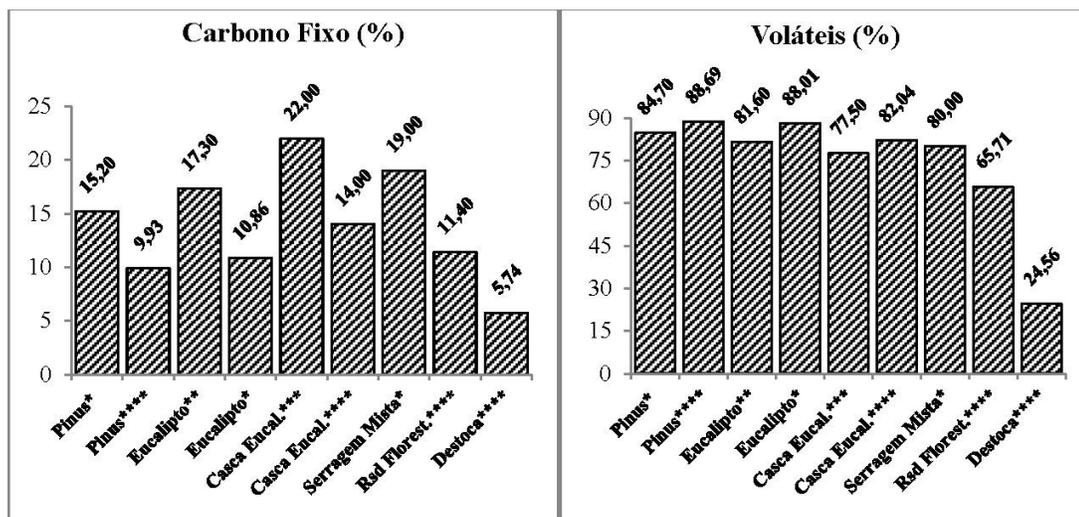
Tabela 4: Valores para ensaios de análise imediata*

Análise	Combustível				
	Pinus	Serragem Eucaliptus	Casca de Eucaliptus	Resíduos Reflorest. Eucaliptus	Resíduos de Destoca
Umidade (B.U.%)	8,62 ± 0,58	26,28 ± 4,03	8,78 ± 0,04	7,26 ± 0,53	10,56 ± 1,00
Análise Imediata (B.S. %)					
Carbono Fixo	9,93 ± 0,69	10,86 ± 12,05	14,00 ± 0,33	11,40 ± 1,16	5,74 ± 0,24
Voláteis	88,69 ± 0,66	88,01 ± 1,82	82,04 ± 0,66	65,71 ± 4,77	24,56 ± 0,69
Cinzas	0,38 ± 0,66	1,13 ± 0,13	3,96 ± 0,34	22,90 ± 5,92	69,70 ± 0,85

*: Testes Realizados no Laboratório DETF Unicamp

Os valores apresentados na literatura demonstram a validade dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório da Unicamp.

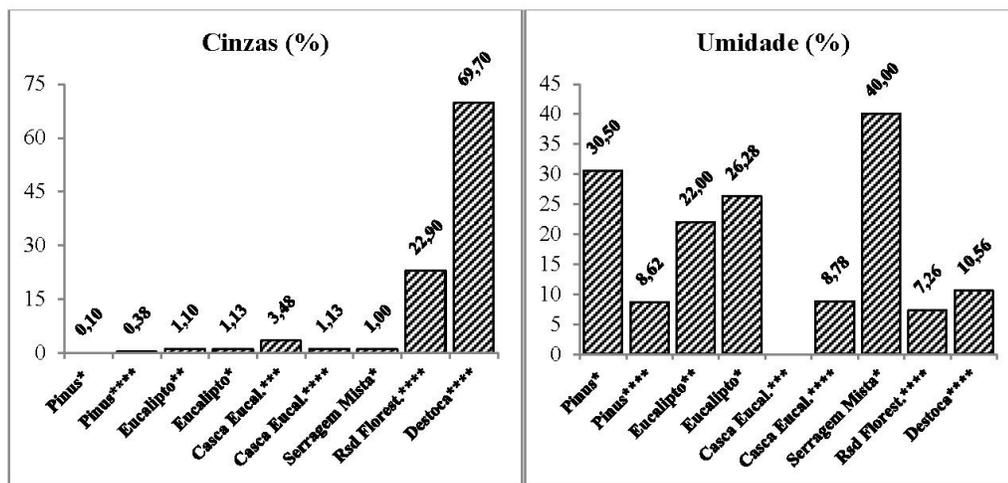
Em comparação com as demais biomassas, observa-se um alto teor de cinzas nos resíduos de destoca, e em função desta ocorrência tem-se a redução do teor de voláteis desse combustível, esses valores são encontrados devido ao processo de destocagem, pois no momento em que as raízes são retiradas, muito solo fica retido junto as mesmas. Um tratamento de limpeza desse material seria útil para elevação dos valores das características mais importantes à destinação energética. É observado que a casca de eucalipto apresenta o maior teor de carbono fixo, enquanto que a destoca o menor. Em termos de voláteis, os melhores resultados são para serragens de pinus (88,69%) e eucalipto (88,01%) carbono fixo e voláteis pode ser visualizada na Fig. (1).



Fonte: * - Miller & Tillman, 2008; ** - Jenkins, 1990; *** - Brito & Barrichello, 1978; **** - Testes Fem Unicamp

Figura 1. Comparativo de Carbono Fixo e Voláteis

Na Figura (2) é apresentado um comparativo de resultados para cinzas e umidade das biomassas analisadas e das informações de literatura.



Fonte: * - Miller & Tillman, 2008; ** - Jenkins, 1990; *** - Brito & Barrichello, 1978; **** - Testes Fem Unicamp

Figura 2. Comparativo de Cinzas e de Umidade

O alto teor de cinzas na destoca pode ser atribuído a grande quantidade de solo que é retirado junto com a biomassa. O maior valor de umidade é apresentado para a serragem mista, 40% (Miller & Tilmann, 2008) não foi comentado o motivo desde valor elevado.

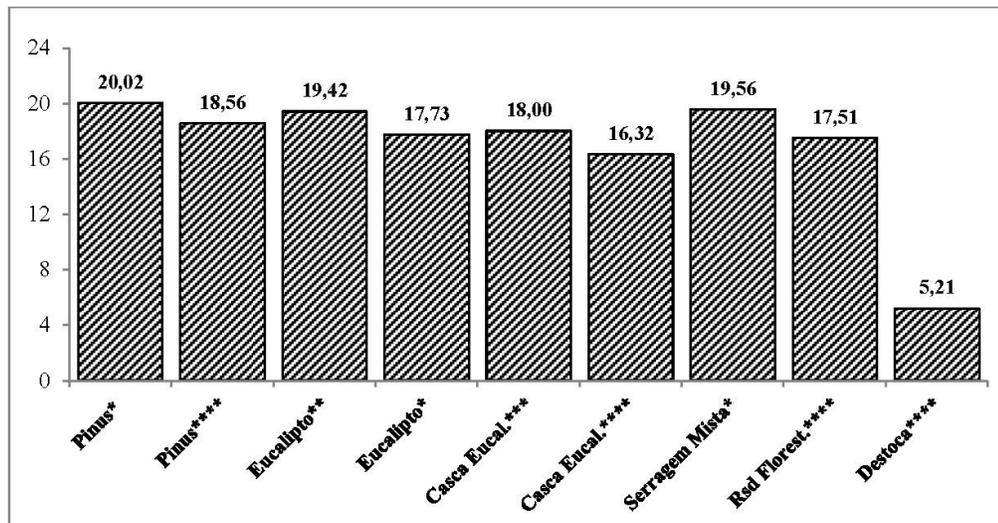
Na Tabela (4) apresentam-se os resultados dos ensaios de análises elementares e poder calorífico das biomassas estudadas.

Tabela 4: Valores para ensaios de análise elementar¹ e poder calorífico²

Análise	Combustível				
	Pinus	Serragem Eucaliptus	Casca de Eucaliptus	Resíduos Reflorest. Eucaliptus	Resíduos de Destoca
Análise Elementar (% B.S. e com cinzas)¹					
Carbono	47,81	32,29	51,20	32,29	27,67
Hidrogênio	6,44	4,52	6,00	4,52	3,94
Nitrogênio	0,13	0,77	0,40	0,77	0,55
Poder Calorífico Superior (B.S.)²					
MJ/kg	18,56	17,73	16,32	17,51	5,21

Fonte: 1- Testes Central Analítica IQ-USP; 2 - Testes em Bomba Calorimétrica

Na Figura (3) está um comparativo entre as análises realizadas e os valores encontrados na literatura para poder calorífico superior. Os valores são próximos e validam os ensaios realizados. Ainda é possível afirmar que um estudo preliminar baseado nos dados da literatura satisfaz o dimensionamento prévio para um projeto de utilização dessas biomassas.



