

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL**

**ELIAS ANTONIO DALVI**

**GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA FECAL PARA PRODUÇÃO  
DE BIOCOMBUSTÍVEL: ESTUDO DA CONVERSÃO  
TERMOQUÍMICA E AVALIAÇÃO EXERGOECOLÓGICA**

VITÓRIA

2015

ELIAS ANTONIO DALVI

**GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA FECAL PARA PRODUÇÃO  
DE BIOCOMBUSTÍVEL: ESTUDO DA CONVERSÃO  
TERMOQUÍMICA E AVALIAÇÃO EXERGOECOLÓGICA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção de título de Doutor em Engenharia Ambiental na área de Saneamento – Concentração: Biocombustíveis.  
Orientador: Prof. Dr. Ricardo Franci Gonçalves.  
Coorientador: Prof. Dr. Márcio Ferreira Martins.

VITÓRIA

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Tecnológica,  
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

D152g Dalvi, Elias Antonio, 1954-  
Gaseificação da biomassa fecal para produção de biocombustível :  
estudo da conversão termoquímica e avaliação exergoecológica / Elias  
Antonio Dalvi. – 2015.  
178 f. : il.

Orientador: Ricardo Franci Gonçalves.  
Coorientador: Márcio Ferreira Martins.  
Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade  
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Biomassa. 3. Fezes. 4.  
Exergia. 5. Gaseificação. 6. Gás sintético (Singás). I. Gonçalves,  
Ricardo Franci. II. Martins, Márcio Ferreira. III. Universidade Federal do  
Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 628

---



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**“Gaseificação da biomassa fecal para produção de biocombustível: Estudo da conversão termoquímica e avaliação exergoecológica”.**

**ELIAS ANTONIO DALVI**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Ricardo Franci Gonçalves  
Orientador – DEA/CT/UFES

Prof. Dr. Márcio Ferreira Martins  
Coorientador – DEM/CT/UFES

Prof. Dr. José Joaquim Conceição Soares Santos  
Examinador Interno – DEM/CT/UFES

Prof. Dr. Servio Túlio Cassini  
Examinador Interno – DEA/CT/UFES

Prof. Dr. Asher Kiperstok  
Examinador Externo – UFBA

Prof. Dr. Júlio Augusto Mendes da Silva  
Examinador Externo – UFBA

Coordenador do PPGEA: Prof. Dr. Edmilson Costa Teixeira

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
Vitória, ES, 07 de dezembro de 2015.

*À minha esposa, Ana Lúcia, e  
à minha filha, Luíza, a minha  
eterna gratidão.*

## AGRADECIMENTOS

Ao **CRIADOR**, por nos dotar de razão e livre arbítrio, e, assim, podermos admirar e desfrutar das maravilhas de SUA criação.

Ao meu orientador, Prof. Ricardo Franci, pelo apoio, confiança e incentivo na execução desse trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Márcio Martins, pela colaboração e auxílio na condução das pesquisas e acompanhamento nos experimentos.

Ao Prof. Francisco Emmerick, e ao Prof. Neyval Reis, por viabilizarem a aquisição dos equipamentos de pesquisa.

Ao Prof. Gil Rangel e ao José Sirkis, pelo incentivo e ajuda na aquisição de materiais de pesquisa.

Ao Prof. José Joaquim, pelos valiosos esclarecimentos nos momentos necessários.

Ao Prof. Sérgio Túlio, pela colaboração na especificação do gaseificador.

À Cristina e ao Gustavo, do LABPETRO, e ao Prof. Eustáquio de Castro, pela colaboração nas análises químicas.

À empresa Fluir Engenharia Ambiental e aos Laboratórios Bioclínico e Deomar Bittencourt, por contribuir com as matérias primas necessárias ao desenvolvimento desse trabalho.

À ArcelorMittal e a Elias Ardisson, pela colaboração na análise dos gases.

À amiga Rose Leão, pelo apoio e presteza junto ao PPGEA.

Às amigas, Rosana Cirilo, Leidimara da Silva e Cristiane Veronesi, pela prestimosa ajuda nos trabalhos de laboratório.

Aos colegas professores, Oswaldo Paiva e Antônio Paula, pelo apoio e valiosa ajuda nos assuntos administrativos.

A Roger Caiado e Jhony Andreatta, pela colaboração na manutenção dos equipamentos de pesquisa.

À minha irmã, Maria Ignêz, pela colaboração nos assuntos ortográficos.

## RESUMO

O presente trabalho faz um estudo da biomassa fecal humana como fonte de energia alternativa renovável. O Poder Calorífico médio e o Poder Calorífico em função da ingestão calórica permitiram a determinação do potencial energético dessa biomassa em nível mundial, por continente e país. Uma análise das fezes de outros animais também foi realizada e comparada com as fezes humanas sob o ponto de vista calorífico, utilizando o conceito de Índice de Energia Rejeitada (IER), que é a energia rejeitada por quilo de massa corporal, obtendo-se, para o ser humano, o menor dos valores. O uso das fezes humanas em um reator de bancada simulando um gaseificador contra-corrente permitiu obter resultados e conclusões preliminares para aplicação posterior em um gaseificador do tipo cocorrente, com capacidade para 20 kW, com teores de umidade variando de 0%, 10% e 20% e diâmetros de partícula de 15, 30 e 50 mm. Foi também realizado um estudo de viabilidade da utilização da tecnologia da gaseificação como um sistema alternativo para o tratamento de esgoto, tomando-se como referência o conceito de exergia por meio de dois parâmetros de referência: eficiência exérgica ambiental, definida como a razão da exergia do efeito útil do processo e a exergia total consumida dos insumos utilizados no processo, e o índice exérgico de renovabilidade que é a razão entre as exergias dos produtos e a soma das exergias não renováveis e exergias destruídas. Por fim, foi montada uma tabela com os parâmetros eficiência exérgica ambiental e índice de renovabilidade encontrados neste trabalho e aqueles determinados por BEJARANO (2009) para outras três tecnologias de tratamento de esgoto: Estação de Tratamento de Esgoto Barueri (Brasil), RAFA- Lagoa Facultativa (Brasil) e Estação de Tratamento de Esgoto Cañavelarejo (Colômbia). Os resultados, embora ilustrativos, indicam que a gaseificação pode se tornar uma etapa bastante vantajosa para utilização em um sistema de tratamento de esgoto.

**Palavras-chave:** Biomassa Fecal humana. Poder Calorífico. Energia. Exergia. Gaseificação. Singás.

## ABSTRACT

The present work is a study of human fecal biomass as a source of renewable alternative energy. The average Calorific Value and the Calorific Value depending on caloric diet allowed the determination of the energy potential of biomass worldwide, by continent and country. An analysis of feces of other animals was also performed and compared to the human feces under the caloric point of view, using the concept of Rejected Energy Index (IER, in Portuguese) which is the energy rejected per kilogram of body weight, and it was found that for human is the smallest. The use of human feces in the batch reactor simulating a gasifier downdraft yielded results and preliminary findings for later use in a downdraft gasifier with 20 kW capacity, using 0%, 10% and 20% moisture content and particle diameters of 15, 30 and 50 mm. A feasibility study was also carried out on the use of gasification technology as an alternative system for the treatment of feces, taking the concept of exergy as reference by means of two parameters: environmental exergetic efficiency, defined as the exergy ratio of the useful effect of the process to the total exergy consumed by human and natural resources, including all the exergy inputs. The renewability calculation was done using the Renewability Exergy Index defined as the exergy ratio of the products to the sum of the non-renewable exergy and destroyed exergy. Finally, a table was assembled which shows the environmental exergy efficiency parameters and the exergetic index renewability determined in this work as compared by the same parameters determined by BEJARANO (2009) for three of sewage treatment technologies: Sewage Barueri Treatment Plant (Brazil), RAFA-Facultative Pond (Brazil) and Cañavelarejo Sewage Treatment Plant (Colombia); The results, although illustrative, indicate that gasification may become an advantageous step to be used in a sewage treatment system.

Keywords: human fecal biomass; calorific value, energy; exergy, gasification, syngas.

## LISTA DE SIGLAS

CENBIO	Centro de Referência em Biomassa
EPE	Empresa de Pesquisa de Energia
ESCELSA	Espírito Santo Centrais Elétricas SA
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FAO	Food and Agriculture Organization
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICPOES	Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IEA	Agência Internacional de Energia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
LABPETRO	Laboratório de Petróleo
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
NNFCC	National Non-Food Crops Centre
OECD	Organisation de Coopération et Développement Économiques
OMS	Organização Mundial da Saúde
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
RBC	Rede Brasileira de Calibração
SVB	Sociedade Vegetariana Brasileira
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

## LISTA DE SÍMBOLOS

B	exergia (kJ/kg)
b	Exergia por unidade de massa (kJ/kg)
B <sub>alcatrão</sub>	Exergia do alcatrão (kJ/kg)
B <sub>biomassa</sub>	Exergia da biomassa (física e química) (kJ/kg)
B <sub>cinzas</sub>	Exergia das cinzas (kJ/kg)
B <sub>destruída</sub>	Exergia dos produtos (singás, cinzas, alcatrão e gases de exaustão) menos a exergia dos insumos (biomassa, eletricidade, ar) (kJ/kg)
B <sub>eletricidade</sub>	Exergia elétrica (motor agitador e ventilador) (kJ/kg)
B <sub>gases-exaustão</sub>	Exergia dos gases de exaustão (kJ/kg)
B <sub>secagem</sub>	Exergia para secagem da biomassa (kJ/kg)
B <sub>singás</sub>	Exergia do singás (kJ/kg)
E	Energia (kJ/kg)
E <sub>a</sub>	Energia do alcatrão (kJ/kg)
E <sub>ar</sub>	Energia do ar (kJ)
E <sub>b</sub>	Energia da biomassa (kJ)
E <sub>c</sub>	Energia das cinzas (kJ)
E <sub>e</sub>	Energia elétrica fornecida (se de fonte exterior) (kJ)
E <sub>ga</sub>	Energia dos insumos ( <i>energia gasta</i> ) (kJ)
E <sub>ge</sub>	Energia dos gases de exaustão (kJ)
E <sub>gerada</sub>	Energia gerada (kJ)
E <sub>ve</sub>	Energia dos produtos úteis ( <i>energia vendida</i> ) (kJ)
$\gamma$	Número de moles de dióxido de carbono nos produtos de reação
G	Energia livre de Gibbs (J)
H	Entalpia (kJ)
$\dot{m}$	Fluxo de massa (kg/s)
P	Pressão do sistema (bar)
P <sub>0</sub>	Pressão do estado de referência (bar)
Q	Calor (kJ)
Q <sub>vc</sub>	Calor dissipado pelo motor e reator (kJ).
R	Constante dos gases (J/mol.K)
S	Entropia (kJ/K)

$\hat{S}$	Entropia absoluta (kJ/K)
$s$	Entropia específica do sistema (kJ/kg.K)
$s_0$	Entropia específica de referência (kJ/kg.K)
$S_0$	Entropia do meio de referência (kJ/K)
$T$	Temperatura do meio (K)
$T_0$	Temperatura de referência (k)
$U$	Energia interna (kJ)
$U_0$	Energia interna do meio de referência (kJ)
$u$	Energia interna específica do sistema (kJ/kg)
$u_0$	Energia interna específica de referência (kJ/kg)
$V$	Volume (m <sup>3</sup> )
$v$	Volume específico do sistema (m <sup>3</sup> /kg)
$v_0$	Volume específico de referência (m <sup>3</sup> /kg)
$W_{vc}$	Trabalho envolvido no volume de controle (kJ)
$V$	Índice de coeficiente molar
$V_0$	Volume do meio de referência (m <sup>3</sup> )
$x_i$	Fração molar do componente ( $i$ ) nos produtos de reação
$x_i^p$	Fração molar do componente ( $i$ ) nas condições do ambiente
$\alpha$	Número de moles de oxigênio presente nos reagentes
$\beta$	Número de moles de nitrogênio presente nos reagentes
$\eta_e$	Eficiência energética do reator
$\eta_{ex}$	Eficiência exergética ambiental
$\theta$	Número de moles de nitrogênio nos produtos de reação
$\lambda$	Número de moles de vapor d'água nos produtos de reação
$\lambda_r$	Índice exergético de renovabilidade
$\varphi$	Número de moles de dióxido de enxofre nos produtos de reação
$\Delta G$	Varição da energia de Gibbs (J)
$n_r$ :	Número de moles do reagente
$\bar{a}_{fr}$ :	Fluxo de exergia em base molar do reagente (kJ/mol)
$n_p$ :	Número de moles dos produtos
$\bar{a}_{fp}$ :	Fluxo de exergia em base molar dos produtos (kJ/mol)
$l$ :	Exergia destruída no processo de combustão (kJ/kg)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1: Emissões evitadas (em milhões de toneladas de dióxido de carbono) com biocombustíveis no Brasil, em 2012. Fonte: EPE (2012).....	27
Figura 3-2: Oferta interna de energia (em porcentagem) no Brasil, em 2014. Fonte:MME (2015).....	27
Figura 3-3: Proporções de nutrientes encontrados em águas residuais domésticas e resíduos biológicos na Suécia. Fonte: NIWAGABA (2009), apud JONSSON et al., (2005).....	32
Figura 3-4: Ilustração de um incinerador de biomassa utilizado para incineração de fezes. Fonte: NIWAGABA (2009), apud Supplier product sheets, MUSAAZI, 2006.....	36
Figura 3-5: Sistema de fossa simples. Fonte: (TILLEY et al., 2014).....	38
Figura 3-6: Sistema de fossa seca sem produção de lodo. Fonte: (TILLEY et al., 2014).....	38
Figura 3-7: Sistema de Fossa de Pouco Carreamento Hídrico Sem Produção de Lodo. Fonte: (TILLEY et al., 2014).....	39
Figura 3-8: Sistema de Fossa Sem Água Com Separação de Urina. Fonte: (TILLEY et al., 2014).....	40
Figura 3-9: Sistema com reator de biogás. Fonte: (TILLEY et al., 2014).....	40
Figura 3-10: Sistema de Tratamento de Água Negra Com Infiltração. Fonte: (TILLEY et al., 2014).....	41
Figura 3-11: Sistema de Tratamento de Água Negra com Transporte de Efluente. Fonte: (TILLEY et al., 2014).....	42
Figura 3-12: Transporte de Água Negra Para Sistema de Semitratamento Centralizado. Fonte: (TILLEY et al., 2014).....	43
Figura 3-13: Sistema de Esgoto Com Desvio de Urina. Fonte: (TILLEY et al., 2014).....	44
Figura 3-14: Situação Global da degradação do solo induzida pelo homem. Adaptado de JENSSEN (2005) apud <a href="http://WWW.FAO.ORG">WWW.FAO.ORG</a> .....	48
Figura 3-15: Sistema de gestão de recursos com Facilitador de Recuperação de Recursos Integrados (IRRF). Adaptado de LAZAROVA, <i>et al.</i> , (2012).....	50
Figura 3-16: Sistema de ecosaneamento com gaseificação da biomassa fecal. Adaptado de JENSSEN, (2005).....	51

Figura 3-17: Diagrama esquemático dos processos de conversão da biomassa. Fonte: MME(b) (2006).....	56
Figura 3-18: Rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa. Fonte: MME (b) (2006).....	57
Figura 3-19: Processo de gaseificação da biomassa. (Fonte: Knoef, 2008).....	61
Figura 3-20 Sequência de reação para a gaseificação do carvão de biomassa. (Adaptado de: Higman et al., 2003).....	61
Figura 3-21: Esquemas de gaseificador co-corrente (Downdraft). Fonte: Andrade (2007).....	62
Figura 3-22: Estágios do processo de gaseificação. Fonte: PUC – RIO (Certificação Digital nº 0511123/CA).....	62
Figura 3-23: Veículos movidos a gás de biomassa. Fonte: ANDRADE, 2007.....	65
Figura 3-24: Classificação geral dos gaseificadores de biomassa.....	66
Figura 3-25: Curvas características da TG.....	79
Figura 3-26: Curva DTA onde são exemplificadas quatro reações típicas: I) Transformação de segunda ordem; II) Reação endotérmica ocorrendo em uma temperatura específica (ex.: fusão); III) Reação endotérmica ocorrendo em uma faixa de temperatura (ex.: decomposição do CaCO <sub>3</sub> ); IV) Reação exotérmica. . Fonte: Caponero & Tenório (PMI-2201).....	80
Figura 4-1: Uma das bacias sanitárias secas segregadoras utilizadas para coleta das excretas humanas na ETE – UFES.....	81
Figura 4-2: Embalagem para transporte da biomassa.....	82
Figura 4-3: Embalagem da coleta.....	82
Figura 4-4: Coloração típica das amostras <i>in natura</i> .....	82
Figura 4-5: Formas dos corpos de prova e sua coloração típica em função da dieta calórica.....	85
Figura 4-6: Secador de biomassa (a) e pré-secador (b).....	87
Figura 4-7: Vista interna do pré-secador de biomassa.....	87
Figura 4-8: Amostras de biomassa após pré-secagem armazenadas em caixas de isopor.....	88
Figura 4-9: Calorímetro GCA usado na determinação do PCS.....	89
Figura 4-10: Equipamento para Análise Elementar - CE Instruments/EA 1110. Fonte: LABPETRO - UFES.....	91
Figura 4-11: Analisador SDT Q600 da TA Instruments. Fonte: LABPETRO - UFES....	92

Figura 4-12: Desenho esquemático do gaseificador de bancada do tipo contra corrente (Updraft). Fonte: MONHOL e MARTINS, 2014.....	93
Figura 4-13: Reator de bancada com os aparatos de medição.....	94
Figura 4-14: Parte superior do reator de bancada, onde se observa o cone de ignição (a) e os dutos de entrada de ar (b).....	94
Figura 4-15: Topo do reator mostrando o início de ignição da biomassa.....	96
Figura 4-16: Gaseificador de biomassa ALL POWER PELLETT GEK 20 KW.....	97
Figura 4-17: Plataforma para possibilitar o uso do gaseificador de biomassa fora do laboratório.....	97
Figura 4-18: Fluxograma de processo contendo as configurações: reator-flare-gases de exaustão e reator-motogerador-gases de exaustão + secador de biomassa.....	98
Figura 4-19: Fluxograma de processo do sistema de tratamento via gaseificação de biomassa proposto (GEK 20 kW).....	99
Figura 4-20: Desenho esquemático do gaseificador com suas partes e zonas de processo, bem como dos pontos de tomada de dados.....	100
Figura 4-21: Sistema de medição da vazão do ar por meio do reator (gaseificador).....	102
Figura 4-22: Topo de reator onde se observa a janela de inspeção e recarga.....	103
Figura 4-23: Ponto de tomada de pressão interna do gaseificador bem como da temperatura do gás logo após a sua saída da zona de oxidação.....	103
Figura 4-24: Ponto de coleta do gás e de sua temperatura na saída do reator.....	104
Figura 4-25: Analisador de gases, marca TEXTO, modelo 454 M/XL.....	104
Figura 4-26: Desenho do tipo de ampola utilizada para a coleta do gás, com capacidade de 250 ml, utilizada para análise dos gases no laboratório de química da Arcelor Mittal.....	105
Figura 4-27: Balão plástico para coleta de gás (a), e envolto em plástico preto para evitar a incidência de luz (b).....	106
Figura 4-28: Painel de controle do reator (a), e exaustores (b).....	108
Figura 4-29: Chama de ignição (a); tampão do duto de ignição (b-1) e válvula de entrada de ar (b-2).....	108
Figura 4-30: Ignitor do flare instalado na boca de saída dos gases (a) e base do reator com a janela para inspeção e retirada das cinzas (b).....	108
Figura 4-31: Esquema do balanço exergético para o sistema de tratamento proposto.....	110

Figura 5-1: Análise termogravimétrica em atmosfera de ar e N <sub>2</sub> .....	130
Figura 5-2: Análise Térmica Diferencial (DTA) em atmosfera de ar sintético.....	131
Figura 5-3: Perfil de temperatura durante o processo de ignição da biomassa no topo do reator medido pelo termopar 1 (Tp1).....	132
Figura 5-4: Biomassa logo após o início de ignição.....	133
Figura 5-5: Biomassa após ser varrida pela combustão apresentando aparência esbranquiçada típica de cinza.....	133
Figura 5-6: Curvas do comportamento da temperatura no reator de bancada utilizando biomassa fecal humana.....	134
Figura 5-7: Alcatrão em processo de condensação (a) e condensado de alcatrão (b).....	135
Figura 5-8: Cinzas resultantes da gaseificação no reator de bancada.....	136
Figura 5-9: Topo do reator de bancada onde se observa o termopar Tp1 e a retração de volume ao final do processo de gaseificação.....	137
Figura 5-10: Exaustores responsáveis por manter a vazão de ar através do reator.....	139
Figura 5-11: Simulação do início do processo de ignição do reator do gaseificador.....	139
Figura 5-12: Início de chama decorrente do processo de combustão do singás a qual se inicia pela presença do filamento incandescente do ignitor (indicação da seta em amarelo).....	141
Figura 5-13: Chama decorrente da queima dos gases gerados no gaseificador.....	141
Figura 5-14: Vista inferior da estrutura do flare em estado incandescente.....	142
Figura 5-15: Aspecto das cinzas após sua retirada do gaseificador.....	143
Figura 5-16: Borra presente nas cinzas com aspecto de material sinterizado.....	143
Figura 5-17: Vista interna do reator após retirada das cinzas.....	146
Figura 5-18: Produção dos gases não combustíveis em função da umidade para diâmetro da partícula de 15 mm e 50 mm.....	147
Figura 5-19: Produção de gás em função da vazão de ar.....	148
Figura 5-20: Diagrama representativo do sistema de ecosaneamento proposto.....	153

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 Quantidade excretada de fezes por pessoa/ano, segundo alguns autores.....	28
Tabela 3-2 Quantidade, composição e características de fezes humanas. Adaptada de TONONI (2010).....	30
Tabela 3-3: Caracterização físico-química do material fecal bruto. Fonte: TONANI (2010).....	32
Tabela 3-4: Teores de metais pesados nas fezes humanas.....	33
Tabela 3-5: Principais organismos patogênicos excretados nas fezes humanas. Fonte: (REBOUÇAS, 2010).....	34
Tabela 3-6: Poder calorífico médio (PCS; PCI, em kJ/kg) de algumas biomassas. (adaptada de PTAZINSK, 2007); QURINO, 2005); (CORTEZ <i>et al.</i> , 2008 e QUIOTTO, 2010).....	53
Tabela 3-7: Total de fósforo na excreta e na urina em áreas urbanas e rurais, no mundo em 2009 e em 2050. Fonte: MIHELICIC <i>et al.</i> , (2011).....	53
Tabela 3-8: Quantidade de N, P e K (kg/ha) retirada do solo por tonelada métrica de fração da colheita para plantas diferentes (Autoridade Sueca de Alimentação, 2004). Fonte: JÖNSSON <sup>(b)</sup> <i>et al.</i> , (2004).....	54
Tabela 3-9: Tipo de gaseificador e teor de alcatrão gerado. Fonte: Quaak(1999).....	59
Tabela 3-10: Características de gaseificadores de leito fixo e fluidizado. Fonte: ANDRADE (2007).....	66
Tabela 3-11: Percentual de gases gerados em função do agente gaseificante. Adaptado de GERALDO (2013); BRIDGEWATER (2002).....	68
Tabela 3-12: Tipo de gás obtido em função do agente gaseificante. Fonte: GERALDO, 2013.....	68
Tabela 3-13: Composição volumétrica típica do gás gerado sob condições diferentes de pressão interna do gaseificador. Fonte: KALTSCHMITT e HARTMAN, (2001).....	69
Tabela 3-14: Dados de alguns gaseificadores de grande porte. Adaptado de NNFCC (2009).....	69
Tabela 3-15: Exergia química de algumas biomassas (adaptada de PTAZINSK, 2007).....	77

Tabela 4-1: Granulometrias utilizadas nos ensaios.....	83
Tabela 4-2: Combinação de ensaios realizados.....	107
Tabela 5-1: Poder calorífico inferior (PCI) das fezes humanas em função do teor de umidade e PCI médio de madeiras nativas.....	115
Tabela 5-2: Potencial energético (em base seca) da biomassa fecal humana. Fonte: IBGE 2014.....	116
Tabela 5-3: Poder calorífico superior (PCS) médio de fezes de alguns animais e do humano.....	117
Tabela 5-4: Valores do PCS das fezes humanas em base seca, em função de dieta alimentar.....	118
Tabela 5-5: Energia contida nas fezes humanas, por país. (América do Sul).....	119
Tabela 5-6: Energia contida nas fezes humanas, por país. (América do Norte).....	120
Tabela 5-7: Energia contida nas fezes humanas, por país. (América Central).....	120
Tabela 5-8: Energia contida nas fezes humanas, por país. (África).....	121
Tabela 5-9: Energia contida nas fezes humanas, por país. (Ásia). (Europa).....	122
Tabela 5-10: Energia contida nas fezes humanas, por país. (Ásia).....	123
Tabela 5-11: Energia contida nas fezes humanas, por país. (Oceania).....	124
Tabela 5-12: Quantitativos em massa de fezes, por espécie (Brasil).....	125
Tabela 5-13 Índice de Energia rejeitada (IER), por espécie.....	126
Tabela 5-14: Elementos presentes nas fezes de alguns animais e do ser humano.....	127
Tabela 5-15: Poder calorífico superior das fezes humanas pelo método de Dulong e Vandralek.....	128
Tabela 5-16: Resíduos após a combustão, em calorímetro, das fezes de alguns animais e do ser humano.....	128
Tabela 5-17: Elementos presentes nos resíduos das fezes após a combustão no calorímetro.....	129
Tabela 5-18: Análise imediata alternativa em função da TG/DTA.....	131
Tabela 5-19: Gases medidos na saída do reator de bancada e seus respectivos quantitativos.....	136

Tabela 5-20: Elementos presentes na composição da cinza da biomassa fecal humana decomposta termoquimicamente no reator de bancada.....	137
Tabela 5-21: Percentual dos elementos presentes nas cinzas e percentual de seus respectivos óxidos.....	144
Tabela 5-22: Elementos presentes na Borra.....	145
Tabela 5-23: Produção de gás para diâmetro da partícula de ~50 $\mu$ m e 20% de umidade.....	149
Tabela 5-24: Eficiência do gaseificador com o singás na temperatura ambiente (frio) e na temperatura de ensaio (quente).....	149
Tabela 5-25: Exergia do Singás utilizando biomassa com 20% de umidade.....	150
Tabela 5-26: Exergias dos insumos e produtos utilizados para o balanço exergético.....	150
Tabela 5-27: Eficiência exergética ambiental ( $\eta_e$ ) e o índice exergético de renovabilidade ( $\lambda_r$ ).....	150
Tabela 5-28: Eficiência exergética ambiental ( $\eta_e$ ) e o índice exergético de renovabilidade ( $\lambda_r$ ) do sistema de gaseificação e dos sistemas analisados por BEJARANO (2009).....	152

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	21
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	25
2.1 OBJETIVOS GERAIS.....	25
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	26
3.1 GERAÇÃO DE RESÍDUOS FECAIS NO BRASIL E NO MUNDO.....	28
3.2 ESTADO DA ARTE DO TRATAMENTO DE RESÍDUOS FECAIS.....	29
<b>3.2.1 Estabilização dos Excretas</b> .....	29
<b>3.2.2 Sobre a Caracterização das Fezes</b> .....	29
3.2.2.1 Composição.....	29
3.2.2.2 Nutrientes.....	31
3.2.2.3 Organismos Patogênicos nas Fezes.....	33
<b>3.2.3 Tratamento das Fezes</b> .....	34
3.2.3.1 Armazenamento.....	34
3.2.3.2 Compostagem.....	34
3.2.3.3 Incineração.....	36
3.2.3.4 Tratamento Químico.....	37
3.3 SISTEMAS DE SANEAMENTO.....	37
<b>3.3.1 Sistemas Convencionais</b> .....	37
3.3.1.1 Sistema de Fossa Simples.....	37
3.3.1.2 Sistema de Fossa Seca sem Produção de Lodo.....	38
3.3.1.3 Sistema de Fossa de Pouco Carreamento Hídrico sem Produção de Lodo.....	39
3.3.1.4 Sistema de Fossa sem Água, com Separação de Urina.....	39
3.3.1.5 Sistema Biogás.....	40
3.3.1.6 Sistema de Tratamento de Água Negra, com Infiltração.....	41
3.3.1.7 Sistema de Tratamento de Água Negra, com Transporte de Efluente..	42

3.3.1.8 Transporte de Água Negra para Sistema de Semitratamento Centralizado.....	43
3.3.1.9 Sistema de Esgoto, com Desvio de Urina.....	43
<b>3.3.2 Problemas Relacionados aos Sistemas de Tratamento de Esgoto...</b>	<b>44</b>
3.3.2.1 Sistemas Convencionais.....	44
3.3.2.2 Saneamento Ecológico (Ecosaneamento).....	45
3.4 FEZES COMO FONTE DE ENERGIA E NUTRIENTES.....	51
<b>3.4.1 Fezes como Fonte de Energia.....</b>	<b>51</b>
<b>3.4.2 Fezes como Fonte de Nutrientes.....</b>	<b>53</b>
3.5 CONVERSÃO DE BIOMASSA EM ENERGIA.....	55
3.6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE CONVERSÃO TERMOQUÍMICA.....	57
<b>3.6.1 Etapas da Gaseificação.....</b>	<b>61</b>
<b>3.6.2 Tipos e Características dos Gaseificadores.....</b>	<b>65</b>
3.7 FUNDAMENTOS DA TERMODINÂMICA.....	70
<b>3.7.1 Exergia Física.....</b>	<b>73</b>
<b>3.7.2 Exergia Química dos Combustíveis.....</b>	<b>76</b>
<b>3.7.3 Termodinâmica Aplicada à Valoração da Biomassa.....</b>	<b>77</b>
<b>3.7.4 Termogravimetria (TG) e Análise Termogravimétrica Diferencial (DTA).....</b>	<b>78</b>
3.7.4.1 Termogravimetria.....	78
3.7.4.2 Análise Termogravimétrica Diferencial (DTA).....	79
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>80</b>
4.1 FEZES HUMANAS.....	80
<b>4.1.1 Coleta e Amostragem.....</b>	<b>80</b>
<b>4.1.2 Preparação das Amostras e dos Corpos de Prova.....</b>	<b>82</b>
<b>4.1.3 Amostras para Ensaios em Função da Dieta.....</b>	<b>84</b>
4.2 FEZES DE OUTROS ANIMAIS.....	85
<b>4.2.1 Coleta, Amostragem e Preparação.....</b>	<b>85</b>
4.3 EQUIPAMENTOS.....	86
<b>4.3.1 Estufa de Pré-secagem e Secagem.....</b>	<b>86</b>
4.3.1.1 Procedimento de Secagem.....	87

<b>4.3.2 Calorímetro e Balança Analítica</b> .....	88
4.4 ANÁLISES TERMOQUÍMICAS.....	90
<b>4.4.1 Análise Elementar e Imediata</b> .....	90
<b>4.4.2 Termogravimetria (TG) e Análise Termogravimétrica Diferencial (DTA)</b> .....	92
4.5 REATOR DE BANCADA.....	94
<b>4.5.1 Procedimento de Ensaio</b> .....	95
4.6 GASEIFICADOR.....	96
<b>4.6.1 Descrição do Gaseificador</b> .....	99
4.6.1.1 Teor de Umidade para o Gaseificador.....	101
4.6.1.2 Vazão de Ar.....	102
4.6.1.3 Recarga da Biomassa.....	102
4.6.1.4 Pontos de Tomada de Temperatura e Pressão.....	103
4.7 ANÁLISE DE GASES.....	104
<b>4.7.1 Coleta com as Ampolas</b> .....	105
<b>4.7.2 Coleta com Balão Plástico</b> .....	106
<b>4.7.3 Definição de Ensaios e Parâmetros</b> .....	106
<b>4.7.4 Procedimento de Ensaio</b> .....	107
<b>4.7.5 Análise Exergoecológica</b> .....	109
4.7.5.1 Balanço Exergético.....	109
4.7.5.2 Balanço Energético.....	112
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	115
5.1 O PODER CALORÍFICO SUPERIOR DA BIOMASSA FECAL.....	115
<b>5.2 O PODER CALORÍFICO EM FUNÇÃO DA DIETA CALÓRICA</b> .....	117
5.3 ÍNDICE DE ENERGIA REJEITADA (IER) .....	125
5.4 ESTIMANDO O PODER CALORÍFICO PELO MÉTODO DE DULONG E VANDRALEK.....	127
5.5 ANÁLISE ELEMENTAR DOS RESÍDUOS PÓS-COMBUSTÃO.....	128
5.6 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CONVERSÃO TERMOQUÍMICA DE FEZES.....	129
<b>5.6.1 Análise Termogravimétrica (TG)</b> .....	129