Fonte: * - Miller & Tillman, 2008; ** - Jenkins, 1990; *** - Brito & Barrichello, 1978; **** - Testes Fem Unicamp

Figura 3: Comparação do Poder Calorífico Superior [MJ/kg]

Os valores de poder calorífico apresentados para as biomassas são muito próximos ao da lenha de eucalipto, com exceção da destoca, que por apresentar o maior teor de cinzas dentre as biomassas estudadas, apresenta significativa redução no valor do poder calorífico.

3.1. Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que há um grande potencial a ser explorado nos resíduos apresentados e que não são destinados à geração de energia. Devido seu alto Poder Calorífico Superior, com valores entre 16,32MJ/kg (Casca de Eucalipto) e 18,56MJ/kg (Pinus), poderão apresentar bom desempenho energético nas diversas aplicações de conversão termoquímicas existentes, com exceção da destoca, que apresentou valor de apenas 5,21MJ/kg devido ao alto teor de cinzas (69,70%). As rotas da pirólise e gaseificação apresentam a vantagem de mitigar os impactos ambientais e permitem uma conversão dos resíduos em syngas ou bio-óleo para queima em co-firing com o combustível primário das caldeiras. É sabido que as empresas de papel e celulose operam com caldeiras para biomassas, possibilitando o uso direto das biomassas estudadas em co-firing com o combustível primário.

4. AGRADECIMENTOS

Agradecemos CNPq e a CAPES pelo aporte financeiro a este trabalho e à Suzano Papel e Celulose S.A. pelas informações fornecidas e doações da matéria-prima para as análises.

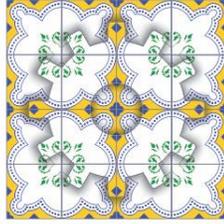
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM E711-87: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter, 8 p. 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM E871-82: Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels, 2 p., 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM E872: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels, 3 p., 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM E1534: Standard Test Method for Determination of Ash Content of Particulate Wood Fuels, 2 p., 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM D1102-84: Standard Test Method for Ash in Wood, 2 p. 2007.
- BRACELPA, 2012, <http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/booklet.pdf> consultado em 14/Fev/2012
- Brito, J. O., 2007, "O uso energético da madeira" Estudos Avançados 21 (59)
<http://www.inee.org.br/down_loads/eventos/JoseBrito%20ESALQ.pdf>. Acesso em 10 de fevereiro de 2012.

- Brito, J. O. & Barrichelo, L. E. G., 1978, "Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca", *Scientia Florestalis* n.16, p.63-70, Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, Piracicaba, Brazil
- Conpacel, Central de Compostagem http://www.fiesp.com.br/arquivos/2009/premio_merito/conpacel.pdf >. Acesso em 12 de dezembro de 2012;
- D.O.U. (Diário Oficial da União); "Lei 12.305/2010 (lei ordinária)"; D.O.U. de 03 de agosto de 2010.; p.2
- Hüebelin, H. J., 2001, "Modelo para a aplicação da metodologia Zeri. Sistema de aproveitamento integral da biomassa de árvores de reflorestamento" Master dissertation. CEFET/PR. Curitiba, Brazil, 139p.
- < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm >. Acesso em 15 de fevereiro de 2010.
- Jenkins, B. M., 1990 "Fuel properties for biomass materials, International Symposium on Application of Energy in Agriculture: The Role of Biomass Fuels, preprint, Delhi, Índia, 1990.
- Mendeleev, D.I., 1949 *Sochineniya* (Collection of Works), Moscow: Akad. Nauk SSSR, vol. 15.
- Miller, B. G. and Tillman, D. A., 2008, "Combustion Engineering Issues for Solid Fuels" Elsevier, San Diego, USA, 502 p.
- Nogueira, L. A. H and Lora, E. E. S. 2003, "Dendroenergia: fundamentos e aplicações" 2ª. Edição, Ed. Interciência, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 21-110
- Rowell, R. M.; Pettersen, R.; HAN, J.S.; Rowell, J. S.; Tshabalala, M. A., 2005, "Cell Wall Chemistry" Chapter 03 Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites.. Editora Taylor & Francis Group. New York, USA.
- Sánchez, C. G.; 1994; "Estudo da volatilização e da gaseificação de biomassas em leito fluidizado" PhD, thesis, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, Brazil 144 p.
- Sánchez, C. G. (org.) 2010, "Tecnologia da gaseificação de biomassa" Ed. Átomo, Campinas, Brasil, pp.49 – 137, 189 – 214

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores, João Paulo Vissotto, Alexandre Wittier Mazzone, Renato Cruz Neves, Elisabete Maria Saraiva Sánchez e Caio Glauco Sánchez são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



Characterization of *Pinus*, *Eucalyptus*, *Eucalyptus* peel and forest residues for energy purposes

João Paulo Vissotto, vissotto@fem.unicamp.br¹

Alexandre Wittier Mazzonetto, awmazzonetto@fem.unicamp.br, awmazzonetto@faap.br²

Renato Cruz Neves, renatocruz@fem.unicamp.br¹

Elisabete Maria Saraiva Sanchez, bete@fem.unicamp.br³

Caio Glauco Sánchez, caio@fem.unicamp.br⁴

¹ Faculty of Mechanical Engineering – Department of Thermal and Fluids Engineering – DETF/FEM/UNICAMP – MSc student, Mendeleev Street, 200, University City "Zeferino Vaz", Barão Geraldo - Campinas - SP CEP 13083-970

² Faculty of Mechanical Engineering – Department of Thermal and Fluids Engineering - DETF / FEM / UNICAMP - PhD student, Mendeleev Street, 200, University City "Zeferino Vaz", Barão Geraldo - Campinas - SP CEP 13083-970, FAAP - Engineering - Professor, Alagoas Street, 903, Building - 4, CEP: 01242-902

³ Faculty of Mechanical Engineering - Department of Thermal and Fluids Engineering - DETF / FEM / UNICAMP - Researcher Dr.; Laboratory for Characterization of Waste and Biomass, Mendeleev Street, 200, University City "Zeferino Vaz", Barão Geraldo - Campinas - SP CEP 13083-970.

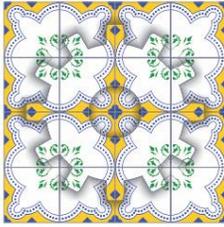
⁴ Faculty of Mechanical Engineering - Department of Thermal and Fluids Engineering - DETF / FEM / UNICAMP - Associate Professor, Mendeleev Street, 200, University City "Zeferino Vaz", Barão Geraldo - Campinas – SP, CEP 13083-970.

Abstract. *The production sector of pulp and paper moves interesting numbers in Brazil, more than 115,000 direct and 575,000 indirect jobs, 222 companies in 539 cities in 18 states, 2.2 million hectares of planted forests for industrial purposes, represents more than 3 % of Brazilian exports (in 2010) and paper production in 2011 totalized 9.8 million tons. It is a booming industry, with high energy demand and a lot of waste. The importance of the sector, their numbers and their great demand for high energy motivated this research. This paper presents the results of the characterization of the sawdust of Pinus and Eucalyptus, Eucalyptus Peel and Forest Residues for energy purposes, therefore, it was determined the higher heater value (HHV), elemental composition (C, H, N), moisture, volatile matter, ash and fixed carbon. The biomasses are from the region of Limeira, Americana and Piracicaba. The result demonstrates the potential energy of a material which has been left in the field (forest waste) or brought to the production of compost (sawdust, peel). The HHV of Pinus (18.56MJ/kg) and Eucalyptus (17.73MJ/kg) shows the potential for power generation and a renewable source to meet the growing demand for energy sector. The complete characterization allows defining the best technological route for application of the potential energy of the material, which so far has been neglected. So, sawdust can be used in co-gasification for syngas production and the syngas used in co-firing with the original fuel in boilers.*

Keywords: *Biomass, forest residues, calorific value, renewable energy*

1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors João Paulo Vissotto e Alexandre Wittier Mazzonetto, Renato Cruz Neves, Elisabete Maria Saraiva Sánchez and Caio Glauco Sánchez are the only responsible for the printed material included in this paper.