<b>5.6.2 Análise Térmica Diferencial (DTA)</b> .....	130
<b>5.7 TESTE DE BENCHMARK DA CONVERSÃO TERMOQUÍMICA DE FEZES</b> .....	132
<b>5.7.1 Ignição do Processo</b> .....	132
<b>5.7.2 A Propagação Autossustentável da Frente de Combustão</b> .....	133
<b>5.7.3 Produtos da Combustão</b> .....	135
<b>5.8 GASEIFICADOR DE 20 KW</b> .....	138
<b>5.8.1 Ignição da Biomassa e o Processo de Gaseificação</b> .....	139
<b>5.8.2 Produtos da Gaseificação</b> .....	142
<b>5.8.3 Análise do Singás</b> .....	146
<b>6 ANÁLISE EXERGÉTICA</b> .....	148
<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	155
<b>8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	158
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	159
<b>APÊNDICE A:</b> Gráficos das curvas de produção de gás, em função do diâmetro da partícula, para os teores de umidade de 0%, 10% e 20%.....	172
<b>APÊNDICE B:</b> Gráficos das curvas de produção de gás, em função do teor de umidade, para diâmetros de partícula de 15 mm, 30 mm e 50 mm.....	173
<b>APÊNDICE C:</b> Tabela das médias dos teores dos gases gerados e tabelas dos cálculos das exergias.....	174
<b>APÊNDICE D:</b> Tabelas com os dados do balanço energético determinado nesse trabalho.....	177
<b>APÊNDICE E:</b> Tabelas com os dados do balanço energético determinado por RODRIGUEZ (2007).....	178

## 1 INTRODUÇÃO

Os padrões de consumo mantidos atualmente por grandes contingentes populacionais ameaçam a sustentabilidade do planeta a médio prazo, conforme indicam várias publicações recentes sobre o assunto (WHO, 2012; PURVES *et al.*, 2012; KONE, 2012; MORAES *et al.*, 2011).

Temas de suma importância relacionados à sustentabilidade do planeta, discutidos em Bonn (2011), enfatizam que a preservação da natureza depende do aumento da produtividade de recursos, da eficiência dos processos e do manejo empregados na sua exploração, devendo ter como consequência um mínimo de impacto ambiental, tal como a geração de gases de efeito estufa. Ainda, conforme Bonn (2011), o conjunto de processos produtivos da sociedade e as transações deles decorrentes que contribuam cada vez mais para o desenvolvimento sustentável (também chamado de *economia verde*) podem ser conseguidos por meio da inovação tecnológica, principalmente nos setores mais críticos como produção de alimento, gerenciamento dos recursos hídricos e geração de energia, enfatizando a reciclagem e redução do desperdício. Tome-se como exemplo o *saneamento focado em recursos*, cuja *rationale* baseia-se na menor extração possível dos bens primários (água, nutrientes e energia) por meio de sua reciclagem nos ciclos produtivos.

Sabe-se que a maior parte da população mundial não tem acesso adequado ao saneamento. Segundo Kone (2012), cerca de 1,1 bilhão de pessoas ainda defecam ao ar livre, sobretudo nos países com valores de IDH mais baixos. Tendo em vista as dificuldades para se atingir as metas do milênio, pode-se concluir que os modelos convencionais de saneamento não garantem a preservação do meio ambiente e não são capazes de assegurar a saúde da população na escala global.

Tais modelos preveem o uso intensivo do recurso água para manter o metabolismo urbano, sendo um dos seus principais usos o carreamento das excretas humanas. A mistura de água e excreta na escala residencial representa o embricamento dos ciclos da água e dos nutrientes na escala coletiva da cidade, o que gera sérias

ameaças ao meio ambiente e à saúde coletiva. Tal modelo encontra-se sob forte contestação atualmente, pelo seu potencial de exaurir os recursos naturais, de contribuir significativamente para o efeito estufa e por não cumprir sua tarefa precípua de universalizar o acesso de todos ao saneamento de qualidade (Bonn, 2011).

Por outro lado, a possibilidade da escassez dos combustíveis fósseis, a poluição do meio ambiente, a questão da disponibilidade energética e a preocupação eminente com o aquecimento global direcionam para novas pesquisas que contemplem a utilização de energias alternativas com vistas à menor emissão de gases de efeito estufa, o que implica a utilização de processos de conversão de energia cada vez mais eficientes. Estudos desenvolvidos no Brasil (EPE, 2012) mostraram que a emissão de CO<sub>2</sub> (considerada a principal causadora do efeito estufa) diminuiu quando se aumentou a participação da biomassa na matriz energética do país.

Pode ser considerada biomassa todo recurso renovável que provêm de matéria orgânica - de origem vegetal ou animal - tendo por objetivo principal a produção de energia (MMA, 2013). WIKIPEDIA → “Em geração de energia, o termo biomassa abrange os derivados recentes de organismos vivos utilizados como combustíveis ou para a sua produção. Do ponto de vista da ecologia, biomassa é a quantidade total de matéria viva existente em um ecossistema ou numa população animal ou vegetal. Os dois conceitos estão, portanto, interligados, embora sejam diferentes. Na definição de biomassa para a geração de energia, excluem-se os tradicionais combustíveis fósseis, embora estes também sejam derivados da vida vegetal (carvão mineral) ou animal (petróleo e gás natural), mas são resultado de várias transformações que requerem milhões de anos para acontecerem.

A busca pela eficiência energética no setor de saneamento incentiva a pesquisa pelas diferentes formas de biomassa geradas principalmente nos serviços de esgotamento sanitário e de gerenciamento dos resíduos sólidos (BONN, 2011; OPEL 2012; GILTNER *et al.*, 2012; SCHÖBITZ *et al.*, 2012; FRENOUX, *et al.*, 2012; ROBBINS *et al.*, 2012). A energia química contida nos esgotos sanitários pode ser

convertida em diferentes formas de energia (mecânica, calorífica e elétrica), embora nos modelos de saneamento coletivo vigentes, somente uma parte da energia inicial chegue às estações de tratamento (BEJARANO, 2009).

O transporte do esgoto, ao longo das redes coletoras, resulta na degradação significativa dessa energia, devido à ação de processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no interior das infraestruturas (redes coletoras e estações elevatórias). Portanto, o desenvolvimento de novos modelos de saneamento encontra-se em curso ainda em escala incipiente em vários países do mundo (NAKATO *et al.*, 2013; MACLEOD, 2012; TALSMA *et al.*, 2012; ARAMBURU *et al.*, 2013). Dentre esses, assume posição de destaque a ideia de se eliminar o carreamento hídrico dos excretas com vistas à conservação de água (MACLEOD, 2012), à reciclagem de nutrientes (OPEL, 2012; GILTNER *et al.*, 2012; SCHÖBITZ *et al.*, 2012; FRENOUX *et al.*, 2012; ROBBINS *et al.*, 2012) e à recuperação de energia (BONN, 2011; ARAMBURU *et al.*, 2013).

Muitos autores reportam o uso de excrementos como fonte de energia (MOHAMMED *et al.*, 2012; MIRANDA *et al.*, 2012; AMJID *et al.*, 2011; MACEDO ALVES, 2007; BARROS *et al.*, 2009), porém quase todos voltados para a geração de biogás pelo processo de digestão anaeróbia. A fundamentação é lógica, pois se o carreamento hídrico resulta em perda do potencial energético dos excretas misturados à água, então é melhor que se recorra a excretas diretamente como fonte de energia.

Em que pese o conhecimento adquirido nos últimos anos sobre o assunto, quase não há informação disponível na literatura especializada sobre o potencial energético das fezes humanas. Há registros de informações sobre o poder calorífico das fezes de vários animais, sem que aí se incluam os seres humanos. Por conseguinte, qualquer tentativa de análise de viabilidade da implantação de um sistema de ecosaneamento, por ora ainda se choca com a ausência das informações necessárias para a realização dos balanços energéticos.

Outro aspecto importante da presente pesquisa refere-se à utilização dos conceitos de energia e exergia para elaboração dos estudos comparativos entre diferentes processos de saneamento, qualificação e quantificação e aos impactos ambientais (SZARGUT *et al.*, 1988; HELLSTROM, 1997; AGUDELO *et al.*, 2007; LAMAS, 2013; MUGA *et al.*, 2008; KHOSRAVI *et al.*, 2013; REDDY, 2010; ROSEN *et al.*, 2008; GALLEGOS-MUÑOZ, 2003). O conceito de exergia potencializa as ferramentas para análise não somente dos impactos ambientais, mas também das medidas e processos necessários para a mitigação desses impactos, e se torna uma escolha natural para assegurar a quantidade e qualidade dos recursos, além de outros parâmetros (OLIVEIRA Jr., 2013). Sem essa abordagem, qualquer tentativa de comparação entre sistemas de saneamento terá uma amplitude limitada aos aspectos energéticos em si, não contemplando a parte relacionada aos impactos ambientais.

A existência de outras tecnologias de conversão, como a gaseificação, por exemplo, que, embora não seja uma tecnologia nova, pois data da 2ª Guerra Mundial (ANDRADE, 2007), vem ganhando força devido a alguns aspectos relevantes: no caso do presente trabalho, destacam-se a elevada temperatura de processo como agente esterilizante, o gás gerado como fonte de energia e as cinzas como possível fertilizante na agricultura.

Portanto, com base no exposto anteriormente, realizou-se um estudo sobre o potencial energético de um sistema de ecosaneamento contemplando a geração de energia a partir das fezes humanas em um gaseificador de biomassa. Nos cenários aventados, o gás oriundo da decomposição termoquímica (singás) poderá ser usado como fonte de calor ou em um motogerador para gerar energia elétrica, as cinzas como corretivo de solo, e o calor dissipado no processo como fonte de energia térmica para uso geral.

A eficiência desse sistema foi avaliada do ponto de vista da exergia, tomando-se como referência os parâmetros: Eficiência Exergética Ambiental e Índice Exergético de Renovabilidade discutidos por SZARGUT *et al.*, (1988), e HELLSTROM (1997).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a capacidade de geração de energia renovável através da conversão termoquímica, utilizando como matéria prima a biomassa fecal humana em um gaseificador de biomassa com capacidade para 20 kW, instalado no Laboratório de Motores de Combustão Interna da UFES.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

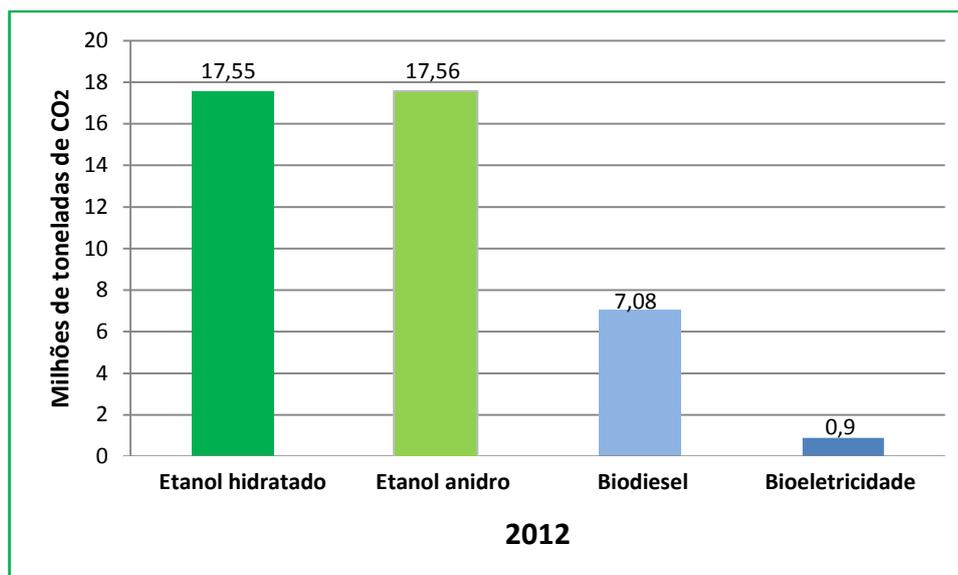
- Caracterizar físico-química e termoquimicamente a biomassa fecal humana;
- Avaliar a influência da dieta calórica de um indivíduo adulto sobre o poder calorífico da biomassa fecal humana;
- Avaliar a produção do biocombustível singás a partir da biomassa fecal humana, avaliando, concomitantemente, a composição dos gases, das cinzas e de outros resíduos gerados;
- Avaliar os resultados do desempenho do sistema de ecosaneamento com produção de singás, tomando como referência os parâmetros eficiência exergética ambiental e índice exergético de renovabilidade.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Agência Internacional de Energia (IEA, 2012) estimou que, se falhar a tentativa de diminuir a dependência de combustíveis fósseis, as emissões de gases de efeito estufa no mundo irão aumentar em um terço até 2020 e quase dobrar até 2050, com aumento da temperatura estimado em 6 °C. Para minimizar essas emissões, com vistas a um aumento da temperatura de até 2 °C, implicaria um corte drástico de, pelo menos, metade das emissões de CO<sub>2</sub>, tendo como referência 2013.

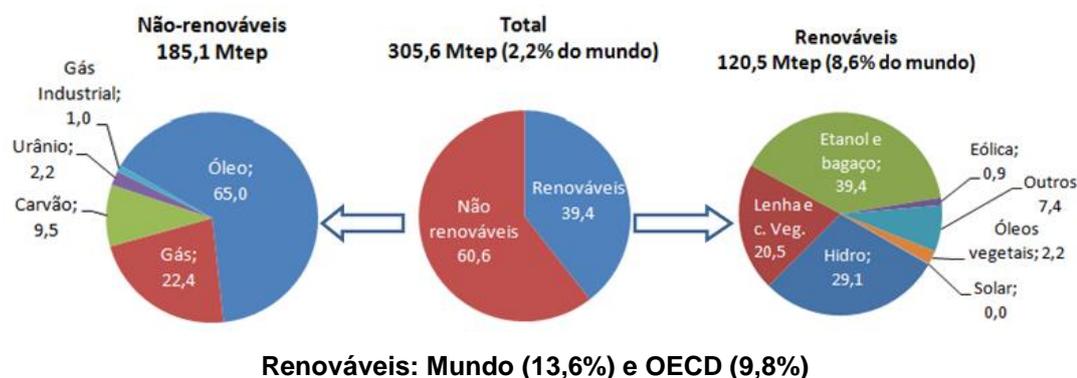
Ainda segundo a IEA (2015), para enfrentar esse grave desafio é imprescindível a implementação do uso de energias renováveis. Estas hoje equivalem a 13,8% da oferta mundial de energia primária, desempenhando um papel crucial em muitos países em desenvolvimento onde se fornece energia básica para cozinhar e para aquecimento. O uso de combustíveis limpos e fora da rede de fornecimento adicional de energia elétrica de biomassa, nos países em desenvolvimento, é a principal medida para melhorar a situação atual e alcançar o acesso universal para desafogar as instalações de energia até 2030.

Segundo a Empresa de Pesquisa de Energia (EPE, 2012), o uso de biocombustíveis na matriz energética nacional proporcionou uma significativa redução nas emissões de gases de efeito estufa. O gráfico da Figura 3-1 apresenta as emissões evitadas, medidas em toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>, decorrentes do uso de biocombustíveis renováveis (etanol anidro e hidratado, e biodiesel), em detrimento de seus equivalentes fósseis: gasolina e diesel.