Caracterização de resíduos de poda, capina e serragem urbana para geração de energia

Alexandre Witier Mazzonetto, awmazzonetto@fem.unicamp.br¹

João Paulo Vissotto, vissotto@fem.unicamp.br²

Renato Cruz Neves, renatocruz@fem.unicamp.br²

Elisabete Maria Saraiva Sanchez, bete@fem.unicamp.br³

Caio Glauco Sánchez, caio@fem.unicamp.br⁴

¹ Faculdade de Engenharia Mecânica – Dpto Engenharia Térmica e de Fluidos – DETF/FEM/UNICAMP – doutorando, Rua Mendeleiev, 200; Cidade Universitária "Zeferino Vaz"; Br. Geraldo - Campinas - SP CEP 13083,-970; FAAP – Engenharia – Professor, Rua Alagoas, 903 – Prédio – 4 CEP: 01242- 902 awmazzonetto@faap.br

² Faculdade de Engenharia Mecânica – Dpto Engenharia Térmica e de Fluidos – DETF/FEM/UNICAMP – aluno de Mestrado, Rua Mendeleiev, 200; Cidade Universitária "Zeferino Vaz"; Barão Geraldo - Campinas - SP CEP 13083,-970

³ Faculdade de Engenharia Mecânica – Dpto Engenharia Térmica e de Fluidos – DETF/FEM/UNICAMP – Dra. Pesquisadora Lab. Caract. de Resíduos e Biomassas, Rua Mendeleiev, 200; Cidade Universitária "Zeferino Vaz"; Barão Geraldo - Campinas - SP CEP 13083,-970

⁴ Faculdade de Engenharia Mecânica – Dpto Engenharia Térmica e de Fluidos – DETF/FEM/UNICAMP – Professor Associado, Rua Mendeleiev, 200; Cidade Universitária "Zeferino Vaz"; Barão Geraldo - Campinas - SP CEP 13083,-970

Resumo: Este trabalho tem como objetivo levantar e caracterizar o potencial energético de resíduos de poda, capina e serragens urbanos de Piracicaba-SP, uma vez que a sociedade tem buscado fontes de energia renováveis e uma melhor destinação para resíduos urbanos. Atualmente esses resíduos são destinados à compostagem, processo que leva 60 dias e necessita de uma área grande para movimentar o material a fim de aerá-lo. Esses resíduos podem contribuir para geração de energia renovável, principalmente no período de estiagem. A caracterização foi feita através de análises de poder calorífico superior (PCS), composição elementar (C,H,N), umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo. A caracterização fornece subsídios para tomar a decisão pela rota mais adequada e eficiente, além de demonstrar o potencial energético disponível nas cidades. A serragem de Garapeira e Peroba (mistura das duas madeiras) rica em Carbono (46,89%) e PCS de 19,07 MJ/kg é uma matéria prima pronta para ser utilizada num gaseificador e produzir gás de síntese (syngas), podendo alimentar um motogerador nas serrarias, diminuindo o consumo da rede. Os resíduos de poda e capina podem ser usados misturados tanto para uso em caldeiras para biomassa, como cogaseificados, porém precisa de ajuste na granulometria, além de apresentar variação no poder calorífico, na porcentagem de Carbono e Hidrogênio, e na umidade devido a grande variedade de árvores e gramíneas cultivadas nos parques, praças, avenidas e ruas de Piracicaba. Os resultados possibilitam reconsiderar as atuais destinações desses resíduos urbanos e decidir a melhor tecnologia a ser usada para gerar energia renovável, tais como caldeira para geração de vapor e cogeração de eletricidade, gaseificação e motogerador ou pirólise e motogerador.

Palavras-chave: Biomassa, resíduos de poda, serragem, energia renovável

1. INTRODUÇÃO

Desde o início deste século buscam-se novas fontes de energia, que diminuam o impacto ambiental e a dependência de fontes fósseis. Para mitigar os impactos ambientais é importante usar matérias primas consideradas como resíduos. Além da preocupação ambiental, há a preocupação com o suprimento de energia para atender a demanda crescente nos municípios e os constantes riscos de “apagões”, ocasionados pelas inconstâncias das chuvas (e conseqüentes variações da oferta de energia geradas por hidrelétricas).

A madeira sempre foi uma grande fonte de energia para a humanidade e continua sendo, como lenha ou carvão, é usada amplamente para cocção de alimento (churrascarias, pizzarias, padarias), em secadores industriais, caldeiras,

etc. A proposta de usar-se madeira como fonte de energia não é nova, mas a idéia de destinação dos resíduos da poda, capina e serragem urbana para geração de energia é algo incomum.

De acordo com a Constituição Federal Brasileira, Artigo 30, incisos I e V, os governos municipais têm a responsabilidade da gestão dos resíduos urbanos de origem nos domicílios domésticos, comerciais e industriais de pequeno porte, além dos resíduos coletados nos espaços públicos, o chamado lixo público. Dessa forma, a realização da poda e destinação dos resíduos é de inteira responsabilidade dos municípios, sendo que as distribuidoras de energia cooperam no que diz respeito, para que não haja interrupção da prestação de serviço. (Cortez, 2011)

O Município de Piracicaba, com uma população de 364.872 (IBGE, 2010), gera por semana 100 toneladas de resíduo de capina e aproximadamente 25 toneladas de resíduos de podas de árvores, segundo a SEDEMA (Secretaria Municipal de Defesa ao Meio Ambiente). Essas biomassas são destinadas à compostagem em Piracicaba, atualmente, processo que demora até 60 dias para estabilizar a matéria orgânica sob aeração, e então poder ser aplicada no solo como adubo orgânico. Em muitos municípios brasileiros os resíduos de poda e capina urbana são destinados a aterros ou lixões, contribuindo para a produção de metano (gás de efeito estufa), contaminando o solo e os lençóis freáticos.

A observação de um vasta quantidade de biomassa disponível e a possibilidade de gerar energia renovável motivaram essa pesquisa, a fim de se avaliar o potencial energético disponível e não utilizado. As biomassas (resíduo de poda, capina, destoca e serragem) foram analisadas e caracterizadas para se avaliar a existência de outras possibilidades diferentes que a destinação atual.

De acordo com Sánchez *et al.* (2010), a caracterização da biomassa deve ser baseada em seu uso, trazendo elementos para a compreensão das propriedades determinantes e singulares a cada aplicação. O emprego da biomassa com fins energéticos requer um pleno conhecimento das propriedades físicas e químicas do combustível.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para Silva Filho (2006), a arborização urbana atua sobre o conforto humano no ambiente, por meio das características naturais das árvores, proporciona sombra para os pedestres e veículos, reduz a poluição sonora, melhora a qualidade do ar, diminui a amplitude térmica, proporciona abrigo para pássaros e harmonia estética, o que ameniza a diferença entre a escala humana e outros componentes arquitetônicos como prédios, muros e grandes avenidas.

De acordo com Meira (2010), a prática da poda foi trazida ao Brasil pelos imigrantes europeus, exclusivamente para as árvores frutíferas (pereiras, macieiras, pessegueiros etc.), visando a uma maior e melhor produção de frutos. A poda é realizada basicamente com quatro finalidades no meio urbano:

- formação: os ramos laterais são retirados até uma altura recomendada de 1,80m, visando não prejudicar o trânsito de pedestres e veículos sob a copa. Esta poda, normalmente, no local definitivo, quando a muda plantada é menor do que a recomendada;
- limpeza: eliminam-se os ramos velhos, em excesso, mortos, lascados, doentes ou praguejados;
- contenção: é realizada com o objetivo de adequar a copa da árvore ao espaço físico disponível, em função de um plantio inadequado. A recomendação geral é manter um mínimo de 30% da copa, conservando-se, sempre que possível, o formato original;
- emergencial: é feita para remover as partes da árvore que ameaçam a segurança da população, das edificações e outras instalações, como as redes elétricas e telefônicas aéreas.

Segundo Ninni (2010), As cidades brasileiras guardam um tesouro pouco explorado em suas ruas, avenidas e parques: as árvores. Estima-se que só na capital paulista sejam recolhidas mais de quatro mil toneladas de resíduos de podas de árvores por mês. Aprovada em 2008, uma lei municipal ainda não regulamentada começa a fazer com que as subprefeituras tomem atitudes para reutilizar esses resíduos, até então enviados para aterros sanitários.

Para Meira (2010), a maioria dos municípios brasileiros não tem, em seus planos urbanos, um sistema adequado de gerenciamento dos resíduos gerados pelas práticas silviculturais aplicadas às árvores plantadas. Não há estimativa da geração diária de resíduos de poda urbana para os municípios do Brasil, mas se sabe que a maioria deles é destinada a terrenos baldios, lixões ou utilizados como lenha. Em alguns casos, eles são encaminhados para os serviços de compostagem. No entanto, essas são ações isoladas e desarticuladas, nem sempre suficientes para dar uma destinação adequada a todos os resíduos da arborização. Além disso, não há investimentos na infraestrutura e na valorização desses resíduos, e nem mesmo um modelo logístico para sua coleta, processamento e distribuição dos produtos.

De acordo com Gurgel (2003), o termo grama é bastante genérico, podendo abranger os mais diversos significados, incluindo um enorme número de espécies de plantas. Ao tentar-se entender o que é grama, pode-se pensar em: uma pastagem, um capim, uma erva, um relvado, um gramado, e muitos outros termos e definições. Entretanto, a palavra GRAMA, tem sua origem na denominação de uma Família botânica que engloba inúmeras espécies. É a Família das Gramíneas (Gramineae); Divisão: Angiospermae; Classe: Monocotyledoneae; Ordem: Graminales; Família: Gramineae. As Gramíneas possuem mais de 10.000 espécies dispersas pelo mundo. As mais importantes servem como alimentação humana, como o arroz e o trigo, ou como alimentação animal como as brachiarias, havendo outras que são usadas até em construções, como os bambus.

2.1. Biomassa

Segundo Cortez *et al.* (2008), a biomassa tem origem em resíduos sólidos urbanos (animais, vegetais, industriais e florestais) e, voltada para fins energéticos, abrange a utilização desses vários resíduos para geração de energia alternativa. A biomassa pode ser obtida de vegetais não-lenhosos e de vegetais lenhosos, como é o caso da madeira e seus resíduos, agrícolas, urbanos e industriais.

Para Omachi *et al.* (2004), biomassa é todo material orgânico, não fóssil, que tenha conteúdo de energia química no seu interior, o que inclui todas as vegetações aquáticas ou terrestres, árvores, biomassa virgem, lixo orgânico, resíduos de agricultura, esterco de animais e outros tipos de restos industriais.

A Tabela (1) demonstra com os resultados apresentados por Miller & Tillman (2008) para resíduos de madeira urbana, que englobam serragens, madeiras de demolição, caixas e pellets de madeira descartadas.

Tabela 1. Composição Imediata, Elementar e Poder Calorífico.

<i>Resíduo de madeira Urbana</i>			
<i>Composição Imediata</i>		<i>Composição Elementar (B. S. %)</i>	
Carbono Fixo (B. S. %)	18,10	Carbono	48,00
Voláteis (B. S. %)	76,00	Hidrogênio	5,50
Cinzas (B. S. %)	5,90	Nitrogênio	1,40
Umidade (B. U. %)	30,80	Oxigênio	39,10
<i>Poder Calorífico (B. S.)</i>	MJ/kg	18,28	

Fonte: Miller, 2008.

A Tabela (2) apresenta os resultados encontrados por Fernandes (2000), analisando uma gramínea – Capim Elefante - foi o parâmetro mais próximo das gramíneas ornamentais analisadas e que foi encontrado na bibliografia.

Tabela 2. Valores encontrados por Fernandes (2000) para Composição Imediata, Elementar e Poder Calorífico de Capim Elefante.

<i>Capim Elefante</i>			
<i>Composição Imediata</i>		<i>Composição Elementar (B. S. %)</i>	
Carbono Fixo (B. S. %)	8,40	Carbono	40,60
Voláteis (B. S. %)	82,60	Hidrogênio	5,90
Cinzas (B. S. %)	10,90	Nitrogênio	1,50
Umidade (B. U. %)	10,80	Oxigênio	52,00
<i>Poder Calorífico Superior</i>	MJ/kg	14,60	
<i>Poder Calorífico Inferior</i>	MJ/kg	13,40	

2.2. Tecnologias

As possíveis tecnologias para conversão dessas biomassas residuais em energia são os processos termoquímicos: Combustão, Pirólise e Gaseificação. A combustão direta destas biomassas pode ser realizada em unidades geradoras de vapor, que devem ser construídas ou adaptadas para receber esse combustível de forma a obter um melhor aproveitamento da energia liberada pela queima desse tipo de combustível em co-firing com o combustível primário, obtendo temperaturas no interior da câmara de combustão variam na faixa de 900° a 1400°C (Bazzo, 1995). Outra possível utilização é a conversão dos mesmos em combustível líquido ou gasoso, a conversão em combustível líquido se dá através do processo de pirólise que produz a partir do resíduo, um bio-óleo e gases combustíveis de baixo poder calorífico, também podem ser utilizado em co-firing com o combustível primário da unidade de geração de vapor. A gaseificação é a conversão de combustível ou resíduo sólido em combustível gasoso, com uma reação em atmosfera redutora, composto basicamente de metano, monóxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio e traços de hidrocarbonetos leves (Sánchez, 2010).

3. Metodologia

O local do estudo foi Piracicaba, município do interior do estado de São Paulo, localizada a 22°43'31" de latitude sul e a 47°38'57" de longitude oeste. A cidade é um importante pólo regional de desenvolvimento industrial e agrícola, estando situado em uma das regiões mais industrializadas e produtivas de todo o estado de São Paulo. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística a população da cidade era de 364.872, em 2010.

Segundo Sánchez (1994) estudos sobre a conversão termoquímica de biomassas em energia necessita de quatro classes de informações: Granulometria, Análise Imediata, Análise Elementar e Poder Calorífico. A granulometria fornece as frações de peso em cada dimensão característica que compõem a biomassa, sendo importante para o dimensionamento do alimentador do reator e para do sistema de fluidização, temas que não serão tratados nesse artigo. De acordo com Sánchez *et al.* (2010), a análise imediata fornece as frações, em peso, de umidade, voláteis,

cinzas e carbono fixo de uma amostra de biomassa. A primeira análise a ser feita é a umidade, é determinada pelo método do forno de secagem.

3.1 Análise Imediata

3.1.1 Análise de Umidade

A determinação de umidade é a primeira análise a ser realizada e demonstra a aplicabilidade do material em processos termoquímico, onde biomassas com umidade superior a 50% têm restrições quanto ao uso termoquímico, para a sua determinação foi seguido o roteiro da norma: “E1756 – 08 Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass”. Esta norma se aplica a: materiais herbáceos (grama e capim), resíduos agrícolas (como palha de milho, palha de trigo, e bagaço), lixo (resíduos de escritório, de papel e de jornal), biomassa pré-tratada alcalina e sólido de resíduos da fermentação. O cálculo do percentual de umidade é dado por:

$$\% \text{ sólidos} = \left[\frac{(P_f - P_c)}{(P_i - P_c)} \right] \times 100$$

$$\% \text{ umidade} = 100\% - \% \text{ sólidos}$$

Onde:

Pi = Peso inicial da massa úmida com o cadinho tampado;
 Pf = Peso final da amostra seca e estabilizada com o cadinho tampado;
 Pc = Peso do cadinho vazio e tampado.

3.1.2 Voláteis

A determinação da fração volátil é importante para a previsão do comprimento da chama a ser gerada pelo combustível sólido, pois durante a devolatilização há o desprendimento de gases combustíveis formados durante a elevação da temperatura da biomassa. Seu conhecimento auxilia, por exemplo, no dimensionamento do volume de uma fornalha e fornece conhecimento sobre a dinâmica da chama formada durante a oxidação ou redução da biomassa. A parte volátil do combustível é formada praticamente de metano, monóxido de carbono e hidrogênio, além de gases não combustíveis, oxigênio e nitrogênio.

A determinação de voláteis em resíduos de madeiras segue roteiro adaptado da norma “ASTM- E872 – 82 Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels” e aplica-se aos mesmos combustíveis da norma anterior. Este método de teste determina a porcentagem de produtos gasosos, exclusivo de vapor de umidade, na amostra de análise de combustível de partículas de madeira que é liberado nas condições específicas do teste.

O cálculo do percentual de voláteis é dado por:

$$\% \text{ voláteis} = A - B$$

$$A = \left[\frac{(P_i - P_f)}{(P_i - P_c)} \right] \times 100$$

Onde:

Pi = Peso inicial da massa desumidificada na análise de umidade e com o cadinho tampado;
 Pf = Peso final da amostra volatilizada com o cadinho tampado;
 Pc = Peso do cadinho vazio e tampado.
 B = Valor % de umidade calculado na norma E871 – 82

3.1.3 Análise de Cinzas

As cinzas são o material residual da oxidação completa do combustível sólido, composta basicamente por constituintes inorgânicos, ou seja, todos os constituintes minerais do combustível e dependendo do combustível original poderá ter a destinação como insumo agrícola. Esses minerais são apresentados na forma de óxidos, como por exemplo Óxido de alumínio (Al₂O₃); Óxido férrico (Fe₂O₃); Óxido de silício (SiO₂); Óxido de Potássio (K₂O); Óxido de Cálcio (CaO); Óxido de Magnésio (MgO); etc. A determinação de cinzas segue roteiro da norma “ASTM E1755 – 01 Standard Test Method for Ash in Biomass”. Esta norma se aplica a biomassa em geral, materiais herbáceos (grama e capim), resíduos agrícolas (como palha de milho, palha de trigo, e bagaço), lixo (resíduos de escritório, de papel e de jornal), biomassa pré-tratada alcalina, e sólido de resíduos da fermentação, e lodos de esgotos.