**Figura 3-1:** Emissões evitadas (em milhões de toneladas de dióxido de carbono) com biocombustíveis no Brasil, em 2012. **Fonte:** EPE (2012).

Segundo o Ministério das Minas e Energia (MME, 2015), as fontes renováveis no Brasil, em 2014, somaram 39,4%, contra 9,8% nos países da *Organisation de Coopération et de Développement Économiques* (OECD) e 13,8% na média mundial. A oferta interna de energia distribuída por fontes, no ano de 2014 é apresentada no gráfico da Figura 3-2. Ainda, segundo o MME, das energias renováveis (39,4%), 62,6% são provenientes de biomassa.



**Figura 3-2:** Oferta interna de energia (em porcentagem) no Brasil, em 2014. **Fonte:** MME (2015).

### 3.1 GERAÇÃO DE RESÍDUOS FECAIS NO BRASIL E NO MUNDO

No que se refere à produção de fezes por humanos, existem, na literatura, dados bastante expressivos de seu quantitativo anual (Tabela 3-1).

**Tabela 3-1:** Quantidade excretada de fezes por pessoa/ano, segundo alguns autores.

		<b>Kg/pessoa.ano (base úmida)</b>
Torendel (2010)		25,5 a 189
Schouw et al., (2002)		30 a 40
Jönsson e Vinnerås (2004)		30 a 40
Otterpohl (2002)		25 a 50
WHO (2010) – média		54
Missar (1997)		25,5 a 189
Münch (2005)	Suécia	51
	China	115
	Kenia	190

NIWAGABA (2009) reporta que a quantidade excretada varia de região para região ou país, e que os principais nutrientes (fósforo, nitrogênio e potássio) presentes nas fezes (que têm origem na composição do alimento ingerido), também variam de indivíduo para indivíduo. Segundo JÖNSSON *et al.*, (2004)<sub>b</sub>, essa variação ocorre também entre homens, mulheres e crianças e nas diferentes classes sociais dentro de um mesmo país.

GUYTON (2002) reporta, também, que a quantidade de fezes produzida por uma pessoa depende da composição do alimento ingerido. Alimentos pobres em fibras, tais como carne e ovos, resultam em menor quantidade (massa e volume) de fezes do que alimentos ricos em fibras. A produção fecal nos países desenvolvidos, segundo LENTNER *et al.*, (1981), é de, aproximadamente, 80-140 g por pessoa/dia (base úmida) de fezes, o que corresponde em torno de 25-40 g por pessoa/dia de matéria seca.

Tendo em vista os quantitativos dos excretas humanos, e os grandes impactos na saúde da população e no meio ambiente, a eles relacionados, essa biomassa vem recebendo em todo mundo uma atenção especial, tanto no campo de otimização dos sistemas de saneamento, como na produção de energia (WIN-SA, 2013).

## 3.2 ESTADO DA ARTE DO TRATAMENTO DE RESÍDUOS FECAIS

### 3.2.1 Estabilização dos Excretas

Os excretas humanos possuem matéria orgânica instável, constituída de poucas substâncias simples como hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), Carbono (C), enxofre (S) e fósforo (P) que, combinadas de diversas maneiras e proporções, formam a imensa variedade de compostos orgânicos em estado sólido, líquido e gasoso (FUNASA, 2004).

Ainda segundo FUNASA (2004), os excretas lançados no solo sofrem ação de natureza bioquímica, pela presença de bactérias saprófitas, até sua mineralização. A matéria orgânica pode sofrer decomposição aeróbia (oxidação) devido à presença de oxigênio ou anaeróbia (redução) devido à falta de oxigênio. A primeira acontece na superfície enquanto a segunda acontece no interior da biomassa. Entretanto, se a mesma massa for diluída em grande volume de água contendo oxigênio dissolvido, a decomposição pode ser totalmente aeróbia, porque essas condições propiciam um íntimo contato das substâncias orgânicas tanto com o oxigênio como com as bactérias aeróbias. Além de a decomposição aeróbia não produzir maus odores, processa-se em período de tempo menor que a anaeróbia. A decomposição anaeróbia, para total estabilização da matéria orgânica, requer várias semanas e até meses, enquanto a aeróbia pode efetivar-se em termos de horas.

### 3.2.2 Sobre a Caracterização das Fezes

#### 3.2.2.1 Composição

Existe uma vasta literatura abordando a caracterização físico-químico-biológica das fezes humanas. GUYTON e HALL (2002) e AIRES (2008) descrevem as fezes humanas como sendo compostas por cerca de 80% de água, sendo os 20% da fração sólida constituída por, aproximadamente, 30% de bactérias mortas, de 10 a 20% de gordura, de 10 a 20% de matéria inorgânica e cerca de 30% de resíduos não digeridos (fibras de celulose, hemicelulose e pectinas) e, ainda, de 2 a 3% de proteína. Do ponto de vista biológico, podem conter elevadas concentrações de vírus patogênicos, ovos de helmintos e cistos de protozoários (FAECHEM *et al.*, 1983).

TONANI (2010) apud (SALAS, 2005) também reporta que as fezes são compostas por restos alimentares, alimentos não processados na digestão, gorduras, hidratos de carbono, proteínas extraídas da corrente sanguínea e de material não digerido que passa pelo intestino, além de uma grande quantidade de microrganismos, podendo atingir 1 bilhão por grama de fezes. A Tabela 3-2 apresenta algumas características das fezes humanas.

**Tabela 3-2:** Quantidade, composição e características de fezes humanas. Adaptada de TONONI (2010).

<b>Quantidade aproximada</b>	<b>Fezes</b>
Peso úmido por pessoa por dia (g/ppd)	70-520
Peso seco por pessoa/dia (g/ppd)	30-70
Umidade (% mássico)	66-85
Matéria orgânica (% mássico)	88-97
Nitrogênio (%)	5,0-7,0
Fósforo total (%)	0,69-2,5
Carbono (%)	44-55
Proteína (g)	4-12
Lipídios totais (g)	4-6
Polissacarídeos (g)	4-10

### 3.2.2.2 Nutrientes

REBOUÇAS (2010) relata que as fezes contêm nutrientes solúveis em água e nutrientes que estão contidos em grandes estruturas não solúveis em água, e que a disponibilidade desses nutrientes para as plantas é menor quando comparada à urina, pelo fato de que uma grande proporção de nitrogênio e fósforo de origem fecal é proveniente de matéria não digerida no organismo. Acrescenta, ainda, que o nitrogênio e o fósforo só são absorvidos pelas plantas na forma solúvel e, para isso, eles precisam ser degradados no solo. Outra característica é a presença de material rico em carbono recalcitrante.

Entende-se como carbono recalcitrante aquela fração que não pode ser imediatamente utilizada como fonte de carbono pela microbiota e que tende a permanecer mais tempo no ambiente, representado principalmente pela lignina, pigmentos, resinas e ceras (carbono insolúvel em água).

Segundo NIWAGABA (2009), o teor de nutrientes das fezes origina-se no alimento ingerido e a distribuição desse teor para a fração fecal é estimada nas seguintes proporções: 10-20% de nitrogênio, 20-25% de fósforo e 10-20% de potássio e cerca de 20% de nitrogênio fecal é a amônia bioquimicamente degradada de proteínas, peptídeos e aminoácidos. Em torno de 17% desse valor encontra-se em bactérias vivas, e o restante, em nitrogênio orgânico combinado em moléculas tais como ácido úrico e enzimas (LENTNER *et al.*, 1981).

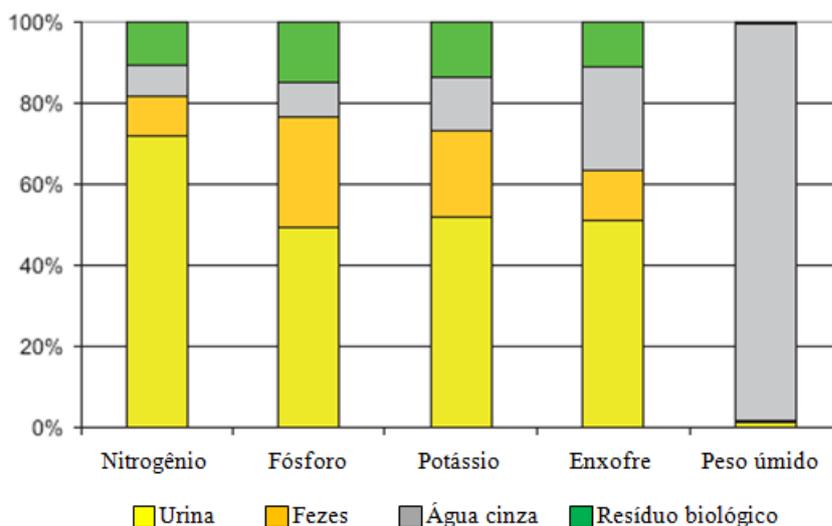
TONANI (2010) realizou uma pesquisa sobre biodegradabilidade aeróbia de resíduo de origem fecal considerando uma taxa de geração de fezes de 150g por pessoa/dia (g/ppd). Com base nesse quantitativo, alguns nutrientes foram avaliados e são apresentados na Tabela 3-3.

**Tabela 3-3:** Caracterização físico-química do material fecal bruto. **Fonte:** TONANI (2010).

Material fecal bruto	Valores médios						
	Nitrogênio total	Fósforo total	Carbono orgânico	Óleos & graxas	Sólidos totais	Sólidos voláteis	umidade
g/L	9,8	4,3	134	0,004	239	25	761
g/ppd	1,5	0,7	20,1	0,001	35,9	3,8	114,1

Ainda segundo TONNONI (2010), o carbono orgânico é de grande relevância, já que se trata de um dos principais responsáveis pela poluição das águas devido aos processos metabólicos microbianos que requerem grande consumo de oxigênio e, também, em virtude de seu quantitativo ser considerado elevado (134 g/L).

NIWAGABA, (2009), apud LENTNER *et al.*, (1981) e VINNERÅS *et al.*, (2006) reportam que, dentre os dejetos domésticos, a urina é que contém a maior parte dos nutrientes para as plantas. Em medições realizadas na Suécia, chegou-se a valores anuais de 2,5-4,3 kg de N, 0,4-1 kg de P e 0,9-1,0 kg K. Algumas proporções desses nutrientes encontrados nos dejetos domésticos são apresentadas no gráfico da Figura 3-3.



**Figura 3-3:** Proporções de nutrientes encontrados em águas residuais domésticas e resíduos biológicos na Suécia. **Fonte:** NIWAGABA, (2009) apud JONSSON *et al.*, (2005)<sub>a</sub>

Pode-se observar na Figura 3-3 que, embora não tenha os quantitativos predominantes, as fezes apresentam percentuais significativos de N (~10%), P (~27%), K (~20%) e S (~14%).

Outros componentes constituintes das fezes humanas, narrados por VINNERÅS *et al.*, (2006), são apresentados na Tabela 3-4.

**Tabela 3-4:** Teores de metais pesados nas fezes humanas. Fonte: VINNERÅS *et al.*, (2006)

Componentes	Z <sub>n</sub>	C <sub>u</sub>	N <sub>i</sub>	C <sub>r</sub>	P <sub>b</sub>	C <sub>d</sub>	H <sub>g</sub>
(mg)	11	1,1	0,07	0,02	0,02	0,01	0,01

Ainda segundo VINNERÅS *et al.*, (2006), todos os metais pesados nos excretas humanos vêm do alimento ingerido, e uma grande parcela deles foi removida dos campos com as culturas. Assim, eles poderão retornar ao campo, como fertilizantes, desde que não tenham sido acrescentados de outro meio quando do manuseio, pois, nesse caso, irão ameaçar a sustentabilidade do solo agrícola (JÖNNSON *et al.*, 2004)<sub>b</sub>.

### 3.2.2.3 Organismos Patogênicos nas Fezes

As fezes são a fração dos excretas humanos que contém a maior parte dos microrganismos, devendo ser higienizadas para prevenir a contaminação por meio do manuseio ou para utilização como fertilizante ou condicionador de solos (REBOUÇAS, 2010). Ainda segundo (REBOUÇAS, 2010), a presença dos patógenos nas fezes é consequência da infecção dos indivíduos, refletindo a situação de higiene da própria sociedade. Os principais organismos patogênicos encontrados nas fezes são apresentados na Tabela 3-5:

**Tabela 3-5:** Principais organismos patogênicos excretados nas fezes humanas.

Fonte: (REBOUÇAS, 2010)

Bactérias	Helmintos	Protozoários
<i>Salmonella spp</i>	<i>Taenia saginata (cestóide)</i>	<i>Cryptosporidium parvum</i>
<i>Escherichia coli (patogênica)</i>	<i>Taenia solium (cestóide)</i>	<i>Entamoeba histolytica</i>
<i>Campylobacter jejuni/coli</i>	<i>Hymenolepsis nana (cestóide)</i>	<i>Giardia lamblia</i>
<i>Shigela spp</i>	<i>Ascaris lumbricoides (nemátodo)</i>	<i>Balantidium coli</i>
<i>Vibrio cholera</i>	<i>Stongyloides stercoralis (nemátodo)</i>	
<i>Yersinia enterocolitica</i>	<i>Enterobius vermicularis (nemátodo)</i>	
<i>Leptospira icterohaemorrhagiae</i>	<i>Trichuris trichiura (nemátodo)</i>	
	<i>Ancylostoma duodenale (nemátodo)</i>	
	<i>Necator americanus (nemátodo)</i>	

### 3.2.3 Tratamento das Fezes

O tratamento das fezes para a redução ou eliminação dos patógenos pode ser realizado por diversos processos, sendo uns mais e outros menos eficientes. VINNERÅS *et al.*, (2006) apresentam alguns dos processos convencionais para esse objetivo, os quais são descritos sucintamente a seguir:

#### 3.2.3.1 Armazenamento

O processo de armazenamento consegue eliminar a maioria dos patógenos se as fezes forem mantidas secas por 1,5 a 2 anos em temperatura de até 20 °C.

#### 3.2.3.2 Compostagem

É frequentemente realizada para converter resíduos potencialmente degradáveis em um produto benéfico pelo fato de ocorrerem reações exotérmicas com aumento interno de temperatura, gerando humos e matéria orgânica para condicionamento do

solo, geralmente livre de patógenos. A compostagem é influenciada por vários fatores, os quais são descritos a seguir:

- Umidade:

Ajuda no transporte de nutrientes dissolvidos para as atividades metabólicas e fisiológicas dos microrganismos que vão transformar a matéria orgânica. Para um bom desempenho, a umidade deve ficar na faixa de 25-80% (ahn et al., 2008)

- pH:

A maioria das bactérias não pode sobreviver em ambientes com  $\text{pH} \geq 3$ , começa a sucumbir com  $\text{pH} > 10,5$ , e uma morte significativa ocorre com  $\text{pH} > 11,5$ . A umidade e pH e competição entre os microrganismos podem contribuir para a redução ou destruição dos organismos patógenos nos compostos (REBOUÇAS, 2010).

- Oxigênio:

Promove a respirometria do solo contribuindo para o desenvolvimento dos microrganismos essenciais para a decomposição da matéria orgânica.

- Temperatura:

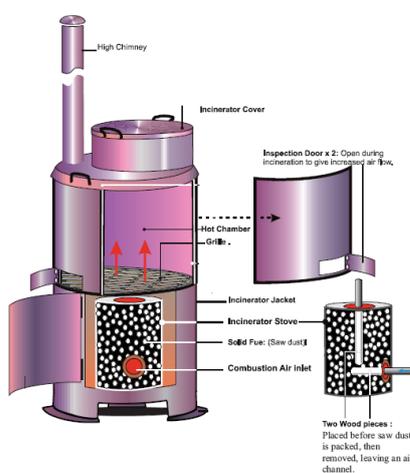
É determinante para os processos de compostagem e para a eliminação total dos microrganismos. Abaixo de 20 °C ela retarda ou impede o processo de compostagem. 40-45 °C é a faixa ótima, e o limite de compostagem é de 50-67 °C. (HAUG, 1993). A combinação letal para todos os patógenos excretados nas fezes, incluindo o mais resistente *Ascaris*, é 1 hora em temperatura  $\geq 62^\circ\text{C}$ , 1 dia a  $\geq 50^\circ\text{C}$  e 1 semana a  $\geq 46^\circ\text{C}$  (REBOUÇAS, 2010). Ainda, segundo (REBOUÇAS, 2010) apud (MADIGAN E MARTINKO, 2006; WICHUK E MCCARTNEY, 2007), As temperaturas elevadas inativam, de maneira irreversível, as enzimas de bactérias, protozoários e helmintos e causam danos na estrutura viral através da desnaturação das proteínas, e conclui que o grau de inativação térmica dos patógenos é uma função tanto da temperatura quanto do tempo de exposição.