O cálculo do percentual de cinzas é dado por:

$$\% \text{ cinzas} = \left[\frac{(P_z - P_c)}{(P_i - P_c)} \right] \times 100$$

Onde:

Pc = Peso do cadinho vazio e tampado;

Pi = Peso inicial da massa volatilizada com o cadinho tampado;

Pz = Peso do cadinho tampado com as cinzas;

3.1.4 Determinação do Carbono Fixo

A determinação do carbono fixo é feita por diferença entre a soma dos teores (%) de umidade, matéria volátil e cinzas e 100%.

$$\% \text{ carbono fixo} = 100\% - \% \text{ umidade} - \% \text{ voláteis} - \% \text{ cinzas}$$

3.1.5 Determinação do Poder Calorífico

O poder calorífico de combustíveis sólidos pode ser determinado através de ensaio de bomba calorimétrica e segue a norma ASTM E711-87 (2004), também pode ser calculado através de equações empíricas quando não se tem disponibilidade de realização de ensaio e desde que conhecida a composição elementar do combustível. A bomba calorimétrica (Sánchez, 1994) é utilizada para medir o calor liberado durante a combustão do combustível em atmosfera oxigenada. Essa técnica determina o poder calorífico superior a volume constante.

3.1.6 Análise Elementar

A análise elementar nos fornece os teores de elementos orgânicos, o ensaio é destrutivo e a análise realizada com os gases provenientes da pirólise da amostra. Neste trabalho, os resultados das análises elementares foram obtidos através do equipamento Perkin Elmer CHN-2400, com precisão $\leq 0,2\%$, realizadas na Central Analítica do Instituto de Química da USP.

4. Resultados e discussões

A Tabela (3) apresenta os resultados de Análise Imediata e Tabela (4) os resultados de Análise Elementar e do Poder Calorífico realizado nas biomassas investigadas com o desvio padrão dos valores obtidos.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de Análise Imediata

Composição Imediata	Biomassa		
	Capina Urbana e Rodoviária	Serragem Urbana (garapeira e Peroba)	Resíduo de Poda Urbana
Umidade (B. U. %)	63,66 ± 0,46	11,85 ± 2,38	60,30 ± 1,41
Carbono Fixo (B. S. %)	6,78 ± 0,62	9,00 ± 0,69	11,17 ± 1,06
Voláteis (B. S. %)	86,42 ± 0,62	84,05 ± 0,44	82,37 ± 1,10
Cinzas (B. S. %)	6,80 ± 0,09	6,95 ± 0,82	6,46 ± 0,43

Tabela 4. Resultados dos ensaios de Análise Elementar e Poder Calorífico

Composição elementar (B. S. e com cinzas (%))	Biomassa		
	Capina Urbana e Rodoviária	Serragem Urbana (garapeira e Peroba)	Resíduo de Poda Urbana
Carbono	41,70	42,87	42,73
Hidrogênio	5,90	5,67	5,86
Nitrogênio	1,15	0,38	1,34
Poder Calorífico Superior (B. S.) (MJ/kg)	17,80	19,07	18,47

Na Figura (1) é possível uma visualização da diferença entre os valores de cada análise realizada no Laboratório da FEM-UNICAMP quando comparados com as análises apresentadas na literatura para os teores de carbono fixo e voláteis. Como é possível observar na Fig. (1), o teor de Carbono Fixo é superior para Resíduo de Poda Urbana seguido da Serragem Urbana. No caso de voláteis a Serragem de Garapeira e Peroba apresentou o maior percentual. A variação de teor de voláteis entre todas as biomassas foi menor do que 10%. Conforme visualizado,

observa-se altos valores de teor de voláteis para todas as biomassas, portanto são biomassas com condições de terem fácil ignição.

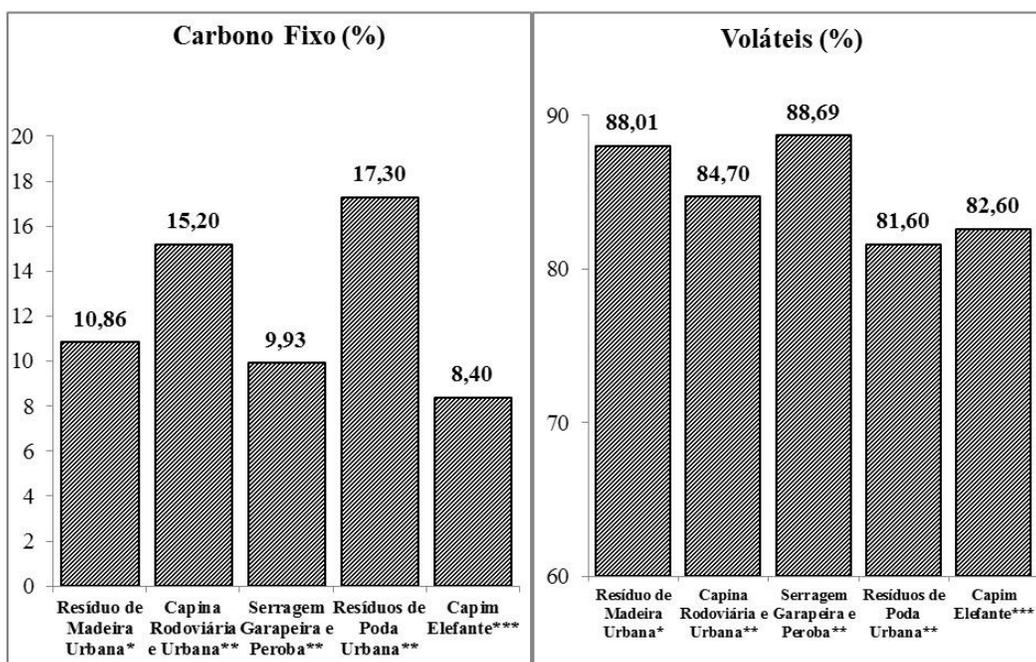


Figura 1. Resultados comparativos das biomassas analisadas

Fontes: *- Miller (2008); *- Testes FEM - UNICAMP; *** - Fernandes (2000).

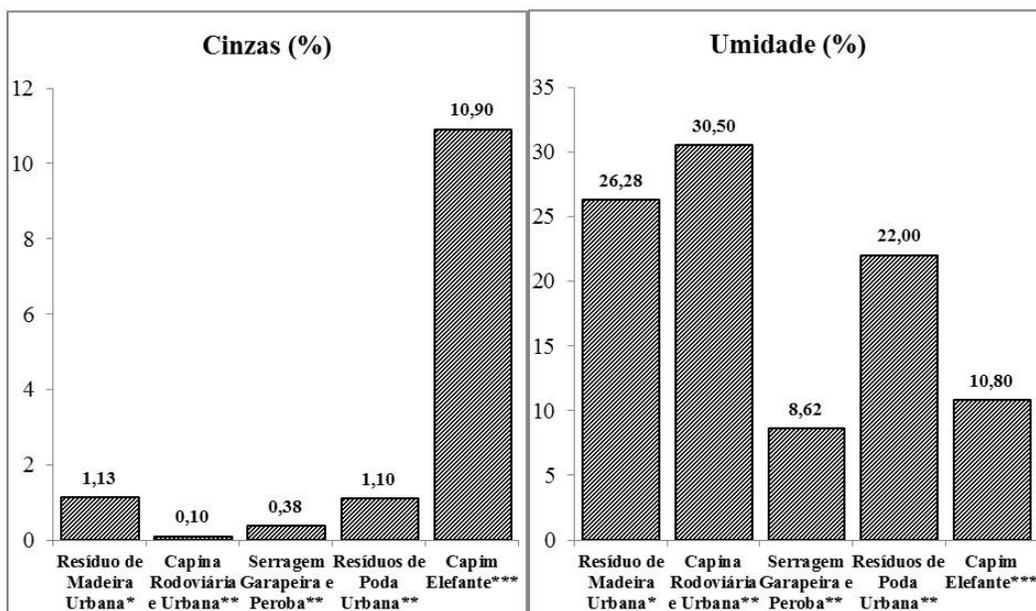


Figura 2. Comparação dos resultados de Cinzas e Umidade das biomassas analisadas com a bibliografia.

Fontes: 1- Miller (2008); 2 -Testes FEM - UNICAMP; 3- Fernandes (2000).