- Relação Carbono e Nitrogênio (C:N):

Para o crescimento, os micro-organismos exigem carbono digerível para a energia e nitrogênio para a síntese celular e, durante o metabolismo aeróbio, esses micróbios usam cerca de 15 a 30 partes C para cada parte N. Se essa relação for maior que 35, eles tendem a se proliferar tendo muitos ciclos de vida. No entanto, se a relação cai, decai também o crescimento microbiano. VINNERÅS *et al.*, (2006) apud (HAUG, 1993).

### 3.2.3.3 Incineração

A incineração consiste na exposição da matéria orgânica a temperaturas em torno de 900 °C, oferecendo um tratamento que não só destrói patógenos, mas também promove uma redução de volume superior a 90% e redução de peso em torno de 75%, dependendo do tipo de biomassa (VINNERÅS *et al.*, 2006). Ainda, segundo esse autor, é um processo compacto e rápido, ou seja, a inativação é alcançada rapidamente. Um cuidado especial deve ser dado quando a incineração envolver materiais com cloretos inorgânicos ou orgânicos, pois estes produzem mais dioxinas do que materiais sem cloretos, e a formação dessas dioxinas ocorre a temperaturas superiores a 450 °C, sendo reduzida significativamente a temperaturas acima de 850 °C (SHIBAMOTO *et al.*, 2007). O desenho de um incinerador típico é mostrado na Figura 3-4.



**Figura 3-4:** Ilustração de um incinerador de biomassa utilizado para incineração de fezes. **Fonte:** NIWAGABA (2009), apud MUSAAZI (2006).

### 3.2.3.4 Tratamento Químico

O tratamento químico consiste na adição de produtos que vão facilitar a inativação dos patógenos. Inclue ácidos, bases e agentes oxidantes. São recomendados utilizar produtos que vão adicionar valor agrônômico ao substrato como  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{KOH}$  e  $\text{PO}_4\text{-3}$  que também servirão como fertilizantes (VINNERÅS, 2002).

## 3.3 SISTEMAS DE SANEAMENTO

Existem na literatura várias definições de saneamento com as respectivas tecnologias empregadas para o seu bom funcionamento, desde os sistemas mais simples aos mais complexos.

Segundo o Compêndio de Tecnologias e Sistemas de Saneamento (TILLEY *et al.*, 2014), saneamento é definido como um processo de multietapas no qual os excrementos humanos e águas residuais são geridos desde o ponto de geração até o ponto de utilização ou disposição final, isto é, uma série específica de tecnologias e serviços para a gestão desses resíduos (ou recursos), englobando a coleta, o confinamento, transporte, transformação e utilização ou disposição final.

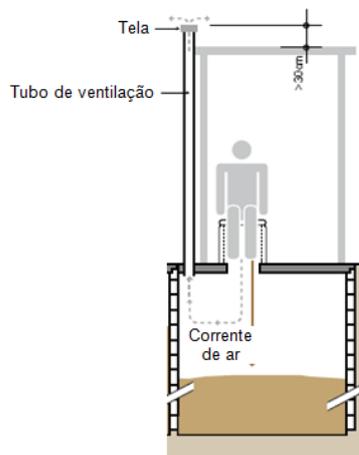
### 3.3.1 Sistemas Convencionais

TILLEY *et al.*, (2014) citam nove modelos de sistemas de saneamento convencionais, os quais são descritos a seguir:

#### 3.3.1.1 Sistema de Fossa Simples

Esse sistema (Figura 3-5) baseia-se na utilização de um único poço para coletar e armazenar excrementos. Os fluxos de entrada podem ser urina, fezes, água de limpeza anal, água de enxágue e papel higiênico. Esse processo é altamente patogênico, e, se não tratado, o contato humano e aplicação direta na agricultura

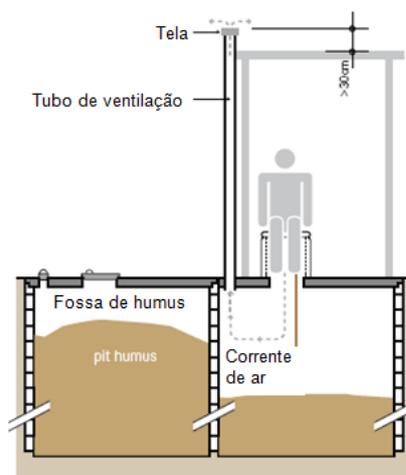
devem ser evitados. Outro fator que deve ser levado em consideração é o nível do lençol freático devido ao grande risco de contaminação.



**Figura 3-5:** Sistema de fossa simples. Fonte: (TILLEY *et al.*, 2014)

### 3.3.1.2 Sistema de Fossa Seca sem Produção de Lodo

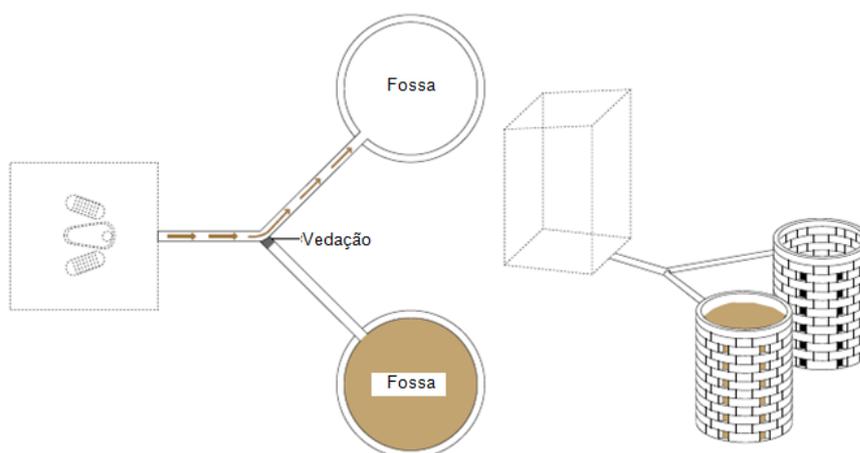
Sistema projetado para produzir material sólido similar à terra, com uso alternativo de fossa e câmara de compostagem (Figura 3-6). Os fluxos de entrada podem ser urina, fezes, materiais orgânicos, água de limpeza anal e papel higiênico. Esse sistema permite o uso alternativo das fossas: enquanto uma está em uso, a outra está funcionando como câmara de armazenamento e compostagem servindo como um sistema de tratamento. Se operadas de forma correta, o produto gerado é semelhante a húmus e pode ser manuseado com segurança.



**Figura 3-6:** Sistema de fossa seca sem produção de lodo. Fonte: (TILLEY *et al.*, 2014)

### 3.3.1.3 Sistema de Fossa de Pouco Carreamento Hídrico sem Produção de Lodo

É um sistema baseado no uso restrito de água, a qual só é utilizada para o enxágue da bacia (Figura 3-7). Consiste em um piso nivelado ou pedestal de agachamento e fossas gêmeas para trabalharem com funções alternadas: quando uma fossa fica cheia, ela é encoberta para promover a degradação da biomassa que dura em torno de dois anos, enquanto a outra fica sendo usada. Gera um produto parecido com húmus parcialmente digerido, que pode ser usado como um condicionador do solo. É apropriado para meio rural e periurbano. Como as fossas são interligadas com material poroso para permitir a infiltração da água, o sistema não deve ser instalado em locais onde o lençol freático é próximo à superfície do solo.

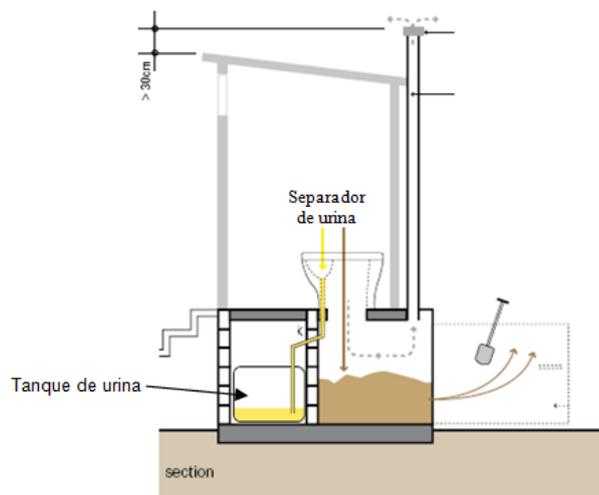


**Figura 3-7:** Sistema de Fossa de Pouco Carreamento Hídrico Sem Produção de Lodo.

**Fonte:** (TILLEY *et al.*, 2014)

### 3.3.1.4 Sistema de Fossa sem Água, com Separação de Urina

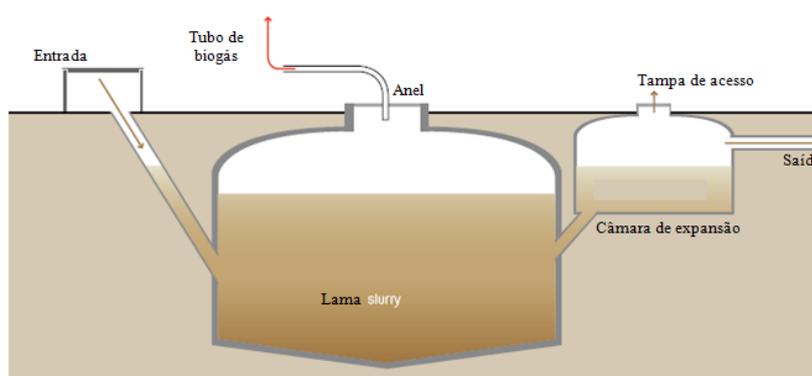
Esse sistema é concebido para separar urina das fezes, sendo as fezes conduzidas para desidratação, e a urina para outro uso como fertilizante (Figura 3-8). Os fluxos de entrada podem ser fezes, urina, água de limpeza anal e papel higiênico. A principal tecnologia empregada nesse sistema é a bacia sanitária seca, segregadora, que permite a coleta separada de urina e fezes.



**Figura 3-8:** Sistema de Fossa Sem Água Com Separação de Urina. **Fonte:** (TILLEY *et al.*, 2014)

### 3.3.1.5 Sistema Biogás

Esse sistema baseia-se na utilização de um reator de biogás (também chamado de digestor anaeróbico para coletar, armazenar e tratar os excrementos (Figura 3-9). Além disso, o reator produz biogás que pode ser usado diretamente em fogões para cozinhar, para iluminação ou para produzir eletricidade por meio de um motor gerador. Os fluxos de entrada podem ser urina, fezes, água de enxágue, água de limpeza anal, e papel higiênico, outros materiais orgânicos (resíduos de mercado ou de cozinha) e, se disponível, resíduos animais.



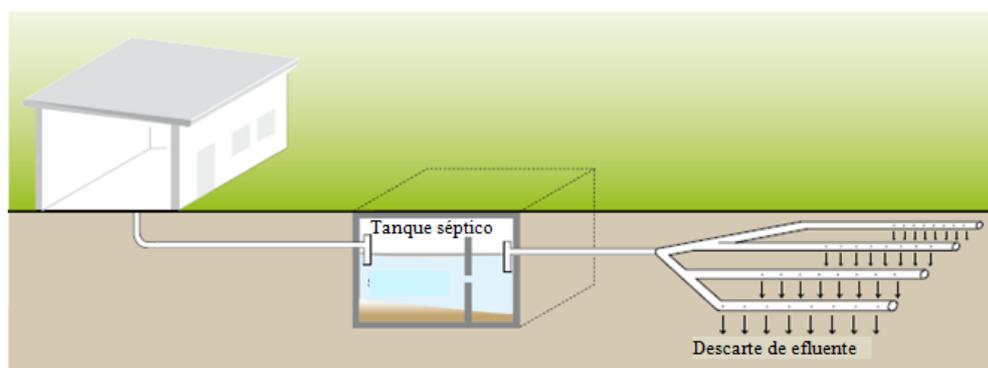
**Figura 3-9:** Sistema com reator de biogás. **Fonte:** (TILLEY *et al.*, 2014)

### 3.3.1.6 Sistema de Tratamento de Água Negra, com Infiltração

É um sistema à base de água que requer carreamento hídrico e tecnologia de coleta, tratamento e armazenagem (Figura 3-10). Necessita de grande quantidade de água. Os fluxos de entrada podem ser urina, água de enxágue, água de limpeza anal, papel higiênico e águas cinzas. Embora, nesses casos, o emprego mais comum seja uma bacia sanitária com descarga, pode ser usado também um sistema com agachamento descrito no item (c). Os dejetos são carreados para um sistema de pré-tratamento que pode ser um tanque séptico, um reator anaeróbio compartimentado, ou um filtro anaeróbio. Embora o processo anaeróbio reduza a carga de organismos patogênicos, o efluente ainda não está preparado para a disposição final, devendo ser finalmente tratado em uma lagoa facultativa.

Algumas terminologias para as águas do saneamento são frequentemente utilizadas. As definições são aqui apresentadas (SAWYER, 2004):

- Água negra (*blackwater*): efluente proveniente dos vasos sanitários, incluindo fezes, urina e papel higiênico;
- Água marrom (*brownwater*): efluente contendo somente fezes;
- Água cinza (*greywater*): águas servidas, excluindo o efluente do vaso sanitário;
- Água amarela: representando somente a urina;

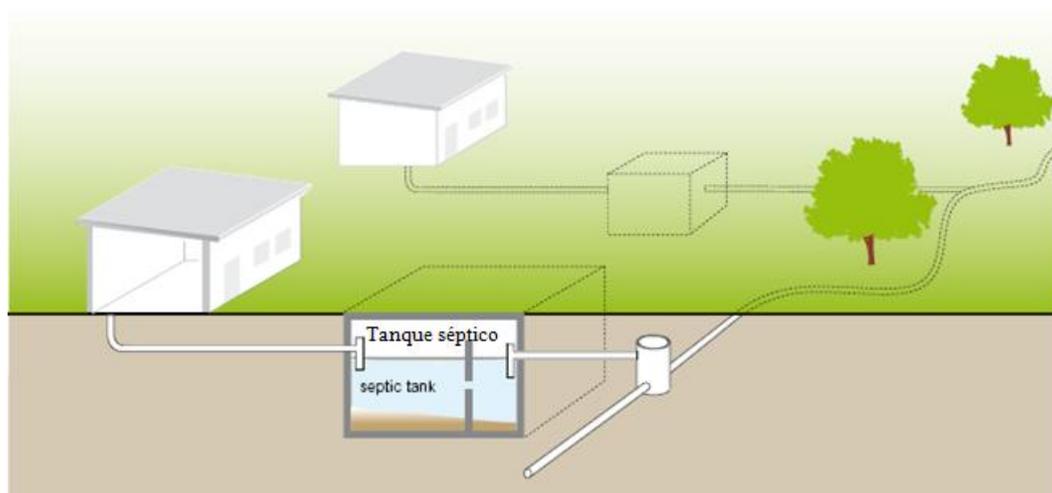


**Figura 3-10:** Sistema de Tratamento de Água Negra Com Infiltração. **Fonte:** (TILLEY *et al.*, 2014)

### 3.3.1.7 Sistema de Tratamento de Água Negra, com Transporte de Efluente

Esse sistema é caracterizado pelo uso de uma tecnologia em nível familiar para remover e digerir sólidos sedimentáveis de água negra (Figura 3-11). Possui sistema de esgoto para transporte de efluente até uma estação de semitratamento centralizada. Os fluxos de entrada podem ser excrementos, urina, água de enxágue, água de limpeza anal, papel higiênico e água cinza. O efluente (de fossas sépticas, reator anaeróbio compartimentado ou filtros anaeróbios) é transportado para um sistema de semitratamento centralizado por meio de unidades coletoras. Como o efluente é livre de sólidos sedimentáveis, permite a utilização de tubos de pequeno diâmetro. Embora não seja recomendado, o efluente pode, também, alternativamente, ser descarregado para a rede de drenagem de água pluvial. Mas isso só se deve fazer se a qualidade do efluente for alta ou se o transporte para uma estação de tratamento não for viável.