Na Figura (2) é observado o alto teor de cinzas encontrado no capim elefante, segundo Fernandes (2000). Devido a este fato recomenda-se que o reator não ultrapasse 900° C para não fundir as cinzas e aglomerar, levando o leito ao colapso. Como todas as capinas apresentam resultados bem inferiores no teor de cinzas, esse problema levantado por Fernandes pode não ocorrer para as biomassas investigadas. O Capim Elefante recebe uma adubação específica para produção visando fins energéticos, o que produz um teor de cinzas maior que o das gramíneas urbanas e rodoviárias.

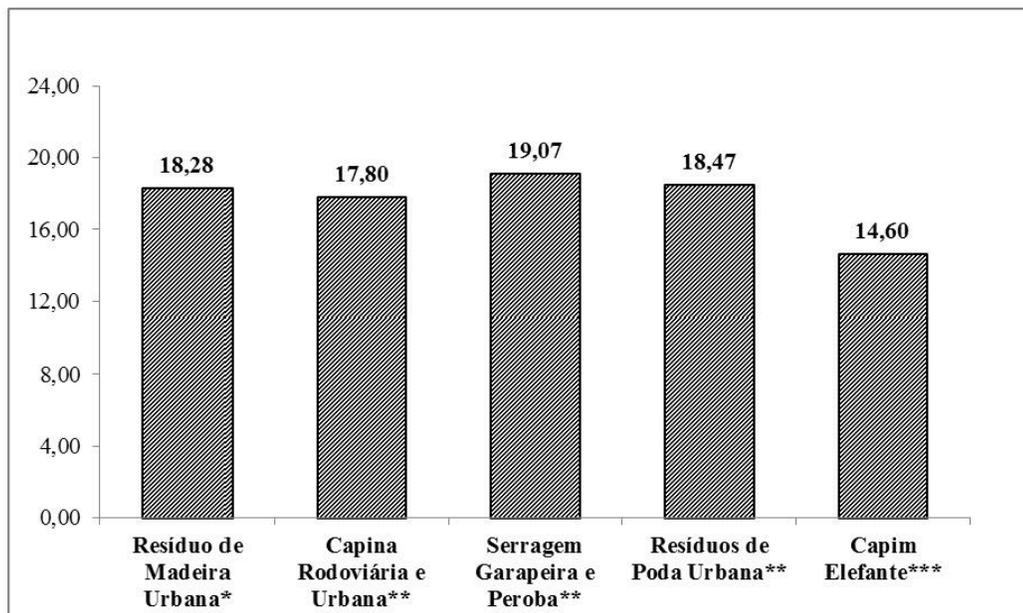


Figura 3. Comparação dos resultados de Poder Calorífico determinado em bomba calorimétrica [MJ/kg]. Fontes: * - Miller (2008); ** - Testes FEM-UNICAMP; *** - Fernandes (2000)

Na Figura (3) pode ser visualizada a pequena diferença entre os valores do poder calorífico superior das biomassas estudadas. Todos os valores são superiores ao do capim elefante, (Fernandes, 2000), e essa diferença pode ser atribuída ao maior teor de cinzas desta biomassa. Sendo assim, verifica-se que as biomassas possuem valores de poder calorífico que favorecem o emprego das mesmas em processos termoquímicos de conversão.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho mostra que há uma grande fonte de energia renovável disponível nas cidades brasileiras possível a uma destinação energética. As tecnologias existentes como pirólise e gaseificação permitem a construção de unidades pequenas e descentralizadas para essa geração de energia, além de serem tecnologias menos agressivas ao ambiente. Os valores do poder calorífico das biomassas são muito próximos ao valor da madeira combustível, justificando a continuação do estudo para determinação do rendimento do kW térmico e sua eficiência quando transformado em kW.h.

Há possibilidade de usar-se múltiplas tecnologias com as biomassas investigadas, pois apresentam boas condições para serem pirolisadas, gaseificadas ou usadas diretamente em caldeiras.

Deve-se considerar, ainda, que esta biomassa é perene e encontrada no mesmo lugar onde a demanda de energia é crescente. Assim sendo, é possível associar-se qualidade de vida (através de arborizações e parque públicos) com energia renovável.

6. AGRADECIMENTOS

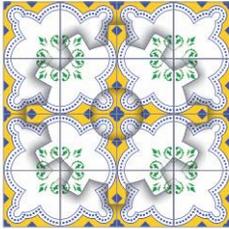
Agradecemos CNPq e a CAPES pelo apoio aos programas relacionados a este trabalho, e à Secretaria Municipal de Defesa do Meio Ambiente de Piracicaba pelas informações e doações da matéria-prima para as análises.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM E711-87: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter, 8 p. 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM E871-82: Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels, 2 p., 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM E872: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels, 3 p., 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM E1755 – 01 Standard Test Method for Ash in Biomass 3 p., 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM E1756 – 08 Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass 3 p. 2008.
- Bazzo, E., 1995, “Geração de Vapor” 2ª. Edição, Editora da UFSC, Florianópolis, Brazil, 216 p.
- Brito, J. O., 2007, “O uso energético da madeira” Estudos Avançados 21 (59) <http://www.inee.org.br/download/eventos/JoseBrito%20ESALQ.pdf>
- Cortez, C. L., 2011, “Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para geração de energia: estudo de caso AES Eletropaulo”, PhD, thesis, EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo, São Paulo, 246 p.
- Cortez, L. A. B., Lora, E.E. S and Gómez, E. O. (org), 2008, “Biomassa para energia” Ed. UNICAMP, Campinas, Brazil, 740 p.
- Fernandes, M. C., 2000, “Avaliação tecno-econômica da gaseificação do Capim-Elefante para eletrificação rural”, dissertation, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, Brazil, 77p.
- Gurgel, R. G. A., 2003, “PRINCIPAIS ESPÉCIES E VARIEDADES DE GRAMA” in *I SIGRA – Simpósio Sobre Gramados – “Produção, Implantação e Manutenção”* <http://www.infograma.com.br/Sigra%20I/PRINCIPAIS%20ESP%C3%89CIAS%20E%20VARIEDADES%20DE%20GRAMAS.pdf> consultado em 16/Fev/2012
- Instituto Brasileiro e Geografia e Estatística - IBGE, 2010, <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=353870> consultado em 17/fev/2012
- Meira, A. M. de, 2010, “Gestão de resíduos da arborização urbana” PhD, thesis, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ, Universidade de São Paulo – USP, Piracicaba, Brazil, 178p.
- Miller, B. G. and Tillman, D. A., 2008, “Combustion Engineering Issues for Solid Fuels” Elsevier, San Diego, United States of America, 502 p
- NINNI, K. Municípios buscam reciclar suas árvores. **O Estado de São Paulo**. São Paulo, 30 de junho de 2010 | 0h 00. <http://www.estadao.com.br/noticias/impreso,municipios-buscam-reciclar-suas-arvores,574014,0.htm> Consultado em 17/fev/2012.
- Nogueira, L. A. H and Lora, E. E. S., 2003, “Dendroenergia: fundamentos e aplicações” 2ª. Edição, Ed. Interciência, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 21-110
- Omachi, I. H.; Rodrigues, L. G.; Stolf, M.; Cannaval, R. and Sobreiro, R., 2004, “Produção de biomassa florestal para exportação: O caso da Amcel”. **Revista Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, jan./mar, Viçosa, P. 29-36
- Sánchez, C. G.; 1994; “Estudo da volatilização e da gaseificação de biomassas em leito fluidizado” PhD, thesis, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, Brazil 144 p.
- Sánchez, C. G. (org.), 2010, “Tecnologia da gaseificação de biomassa” Ed. Átomo, Campinas, Brazil, pp.49 – 137, 189 – 214
- Silva Filho, D. F., 2006, “Videografia Aérea Multiespectral em Silvicultura Urbana”. **Ambiência Guarapuava**, PR. Edição Especial, v.2 p. 55-68.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores, Alexandre Wittier Mazzonetto, João Paulo Vissotto, Renato Cruz Neves, Elisabete Maria Saraiva Sánchez e Caio Glauco Sánchez são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



Characterization of waste from pruning, weeding and urban sawdust for power generation

Alexandre Witier Mazzonetto, awmazzonetto@fem.unicamp.br, awmazzonetto@faap.br¹

João Paulo Vissotto, vissotto@fem.unicamp.br²

Renato Cruz Neves, renatocruz@fem.unicamp.br²

Elisabete Maria Saraiva Sanchez, bete@fem.unicamp.br³

Caio Glauco Sánchez, caio@fem.unicamp.br⁴

¹ Faculty of Mechanical Engineering – Department of Thermal and Fluids Engineering - DETF / FEM / UNICAMP - PhD student, Mendeleev Street, 200, University City "Zeferino Vaz", Barao Geraldo - Campinas - SP CEP 13083-970, FAAP - Engineering - Professor, Alagoas Street, 903, Building - 4, CEP: 01242-902

² Faculty of Mechanical Engineering – Department of Thermal and Fluids Engineering – DETF/FEM/UNICAMP - MSc student, Mendeleev Street, 200, University City "Zeferino Vaz", Barao Geraldo - Campinas - SP CEP 13083-970

³ Faculty of Mechanical Engineering - Department of Thermal and Fluids Engineering - DETF / FEM / UNICAMP - Researcher Dr.; Laboratory for Characterization of Waste and Biomass, Mendeleev Street, 200, University City "Zeferino Vaz", Barao Geraldo - Campinas - SP CEP 13083-970.

⁴ Faculty of Mechanical Engineering - Department of Thermal and Fluids Engineering - DETF / FEM / UNICAMP - Associate Professor, Mendeleev Street, 200, University City "Zeferino Vaz", Barao Geraldo - Campinas – SP, CEP 13083

Abstract. *This work aims to raise and characterize the potential energy of waste from pruning, weeding and sawdust of Piracicaba-SP, since the society has sought renewable energy sources and better destination for municipal waste. Currently, this waste is destined for composting, process that takes 60 days and requires a large area to mix the material to aerate it. These residues may contribute to renewable energy generation especially in drought. Thus, it is necessary to characterize it through analysis such as Higher Heating Value, ultimate analysis, moisture analysis, volatile matter, ash and fixed carbon.*

The characterization provides subsidies to make the decision by the route most appropriate and effective. Also demonstrate the potential energy available in the cities.

The sawdust of Garapeira and Peroba (a blend of the two woods) rich in carbon 46.89% and HHV of 19,07 MJ/kg is a ready raw material to be used in a gasifier and produce synthesis gas (syngas). It can power a motor-generator in a sawmill reducing the electrical consumption.

The residues of pruning and weeding (a blend of them) can be used in biomass boilers or co-gasifiers. But, this mixture need adjust on the size; there is variation in calorific value, percentage of carbon and hydrogen, and moisture due to large number of trees and grasses are cultivated in parks, squares, avenues and streets of Piracicaba.

The results enable us to reconsider the current allocations of municipal waste and decide the best technology to be used to generate renewable energy, such as boiler to generate steam and electricity cogeneration, gasification plus motor-generator or pyrolysis plus motor-generator.

Keywords: *Biomass, pruning residues, sawdust, renewable energy*

1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors Alexandre Wittier Mazzonetto, João Paulo Vissotto, Renato Cruz Neves, Elisabete Maria Saraiva Sánchez and Caio Glauco Sánchez are the only responsible for the printed material included in this paper.

Preliminary study of product gas reformation using plasma torch

*Renato C. Neves, João P. Vissotto, Alexandre W. Mazzonetto and Caio G. Sánchez
Department of Thermal and Fluids Engineering, School of Mechanical Engineering, State University of Campinas - UNICAMP, Brazil.*

Introduction

The aim of this study is to minimize the tar in product gas. To reach this, we present preliminary calculations including mass balance and enthalpy change in order to calculate the plasma temperature in the reform.

Preliminary calculations

The thermal plasma used was the non-transferred DC plasma torch. The working gas was nitrogen.

The system operation is given as follows. The product gas from biomass gasification was reformed in the plasma torch, which is inserted in the throat of a Venturi tube.

Mass balance on the Venturi:

$$\dot{m}_p + \dot{m}_g = \dot{m}_r \quad (1)$$

where \dot{m}_p is plasma mass flow [kg/h], \dot{m}_g is product gas mass flow [kg/h] and \dot{m}_r is gas reformed mass flow [kg/h].

The plasma gas enthalpy was calculated according to [1].

The enthalpy change on the Venturi:

$$\Delta H_p + \Delta H_g = \Delta H_r \quad (2)$$

where ΔH_p is the plasma enthalpy change [kJ/h], ΔH_g is the gasification gas enthalpy change [kJ/h] and ΔH_r is the reform enthalpy change [kJ/h].

Results

The Reynolds number of the product gas was 2237 and the pressure drop due to the Venturi was 14 Pa. Therefore, the product gas flow is between laminar and turbulent regimes, and the pressure drop on the Venturi is insignificant.

Table 1 shows the results of mass balance and enthalpy change whereas Table 2 shows the temperature values of the reform according to the product gas flow and H_2/CO ratio estimated for reformed gas.

Table 1. Parameter and value for mass balance and enthalpy change.

Parameter	Value	Unit
\dot{m}_g	11	kg/h
\dot{m}_p	48	kg/h
\dot{m}_r	59	kg/h
ΔH_g	9804	kJ/h
ΔH_p	222962	kJ/h
ΔH_r	232766	kJ/h

Table 2. Temperature according to the gasification flow and H_2/CO ratio.

Gasification flow (Nm ³ /h)	H_2/CO	Reformed gas temperature (K)
10	1	2293
	2	2027
14	1	2223
	2	1966
18	1	2159
	2	1911
22	1	2099
	2	1859

Conclusion

The temperature calculated at the outlet of the Venturi throat (reformed gas temperature) presents high enough to crack the tar in product gas (1859-2293 K). In this study, the demonstrated results were based on preliminary choices of the involved parameters. Therefore, the parameters presented here show the possibility of achieving tar reduction in product gas.

References

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM E341-08**. Standard Practice for Measuring Plasma Arc Gas Enthalpy by Energy Balance, 4 p., 2008.



Renato Cruz Neves

Degree in Physics (2009) and Mathematics (2012) at the State University of Campinas - UNICAMP. Master's student at the School of Mechanical Engineering, State University of Campinas - UNICAMP, Brazil.

Studies the utilization of energy (thermal and fluids), acting in tar reform of biomass gasification using plasma torch.



João Paulo Vissotto

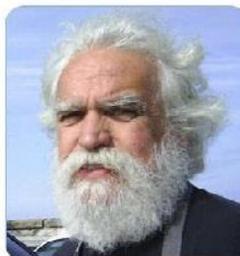
Degree in Mechanical Engineering from the University of Passo Fundo - UPF (2010). Master's student at the School of Mechanical Engineering, State University of Campinas, Brazil.

Conducts research related to co-gasification of biomass and industrial waste for energy generation. Has experience in production engineering and implemented industry PPCP for metallurgical industry. Worked with managing production teams in the automotive industry.



Alexandre Witier Mazzonetto

Degree in Agricultural Engineering from the State University of Campinas - UNICAMP (1993), Master degree in Agronomy (2004), Ph.D. student at the School of Mechanical Engineering, State University Campinas - UNICAMP. Has been working with renewable energy, energy from biomass and waste industrial, thermal processes for obtaining fuels, gasification and pyrolysis, new fuels, biofuels and sustainable fuels, synthesis gas (Syngas), reform of gas production and the use of biogas. Involved in several projects (research and development) of equipment, processes and production of combustible gases using waste.



Caio Glauco Sánchez

Degree in Mechanical Engineering at the State University of Campinas - UNICAMP (1978), master degree in Mechanical Engineering at the State University of Campinas - UNICAMP - UNICAMP (1982) and Ph.D. in Mechanical Engineering at the State University of Campinas - UNICAMP (1994). Post-doctoral at the Universidad de Zaragoza (Spain) on biomass pyrolysis (2006). Currently associated professor at the State University of Campinas. Has experience in Mechanical Engineering with emphasis on utilization of energy, acting on the following topics: gasification, pyrolysis, biomass, fluidized bed and sugarcane bagasse.

Co-Gasification of Eucalyptus Waste with Industrial Sewage Sludge in Fluidized Bed



João Paulo Vissotto, Alexandre Witier Mazzonetto, Renato Cruz Neves, Caio Glauco Sánchez
 Mechanical Engineering Faculty, UNICAMP, Campinas, SP, 13083-860, Brazil
 Corresponding authors: vissotto@fem.unicamp.br; awmazzo@fem.unicamp.br;
renatocruz@fem.unicamp.br; caio@fem.unicamp.br.

Introduction

This paper discusses the primary aspects of the co-gasification of eucalyptus waste with industrial sewage sludge show in figure 1.



Figure 1. Biomass Studied

Methodology

The process will be conducted in Bubble Fluidized Bed reactor, figure 2.



Figure 2. Scheme of Gasifier

Results

Table 1 shows the results of high heating value (HHV) of Industrial Sewage Sludge and Eucalyptus Waste calculated from de Dulong's formula and comparing values with others researches. It was proved to be viable for researching.