Esse sistema é especialmente indicado para assentamentos urbanos onde o solo não é adequado para infiltração de efluentes. A rede de esgoto pode ser rasa sendo, também, recomendado para áreas onde o nível do lençol freático é alto.

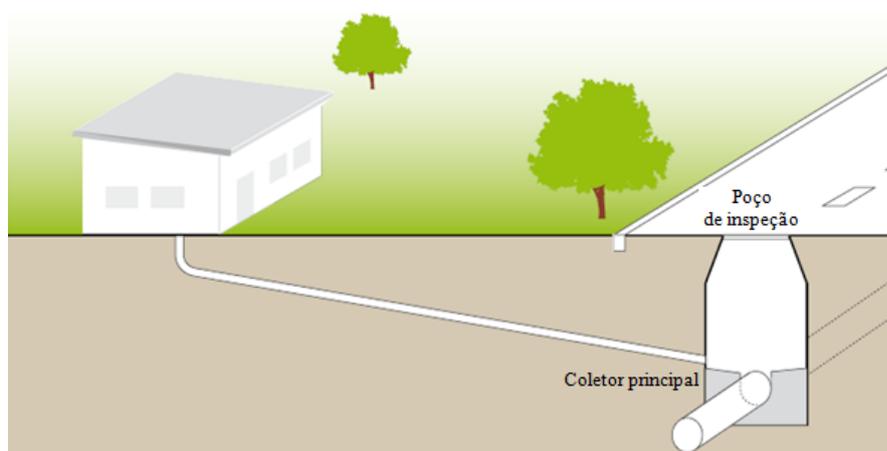


**Figura 3-11:** Sistema de Tratamento de Água Negra com Transporte de Efluente.

**Fonte:** (TILLEY *et al.*, 2014)

### 3.3.1.8 Transporte de Água Negra para Sistema de Semitratamento Centralizado

É um sistema de esgoto à base de água no qual a água negra é transportada para uma estação de tratamento centralizada ou semicentralizada (Figura 3-12). A característica importante desse sistema é que não existe tratamento de recolhimento e armazenagem. Os fluxos de entrada podem ser fezes, Urina, água de enxágue, água de limpeza anal, papel higiênico, água cinza e, eventualmente, águas pluviais. Nesse sistema, a água negra que é gerada na bacia sanitária e também as águas cinzas são diretamente transportadas para uma estação de semitratamento centralizada por meio de uma rede coletora simplificada ou uma rede de esgotos convencional por gravidade.



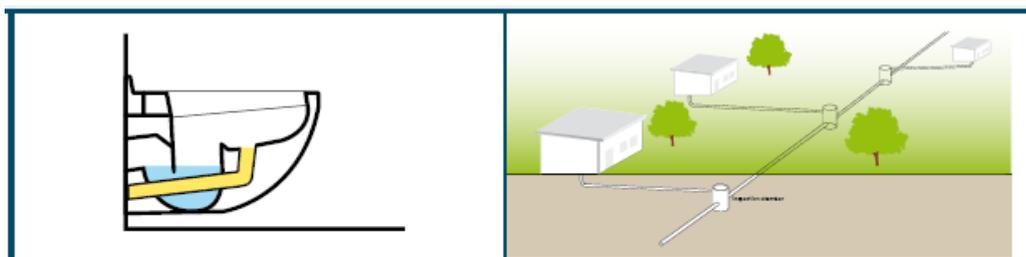
**Figura 3-12:** Transporte de Água Negra Para Sistema de Semi-Tratamento Centralizado.

**Fonte:** (TILLEY *et al.*, 2014)

### 3.3.1.9 Sistema de Esgoto, com Desvio de Urina

É um sistema à base de água que requer uma bacia sanitária com separador de urina (Figura i1). Permite a coleta seletiva da urina sem mistura com água, embora a água seja usada para carreamento das fezes. Os fluxos de entrada podem ser fezes, urina, água de enxágue, água de limpeza anal, papel higiênico, água cinza e, eventualmente, águas pluviais. Mictório adicional pode ser instalado para a coleta efetiva de urina. Água marrom é transportada diretamente para uma estação de

tratamento centralizada, conforme Figura 3-13, ou por meio de rede convencional de esgoto por gravidade. A água cinza é transportada no esgoto com a água marrom sem separação. Esse sistema só é apropriado quando existe a necessidade de segregar a urina ou quando se deseja limitar o consumo de água. A diminuição de nutrientes, removendo a urina, pode otimizar o processo de tratamento.



**Figura 3-13:** Sistema de Esgoto Com Desvio de Urina.

**Fonte:** (TILLEY *et al.*, 2014)

### 3.3.2 Problemas Relacionados aos Sistemas de Tratamento de Esgoto

#### 3.3.2.1 Sistemas Convencionais

Dentre os sistemas de tratamento citados anteriormente, quatro se destacam por utilizarem fluxo intenso de água para o carreamento das fezes: Sistema de Tratamento de Água Negra Com Infiltração, Sistema de Tratamento de Água Negra Com Transporte de Efluente, Transporte de Água Negra Para Sistema de Semitratamento Centralizado e Sistema de Esgoto Com Desvio de Urina.

Esses sistemas estão hoje sob forte questionamento, pois a água, quando usada com a finalidade de diluição e transporte de dejetos, contamina-se com matéria orgânica e microrganismos, entre outros (TONONI, 2010). Além disso, a poluição das águas por esgotos predominantemente domésticos tem como consequência um baixo nível de oxigênio dissolvido devido à carga de matéria orgânica, um decaimento de sua flora bacteriana face à contaminação por microrganismos patogênicos e a eutrofização dos mananciais, principalmente lagos e represas, que

acabam por receber alta concentração de nitrogênio e fósforo (VON SPERLING, 2005).

WERNER et al. (2009) citam as principais desvantagens dos sistemas de tratamento de esgotos convencionais, quais sejam:

- Tratamento quase sempre deficiente ou lançamento sem controle de mais de 90 % das águas residuárias em todo o mundo;
- Uso de água potável para carreamento das excretas;
- Poluição de corpos d'água, principalmente por nutrientes, resíduos perigosos, agentes patogênicos, fármacos e hormônios;
- Perda de valiosos nutrientes e elementos através de lançamento de esgotos em corpos d'água;
- Danos ambientais graves e eutrofização dos mananciais;
- Altos investimentos de implantação, alto consumo de energia para operação e manutenção;
- Investimentos frequentes em áreas prósperas em detrimento das populações mais carentes;
- Predominância de sistemas coletivos combinados (esgotamento de água pluvial em conjunto com esgoto doméstico), gerando sérios problemas devido ao lodo de esgoto contaminado.

### 3.3.2.2 Saneamento Ecológico (Ecosaneamento)

Com o passar do tempo, o homem foi se conscientizando de que os sistemas convencionais de saneamento, baseados no carreamento hídrico, implicavam altos custos e elevado consumo de água. Somem-se a isso os graves problemas hídricos e a crise energética que afligem principalmente os países em desenvolvimento. Alternativas para a solução desses problemas, com vistas a um saneamento seguro, estão se tornando objeto de muitas pesquisas por razões econômicas, sociais e ecológicas.

O saneamento ecológico é baseado em três princípios fundamentais: a prevenção da poluição, a desinfecção da urina e das fezes e o uso seguro dos produtos para fins agrícolas, formando um sistema sustentável de ciclo fechado “Sanear e Reciclar” (SAWYER, 2004). Esse conceito trata os excrementos humanos como um recurso onde a urina e as fezes, após devidamente tratadas e livres de patógenos, são devolvidas ao meio ambiente na forma de adubo para as plantas.

Entendem-se como produtos os materiais que são chamados de “resíduos” ou “recursos”. Alguns são gerados diretamente pelo ser humano (por exemplo, urina e fezes), outros são gerados nos processos tecnológicos do saneamento: excrementos em escoamento por meio do esgoto e lodo (SAWYER, 2004).

Trabalhos recentes, apresentados na *2nd International Faecal Sludge Management Conference* (2012), abordaram inúmeros problemas no sistema de saneamento em alguns países da África do sul, onde a rede de esgoto é praticamente inexistente. Em sua grande maioria, a defecação é feita em latrinas com sistemas de coleta (esvaziamento das latrinas), onde o próprio sistema de coleta e a destinação final ainda são um grande desafio a ser resolvido. Nesse evento, vários autores (MACLEOD, 2012; OPEL, 2012; GILTNER *et al.*, 2012; SCHÖBITZ *et al.*, 2012; FRENOUX *et al.*, 2012; ROBBINS *et al.*, 2012) enfocaram a grande dificuldade em se fazer uma coleta e destinação seguras.

Para MACLEOD (2012), um saneamento ideal seria aquele que não necessitasse de quilômetros de tubulação de esgoto e que fosse voltado para um sistema de coleta seguro, com vistas a uma destinação produtiva do lodo fecal, evitando, assim, a contaminação dos aquíferos. A destinação produtiva visa ao uso dos resíduos ou recursos como fonte de energia ou como adubo para o solo.

PURVES e GARDINER (2012) desenvolveram e testaram um sistema de sanitário seco que utiliza sacos de coleta fabricados em filme de polímero biodegradável. Os mecanismos de vedação desenvolvidos por eles permitiram a separação segura de líquidos e sólidos, possibilitando o uso do sanitário com ausência de odores, criando uma barreira para vetores de doenças. Os resíduos e o filme são convertidos em

energia (biogás) e fertilizantes, através de digestão anaeróbia. Um projeto piloto foi implantado em Antananarivo, Madagascar: banheiros foram implantados nas proximidades de um digestor anaeróbio para testar o modelo e oferecer uma solução que garanta a aceitação e seu uso contínuo pela comunidade.

TALSMA *et al.*, (2012) testaram um sistema de gaseificação por meio de plasma para tratar dejetos humanos na Holanda. Em sua pesquisa, eles utilizaram plasma em atmosfera de ar e hélio transformando os dejetos humanos em gás sintético, podendo gerar energia elétrica através de células combustíveis de óxido sólido (SOFC). O poder calorífico das amostras utilizadas foi de 17000 kJ/kg. Os resultados de laboratório mostraram que, com uma chama de plasma de 1kW e um tamanho de reator de 1,5 L, é possível tratar as fezes de, aproximadamente, 1200 pessoas com uma taxa de alimentação de 120 kg de biomassa por dia. Citaram, porém, como inconvenientes, o alto teor de umidade da biomassa (80%), que precisa ser reduzido a valores compatíveis com uma gaseificação eficiente e que a biomassa precisa ser, também, finamente moída para assegurar uma boa superfície de contato.

ARAMBURU *et al.*, (2013) desenvolveram um sistema de tratamento utilizando um reator de pirólise tipo batelada, onde as fezes são aquecidas a temperaturas da ordem de 300 °C (em condições de escassez de oxigênio), gerando um biocarvão e cinzas inertes que podem ser usados como fertilizante na agricultura, possibilitando o aumento da absorção de água e nutrientes. Acrescentaram ainda que o calor gerado nesse processo permitiu a desinfecção da urina, e que o uso do biocarvão como fertilizante promoveu um aumento de 20% a 40% na produção de milho e painço.

JENSSEN (2005) faz uma abordagem sobre o valor dos recursos de águas residuais e o valor dos nutrientes descarregados para os sistemas de esgoto da Noruega que correspondem a um montante de 30 milhões de dólares por ano. Ainda segundo JENSSEN (2005) apud BECKMAN *et al.*, (1991), o fósforo é um recurso limitado cujas previsões de sua escassez são para os próximos 100 a 200 anos, e enfatiza que, para se produzir 1kg do mineral nitrogênio, como fertilizante, são necessários 38 MJ de energia (10,5 kWh). Com base na Figura 3-14, o autor alerta para a perda

de fertilidade do solo que ele chama de lenta, mas dramática, em escala global. No entanto, acrescenta que essa perda pode ser combatida por meio da devolução de resíduos biodegradáveis tratados.



**Figura 3-14:** Situação Global da degradação do solo induzida pelo homem.  
Adaptado de JENSSEN (2005), apud [WWW.FAO.ORG](http://WWW.FAO.ORG)

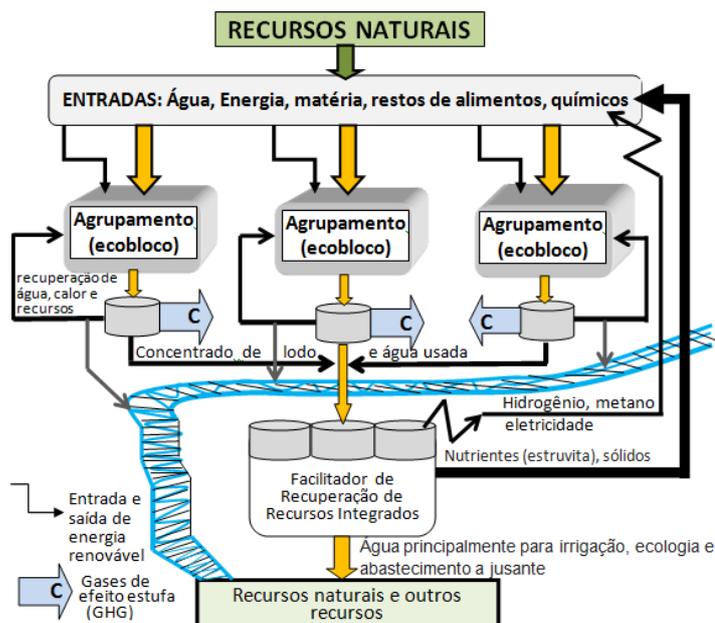
Ainda segundo JENSSEN (2005), o saneamento ecológico leva a uma série de vantagens em relação ao sistema convencional por várias razões, as quais são citadas também por SAWYER *et al.*, (2004) e TONONI (2010), a saber:

- Melhoria da saúde, desviando águas negras do ciclo da água;
- Soluções acessíveis com baixos custos de investimento e de manutenção;
- Aumento de segurança alimentar através de uma melhor disponibilidade de fertilizantes;
- Economia substancial de água por usar banheiros que poupam água potável e reusam as águas cinzas;
- A produção de bioenergia através de soluções integradas para águas residuais e resíduos orgânicos;
- Desenvolvimento econômico pela geração de oportunidades de negócios locais;
- Gestão participativa e aceitação do sistema.

Pesquisas Internacionais têm mostrado que o saneamento seco pode dar uma redução igual ou maior de patógenos e alta redução do risco de exposição (JENSSEN, 2005, apud STENSTRÖM, 2001).

LAZAROVA *et al.*, (2012) fizeram um estudo relacionando consumo de água, consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa em vários países, e concluíram que, para minimizar o consumo de água, energia e geração de gases de efeito estufa, deve haver uma mudança radical de paradigma, onde as cidades do futuro (*ecocidades*) deverão substituir o sistema insustentável de hoje pelo sistema de sustentabilidade o qual está fundamentado em três erres ( $R_s$ ): recuperar, reutilizar e reciclar, ou seja, reutilizar e reciclar água e recuperar os recursos incluindo os nutrientes. Relata ainda que, se melhorias forem feitas nas edificações como aquecimento e refrigeração incorporados na arquitetura, utilização de aparelhos mais eficientes, bombas de calor, captação das chuvas e recuperação de águas pluviais, bem como a recuperação de sólidos orgânicos, gestão de energia e outras melhorias, uma redução de 60% a 70% de energia seria conseguida.

Objetivando atender aos três  $R_s$ , os autores propõem três sistemas de sustentabilidade denominados de Facilitador de Recuperação de Recursos Integrados (*Integrated Resource Recovery Facility - IRRF*), nos quais são apresentadas as formas, equipamentos e processos envolvidos. Um dos sistemas que inclui o interesse desse trabalho é mostrado na Figura 3-15.