Table 1. Researches of elemental analysis of industrial sewage sludge and eucalyptus waste

	Industrial Sewage Sludge		Eucalyptus Waste	
	Macedo (2006)*	Commissioned Analysis ** (2011)	Jenkis (1990)***	Commissioned Analysis ** (2011)
Carbon (%)	13,39	29,92	48,30	45,26
Hydrogen (%)	2,14	4,11	5,90	6,26
Nitrogen (%)	0,21	1,32	0,20	0,20
Oxygen (%)	17,50	64,65 ⁺	45,10	48,28 ⁺
Chlorine (%)	0,01	ND	0,10	ND
HHV (MJ/kg)	3,88	4,51^{**}	18,00	15,67^{**}

* - Source: Adapted from Macedo, 2006

** - Analyzed in the Analytical Center, Institute of Chemistry – USP

*** - Source: adapted from Sánchez, 2010 ND - Not determined

⁺ - Oxygen determined by difference

^{**} - Calculated from Dulong's formula

Expectations

The expectations of this project will be to prove that quantities of carbonaceous components in industrial sewage sludge and eucalyptus waste are enough for using as fuel of co-gasification and achieving synergies for these biomass in the process.

Support:





Renato Cruz Neves, Caio Glauco Sánchez
 Mechanical Engineering Faculty, UNICAMP, Campinas, SP, 13083-860, Brasil
 Corresponding author: renatocruz@fem.unicamp.br; caio@fem.unicamp.br

Design and Development Of The Reform Of Gas Through Plasma Torch

Introduction

Plasma is considered the fourth state of matter and its definition is given by Chen (1984): Plasma gases are in the presence of charged particles is sufficient for its movement is controlled mainly by electromagnetic forces, with collective behavior and not fully described by the usual hydrodynamic gas.

McKelliget (1998) defines a plasma of more generally as an electrically charged gas.

Projects in thermal plasma cover diverse areas such as physics, engineering, metallurgy, chemicals, petrochemicals, among others.

The reform of the gas by means of other technologies already being used, for example, in catalysts for ethanol steam reforming, dry reforming of natural gas components of synthesis gas, gas reforming of methane, ethane, propane, among others studies.

The reformed gas from biomass gasification through the plasma is an innovative work.

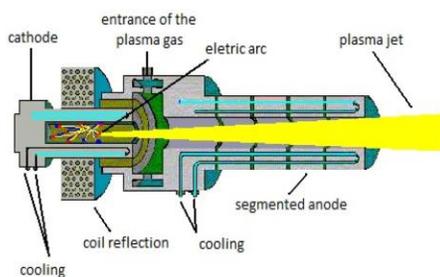


Figure 1: Plasma torch

Objective

The main objective of this work is cleaning the exit gas from a reactor fluidized bed gasification, aiming to increase the production of synthesis gas.

Material and Methods

The biomass used is waste of eucalyptus and industrial sewage sludge.

Firstly, the fluidized bed gasifier in operation, will be collected and the syngas analysed by a chromatograph.

Later, the cleaning system with plasma torch will be put. The exit gas from the gasification reactor will be reformed. For analysis, the collection will be realization of common gases gasification and gasification with gas reform with plasma torch.

The parameter to be varied is the feed rate to reach the optimal point of the reactor.

There will be a comparative analysis between the two systems.

It will be compared the tar rate with and without plasma.

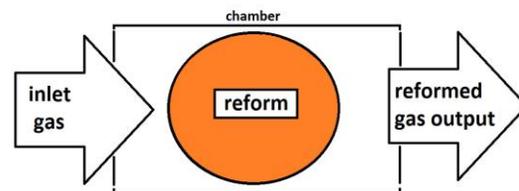


Figure 2: Simplified model for the reform of gas through the plasma

Expectations

It is expected that the implementation of the plasma torch reduce the tar content in relation to the initial process, increased the efficiency of gas production. Comparisons will be made to the process with and without plasma for validation of the plasma reforming syngas.

Therefore, the plasma is presented as an alternative more efficient than conventional processes for cleaning tar.

Characterization of *Pinus* and *Eucalyptus* Sawdust, *Eucalyptus* Peel and Forest Residues for Energy Purpose

Visotto, João Paulo (visotto@fem.unicamp.br); Mazzonetto, Alexandre Wittier (awmazzo@fem.unicamp.br); Neves, Renato Cruz (renatocruz@fem.unicamp.br); Sánchez, Elisabete Maria (bete@fem.unicamp.br); Sánchez, Caio Glauco (caio@fem.unicamp.br) - State University of Campinas – Faculty of Mechanical Engineering – Department of Thermal and Fluids Engineering – DETF/FEM/UNICAMP – Mendeleev Street, 200, University City "Zeferino Vaz", Campinas - SP

1. INTRODUCTION

This work is the initial part of the project in development at Gasification and Combustion Laboratory at FEM/UNICAMP that evaluated the energetic value of biomass wastes that used in the paper and pulp sector that isn't receive energetic destination. The wastes analyzed is pine sawdust; eucalyptus sawdust; eucalyptus peel; waste of eucalyptus reforestation and wastes of stump removal of eucalyptus, from Americana, Limeira and Piracicaba.

2. METHOD

Studies about thermochemical conversion of biomass require four preliminary classes of information: Particle Size, Proximate Analysis, Ultimate Analysis and Heater Power. this work followed the series of ASTM Standard for characterization of biomass, these was described in the complete article. The Ultimate Analysis was made at Chemistry Institute of USP, with Perkin Elmer CHN-2400 equipment with precision $\leq 0,2\%$, the other experiments was made at Unicamp Laboratories.

After this step, these biomasses are gasified in a fluidized bed reactor to obtain syngas and measuring the tar concentration, calorific value and evaluate the better application between co-firing in boilers or fuel for internal combustion engines.

3. RESULTS

Table 1 show the results of Proximate Analysis and Moisture Measurement and the table 2 show the results of Ultimate Analysis and Higher Heating Value.

Table 1. Experimental results of Proximate Analysis and Moisture Measurement

Biomass	Moisture (W.B.%)	Proximate Analysis (D.B. %)		
		Fixed Carbon	Volatile Matter	Ash
Pine Sawdust	8,62 ± 0,58	9,93 ± 0,69	88,69 ± 0,66	0,38 ± 0,66
Eucalyptus Sawdust	26,28 ± 4,03	10,86 ± 12,05	88,01 ± 1,82	1,13 ± 0,13
Eucalyptus Peel	8,78 ± 0,04	14,00 ± 0,33	82,04 ± 0,66	3,96 ± 0,34
Waste of Eucalyptus Reforestation	7,26 ± 0,53	11,40 ± 1,16	65,71 ± 4,77	22,90 ± 5,92
Wastes of Stump Removal of Eucalyptus	10,56 ± 1,00	5,74 ± 0,24	24,56 ± 0,69	69,70 ± 0,85

The presented values in both tables are similar to other values found in the literature. Figure 1 show the studied biomass.

Table 2. Experimental results of Ultimate Analysis and Higher Heating Value

Biomass	Ultimate Analysis (D.B. %)			HHV* MJ/kg
	Carbon	Hydrogen	Nitrogen	
<i>Pinus</i> Sawdust	47,81	6,44	0,13	18,56
<i>Eucalyptus</i> Sawdust	32,29	4,52	0,77	17,73
<i>Eucalyptus</i> Peel	51,20	6,00	0,40	16,32
Waste of <i>Eucalyptus</i> Reforestation	32,29	4,52	0,77	17,51
Wastes of Stump Removal of <i>Eucalyptus</i>	27,67	3,94	0,55	5,21

*HHV - Higher Heating Value

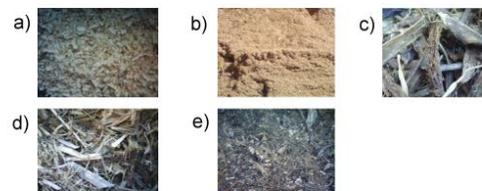


Figure 1. Pictures of studied biomass :a) *Pinus* Sawdust; b) *Eucalyptus* Sawdust; c) *Eucalyptus* Peel; d) Waste of Reforestation; e) Stump Removal

4. CONCLUSIONS

The present results show that great potential can be obtained from wastes that are not destined for power generation. Due to its higher heating value, with values between 16.32 MJ/kg (*Eucalyptus* Peel) and 18.56 MJ/kg (*Pinus* Sawdust), these biomass can show great energetic performance in the various application of thermochemical conversion into energy, except for stump removal, which showed simply (HHV) 5.21 MJ/kg because of the high ash content (69.70%). Pyrolysis and gasification routes have the advantage of mitigating environmental impacts and enable waste conversion in syngas or bio-oil for combustion in co-firing with the primary fuel in boilers.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

We thanks for CAPES and CNPq for the financial support to made the experiments and Suzano Papel e Celulose S.A. by information and biomass donation.