**Figura 3-15:** Sistema de gestão de recursos com Facilitador de Recuperação de Recursos Integrados (IRRF). Adaptado de LAZAROVA, *et al.*, (2012).

Esse sistema é composto basicamente por três conjuntos denominados de Agrupamento Gerenciador de Recursos Distribuídos (RMC) ou Ecoblocos e um Facilitador de Recuperação de Recursos Integrados (IRRF). O (RMC) é uma unidade semiautônoma de drenagem/gerenciamento de água que recebe água, implementa a sua conservação no interior dos componentes estruturais em todo o agrupamento, capta e armazena águas pluviais, recupera esgoto para reutilização, tais como descarga de bacias sanitárias, irrigação, lavagem de rua, e fornece vazão ecológica para córregos existentes ou corpos d'água restaurados, recupera a energia térmica da água utilizada, além de recuperar biogás a partir de sólidos orgânicos. Um IRRF é um facilitador de gerenciamento completo para água e recuperação de energia, que aceita sólidos orgânicos, água usada com excesso de concentrado, sólidos, energia elétrica, quantidades de calor maiores que os sistemas tradicionais de "plantas de recuperação de água".

Nesse contexto, encontra-se a gaseificação de biomassa fecal humana, como tratamento das fezes e recuperação de nutrientes, cujo objetivo básico é, além do citado anteriormente, o não uso da água como veículo de carreamento dos excretas.

A Figura 3-16, adaptada de JENSSEN (2005), ilustra um sistema de saneamento ecológico, aqui proposto, que inclui a gaseificação das fezes. No esquema original, somente a urina e as águas cinzas eram recuperadas. No sistema proposto, foi acrescentada, também, a gaseificação. Para essa proposição, a coleta das fezes seria feita por meio de bacias secas segregadoras (separação de urina e sem carreamento hídrico), depositadas em sacos biodegradáveis e conduzidas por gravidade, através de um tubo, para o depósito inferior, e transportada, via caminhão, para o gaseificador. No gaseificador, as fezes são decompostas termoquimicamente gerando singás (energia) e cinzas (nutrientes). Os sacos biodegradáveis têm a função de facilitar o transporte das fezes através dos tubos até o depósito inferior.

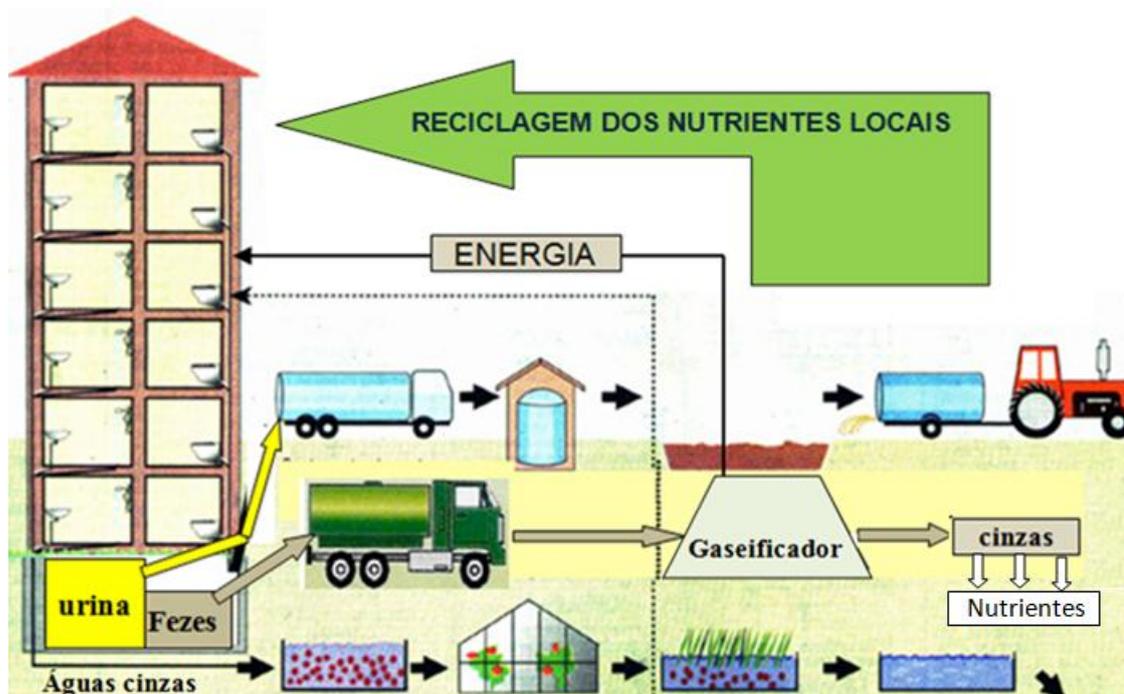


Figura 3-16: Sistema de ecosaneamento com gaseificação da biomassa fecal.

Adaptado de JENSSEN, (2005)

## 3.4 FEZES COMO FONTE DE ENERGIA E NUTRIENTES

### 3.4.1 Fezes como Fonte de Energia

CORTEZ *et al.*, (2008) e Quiotto (2010) estudaram a utilização dos excrementos de animais como fonte de energia. Os primeiros pesquisaram a quantidade excretada/dia por alguns animais (bois, suínos, equinos, aves e ovelhas) e relatam que o esterco seco pode ser queimado diretamente, tendo um poder calorífico da ordem de 14,6 MJ/kg (3489 kcal/kg). O segundo autor fez um estudo do potencial energético, em nível mundial, das fezes de vacas, cabras, ovelhas, porcos e galinhas, concluindo que a produção de gás, utilizando apenas a metade do quantitativo de suas fezes como fonte de energia, equivaleria a 2,28 bilhões de barris de petróleo, ou seja, 8% do consumo mundial.

NAKATO *et al.* (2013) determinaram o poder calorífico do lodo extraído de fossas sépticas e secas visando a sua utilização como combustível sólido. Eles coletaram as amostras em fossas instaladas em várias cidades africanas e concluíram que o poder calorífico superior (17200 kJ/kg), em base seca não variou significativamente com a fonte. Concluíram, ainda, que a idade da fossa seca (ou o tempo de estocagem das fezes nela) não foi determinante na variação do poder calorífico e que o poder calorífico superior (PCS) é semelhante ao poder calorífico de outras biomassas utilizadas como combustível (Tabela 3-6), e, também, que essa biomassa pode ser usada como combustível em indústrias desde que devidamente condicionadas.

QUIRINO *et al.* (2005) fizeram uma determinação do poder calorífico superior (PCS) de várias madeiras das florestas brasileiras e constataram que, na maioria delas, o valor se situa em torno de 4688 kcal/kg (19.615 kJ/kg).

**Tabela 3-6:** Poder calorífico médio (PCS; PCI, em kJ/kg) de algumas biomassas.Adaptada de PTAZINSK (2007); QURINO (2005); (CORTEZ *et al.*, (2008) e QUIOTTO (2010).

Combustível	(PTAZINSK, 2007) (PCI)	Madeiras nacionais (QUIRINO <i>et al.</i> , 2005)	Estrumes de animais (CORTEZ <i>et al.</i> , 2008) e QUIOTTO, 2010)	Lodo de fossas sépticas e seca (NAKATO <i>et al.</i> , 2013)
Carvão vegetal	24839	-	-	
Óleos vegetais	37558	-	-	
Palha	14619	-	-	
Madeira tratada	15290	PCS: 19615 PCI: 15807	-	
Madeira não tratada	14812		-	
Gramas/plantas	13101	-	-	
Lodo	8197	-	-	PCS: 17200
Estrume	7506	-	PCS: 14600	

### 3.4.2 Fezes como Fonte de Nutrientes

MIHELICIC *et al.* (2011) fizeram um estudo sobre a quantidade de fósforo disponível a partir de urina e fezes humanas e concluíram que é de cerca de 1,68 milhões de toneladas métricas para cada item e que, se coletadas, supririam 22% da demanda mundial. Tabela 3-7

**Tabela 3-7:** Total de fósforo na excreta e na urina em áreas urbanas e rurais, no mundo em 2009 e quantidade prevista para 2050. **Fonte:** MIHELICIC *et al.*, (2011).

		Total de fósforo na excreta (toneladas métricas)	Total de fósforo na urina (toneladas métricas)
2009	Total	3358048	1678744
	Urbano	1755942	877691
	Rural	1601546	800493
2050	Total	4329417	2164429
	Urbano	3055623	1527532
	Rural	1273234	636337

HEINONEN-TANSKI e van WIJK-SIJBESMA (2003) relatam que o montante anual de excrementos humanos de uma pessoa corresponde à quantidade de fertilizante necessária para produzir 250 kg de cereais, sendo esta a mesma quantidade de cereal anual necessária para o próprio consumo.

JÖNSSON<sup>(b)</sup> *et al.* (2004) apresentam as quantidades de N, P e K (em kg/ha) retiradas do solo para diferentes plantas (Tabela 3-8).

**Tabela 3-8:** Quantidade de N, P e K (kg/ha) retirada do solo para plantas diferentes (Autoridade Sueca de Alimentação, 2004). **Fonte:** JÖNSSON<sup>(b)</sup> *et al.*, (2004).

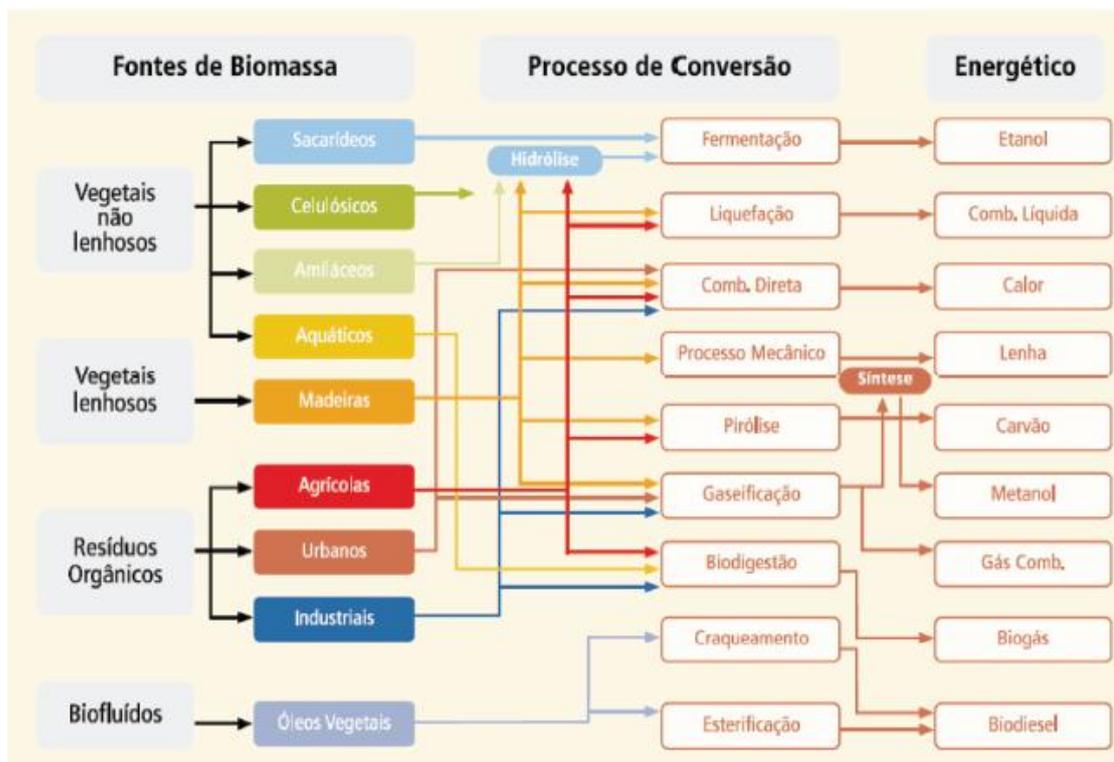
Plantas	Quantidade Kg/ha	Conteúdo de água (%)	N Kg/ha	P Kg/ha	K Kg/ha
<b>Cereais</b>					
Milho seco	1000	10	15,1	2,1	2,9
Milho fresco	1000	69	6,2	1,1	2,9
Millet	1000	14	16,8	2,4	2,2
Arroz não descascado	1000	12	12,4	3,0	2,3
Mapira	1000	11	17,6	2,9	3,5
Trigo	1000	14	17,5	3,6	3,8
<b>Outros</b>					
Feijão verde, fresco	1000	90	2,9	0,4	2,4
Batata reno	1000	80	2,9	0,3	4,7
Lentilha, seco	1000	12	30,4	3,8	7,9
Cebola	1000	91	1,9	0,4	1,9
Abóbora	1000	92	1,6	0,4	3,4
Feijão vermelho seco	1000	11	35,2	4,1	9,9
Soja seco	1000	10	59,2	5,5	17,0
Espinafre	1000	94	3,0	0,3	5,6
Tomate	1000	93	1,4	0,3	2,1
Melancia	1000	91	1,0	0,1	1,2
Repolho branco	1000	92	2,2	0,3	2,7

O autor ressalta, ainda, que as quantidades apresentadas na Tabela 3-7 correspondem ao nível mínimo de aplicação de nutrientes para a manutenção da

fertilidade do solo. Acrescenta, também, que a taxa de aplicação de nutrientes no solo, para se ter uma boa colheita, é mais baixa do que o necessário, especialmente em solos de baixa fertilidade, além do que uma boa parte também é perdida pela não reciclagem dos restos de processamento dos vegetais.

### 3.5 CONVERSÃO DE BIOMASSA EM ENERGIA

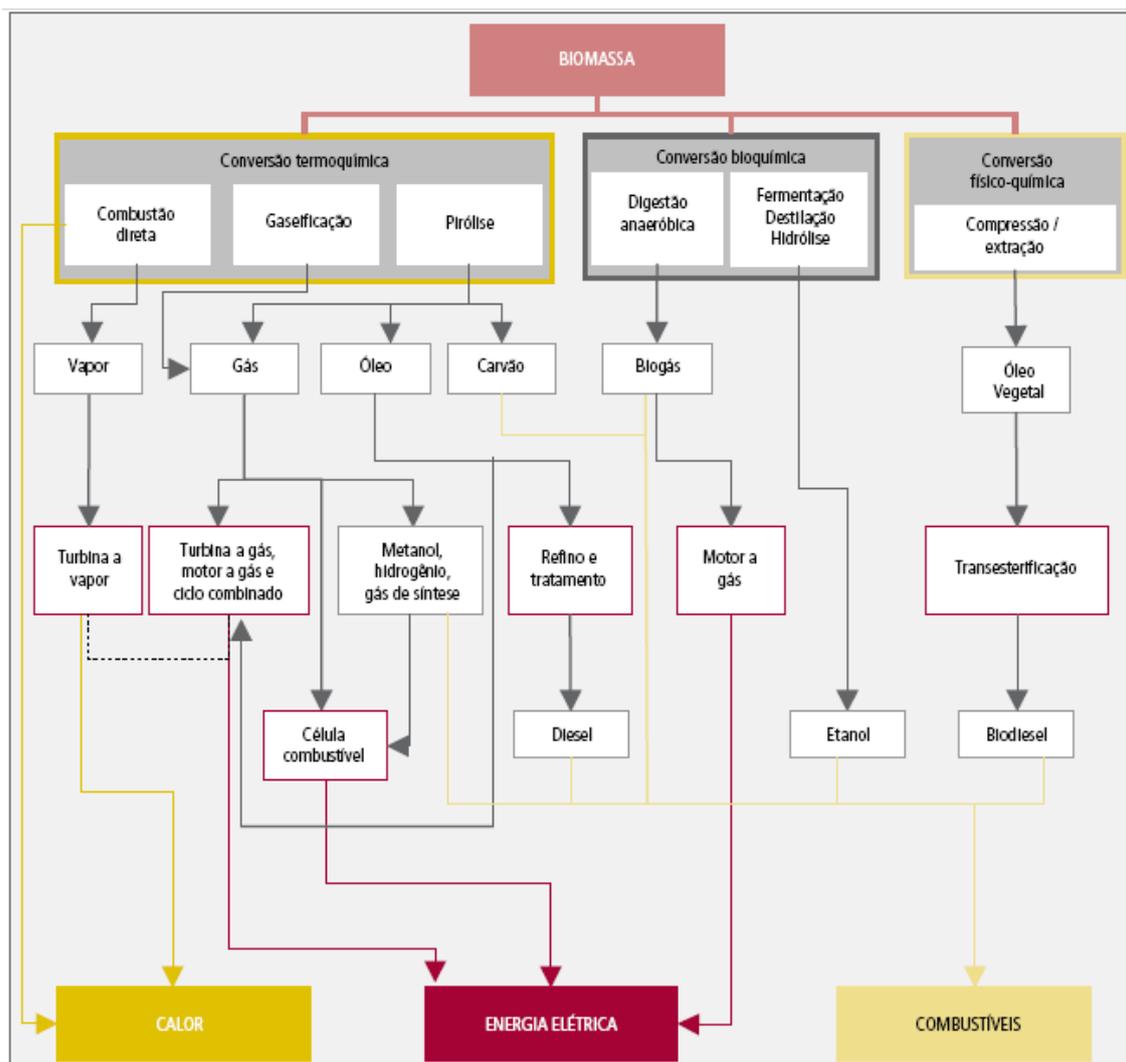
A utilização da biomassa com a finalidade de se produzir energia pode ser feita por meio de diversos processos de conversão (Figura 3-17). O processo de conversão mais adequado vai depender do tipo de biomassa e do produto final a ser obtido. No caso em pauta, a biomassa fecal humana se enquadra em resíduos orgânicos urbanos, mas de origem predominantemente agrícola, assim, os processos previstos, segundo MME(b) (2006), são: combustão direta, pirólise, gaseificação e biodigestão além de liquefação e hidrólise com fermentação. Desses, a mais difundida atualmente para a biomassa fecal é a biodigestão ou fermentação anaeróbia a partir de materiais orgânicos (resíduos animais e vegetais ou lixo) objetivando a produção de gás (metano) e também adubo, o qual tem sido de grande importância para a sustentabilidade ambiental com preservação dos recursos naturais e a reciclagem dos materiais orgânicos (OLIVEIRA ANDRADE *et al.*, 2012).



**Figura 3-17:** Diagrama esquemático dos processos de conversão da biomassa.

Fonte: MME(b) (2006)

Com o objetivo de se aproveitar a energia presente nas fontes de biomassa foram desenvolvidas rotas de conversão que são classificadas, segundo a natureza dos processamentos primários aplicados à biomassa, em: termoquímicas, bioquímicas e físico-químicas. A Figura 3-18 apresenta o diagrama esquemático dessas rotas e os produtos finais gerados.



**Figura 3-18:** Rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa.

**Fonte:** MME (b) (2006)

### 3.6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE CONVERSÃO TERMOQUÍMICA

A conversão termoquímica ocorre quando a energia “quimicamente armazenada” na biomassa é convertida em calor por meio da combustão. As tecnologias capazes de converter a biomassa em energia estão disponíveis através da via termoquímica, e sua diferenciação está associada à quantidade de oxigênio que é fornecido ao processo, tendo como referência o valor do coeficiente estequiométrico. Todos esses processos são baseados em:

- a) Decomposição térmica da carga combustível primária; e
- b) Combustão dos produtos resultantes da decomposição.

No caso da combustão direta, as etapas (a) e (b) ocorrem no mesmo reator, e o produto energético produzido é exclusivamente o calor. Na gaseificação e na pirólise, as etapas (a) e (b) ocorrem separadamente, podendo, nesse caso, obter-se um combustível líquido como produto final.

- **Combustão Direta** é o processo em que é fornecida uma quantidade suficiente de oxigênio para conseguir a combustão completa da carga combustível. Tem como principal produto um gás de combustão de elevada temperatura (~1100 °C), cujos principais componentes são dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), água (H<sub>2</sub>O) e nitrogênio (N<sub>2</sub>), além de resíduos na forma de cinzas.

- **Pirólise** é o processo em que praticamente nenhum oxigênio é fornecido para a combustão da carga combustível (coeficiente estequiométrico = 0). Nesse processo, o aquecimento é feito a temperaturas na faixa de 500 °C a 1.000 °C, provocando a degradação térmica do combustível. Os resultados desse processo são produtos sólidos como o carvão vegetal, líquidos (óleo pirolítico) e gasosos (gás pirolítico).

- **Gaseificação** é o processo em que é fornecida uma quantidade de oxigênio não suficiente para a combustão completa da carga combustível ( $0 < \text{coeficiente estequiométrico} < 1$ ), obtendo-se uma combustão parcial.

Embora não seja uma tecnologia recente, a gaseificação vem ganhando uma atenção especial pela versatilidade do combustível gerado frente aos combustíveis sólidos: produz um combustível gasoso com melhores características de transporte, melhor eficiência de combustão e também pode ser utilizado como matéria-prima para outros processos (CENBIO, 2002).

Apesar de os processos de conversão da biomassa em energia serem bastante difundidos e aplicados em muitos países, LORA (2008) cita dois problemas cruciais relacionados aos mesmos, como o custo da biomassa (como a madeira, por exemplo) e a eficiência energética de sua cadeia produtiva.

Entre o processo de queima direta da biomassa ou a sua gaseificação, determinados autores (ANDRADE, 2007 e LORA, 2008) citam vantagens deste último em relação à queima direta, como o nível de emissões de poluentes, a facilidade de distribuição do gás e a sua melhor adequação ao uso doméstico, sendo sua queima mais facilmente controlada podendo, ainda, ser utilizado em motores de combustão interna.

Nos processos de gaseificação, a matéria orgânica é total ou parcialmente transformada em gases cujos principais componentes são: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>) e, dependendo das condições, metano (CH<sub>4</sub>), hidrocarbonetos leves (pequenas cadeias de C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>), pequenas quantidades de produto sólido como as cinzas, compostos condensáveis (alcatrão e óleos), nitrogênio (N<sub>2</sub>) e vapor de água em diferentes proporções CENBIO (2002). Dentre as características do gás de síntese, destacam-se os altos teores de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H<sub>2</sub>), que conferem ao singás um valor energético classificado entre baixo a médio (KIRKELS e VERBONG, 2011).

Deve-se destacar, porém, a forte presença do alcatrão que aparece como um elemento bastante nocivo ao meio ambiente e aos motores de combustão interna, podendo aparecer em maior ou menor quantidade dependendo do tipo de biomassa e do tipo de gaseificador utilizado e também da condição de operação (QUAAK, 1999, ANDRADE, 2007) – (Tabela 3-9).

**Tabela 3-9:** Tipo de gaseificador e teor de alcatrão gerado. Fonte: Quaak(1999).

<b>Tipo de gaseificador</b>	<b>Teor de alcatrão</b>
Down draft	15 – 500 mg/Nm <sup>3</sup>
Up draft 30	30 – 150 g/Nm <sup>3</sup>
Leito fluidizado	< 5 g/Nm <sup>3</sup>

O alcatrão é um conjunto de compostos de elevado peso molecular, maior que o benzeno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, 78 g/mol), presentes no gás da gaseificação. Ele começa a

condensar a temperaturas inferiores a 450 °C. (ANDRADE, 2007; ABATZOGLOU, 2000)

No interior dos gaseificadores, juntamente com a biomassa, é inserido um reagente gasoso o qual irá reagir termoquimicamente com a biomassa para a produção do gás de síntese. Segundo WANG *et al.*, (2011), esses gases são denominados de agentes oxidantes ou agentes de gaseificação que podem ser:

I. Ar: agente oxidante barato, abundante e amplamente utilizado, contém uma grande quantidade de nitrogênio ( $N_2$ ) o qual reduz o poder calorífico do gás de síntese produzido;

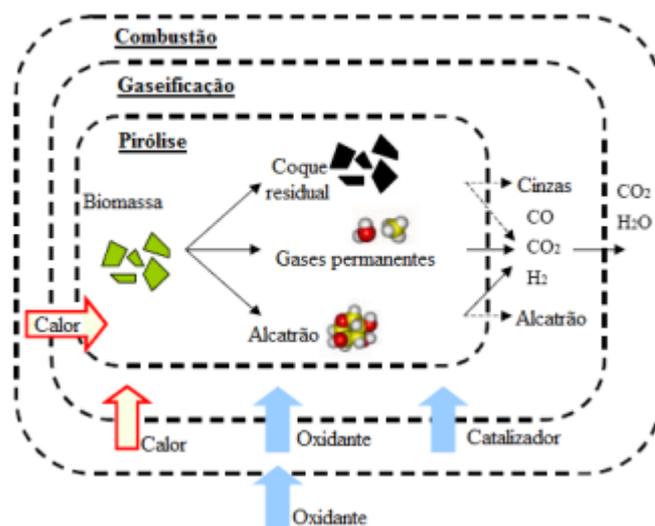
II.  $O_2$  puro: quando usado como agente de gaseificação, aumenta o poder calorífico do gás de síntese, todavia aumenta os custos operacionais devido à produção de  $O_2$ ;

III. Vapor de água;

IV.  $CO_2$ ; ou

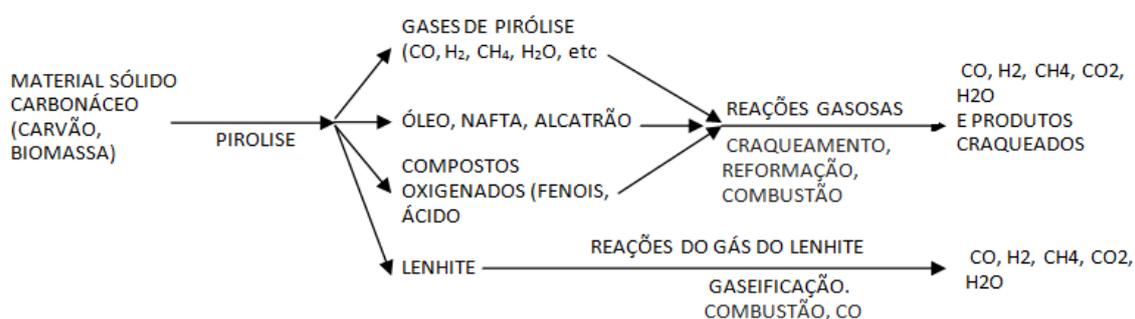
V. suas misturas.

Ainda segundo WANG *et al.*, (2011), a combustão parcial de biomassa com ar ou  $O_2$  fornece calor para a secagem da biomassa, aumentando, assim, a sua temperatura, o que resulta em um ambiente propício para que reações endotérmicas da gaseificação ocorram. Os autores acrescentam ainda que o poder calorífico e a proporção de  $H_2$  podem ser aumentados no gás de síntese se o vapor de água for o agente gaseificante. O fluxograma da Figura 3.19 apresenta um esquema do processo de gaseificação de biomassa.



**Figura 3-19:** Processo de gaseificação da biomassa. **Fonte:** Knoef (2008).

Uma sequência simplificada das reações de gaseificação de carvão ou de biomassa também é apresentada por HIGMAN *et al.*, (2003) (Figura 3.20):



**Figura 3-20:** Sequência de reação para a gaseificação do carvão de biomassa.

Adaptado de: Higman *et al.*, (2003).

### 3.6.1 Etapas da Gaseificação

A Figura 3-21 mostra o esquema de um gaseificador de leito fixo do tipo cocorrente, semelhante ao usado neste trabalho. A imagem da esquerda mostra fisicamente os componentes básicos do reator, e a da direita mostra as regiões de processamento de cada fase (chamadas de zonas). Assim, podemos observar a zona de secagem, a zona de pirólise, a zona de combustão e a zona de redução. Ele é chamado cocorrente porque a biomassa e o ar têm a mesma direção e sentido (descendente).

Nesse tipo de gaseificador, os produtos de pirólise (voláteis e, principalmente, o alcatrão) são forçados a passar pela zona de combustão, sofrendo, assim, a sua decomposição térmica.

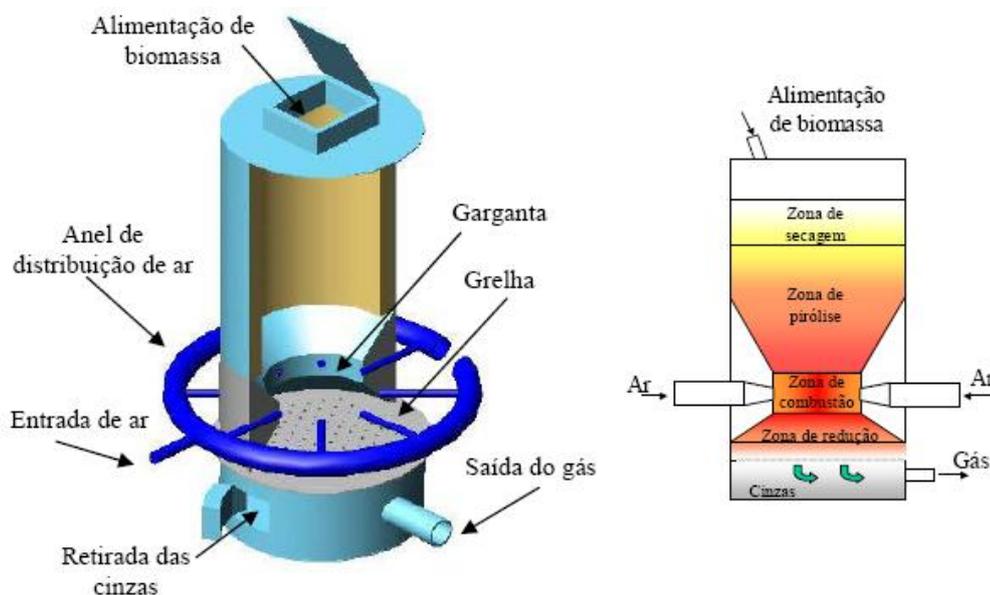


Figura 3-21: Esquemas de gaseificador cocorrente (Downdraft).

Fonte: Andrade (2007)

As reações que ocorrem em cada zona do gaseificador e o sentido do fluxo dos seus respectivos produtos podem ser visualizados na Figura 3-22.

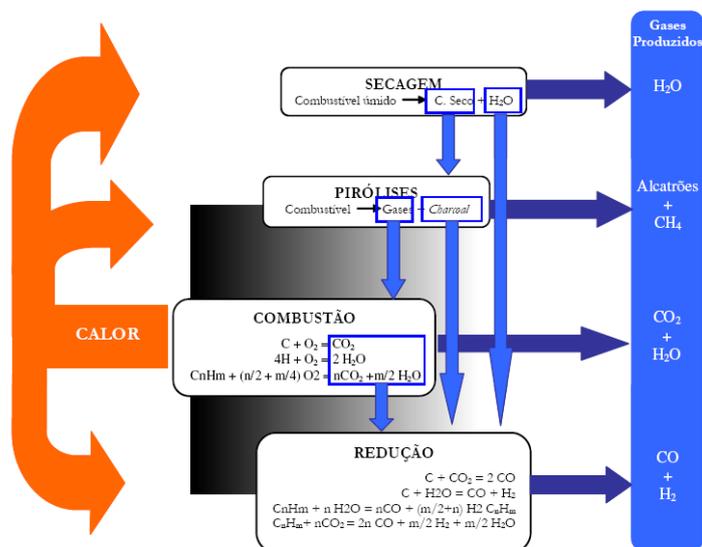


Figura 3-22: Estágios do processo de gaseificação. Fonte: PUC – RIO.

Certificação Digital nº 0511123/CA

Descrição das zonas:

I. Zona de secagem: região onde a biomassa perde grande parte da sua umidade. Fica na parte superior do gaseificador;

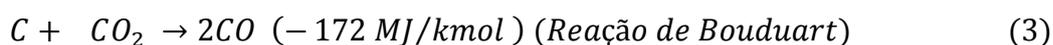
II. Zona de pirólise: nessa região, também chamada de decomposição térmica, que ocorre na ausência de oxigênio, desenvolve-se a temperaturas entre 280 e 450 °C gerando uma parte sólida, uma gasosa e uma líquida, formadas pelos seguintes compostos:

- a) Parte sólida: cinzas e particulados;
- b) Parte gasosa: monóxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio;
- c) Parte líquida: vapores condensados de alcatrão e ácidos.

III. Zona de oxidação: região onde o oxigênio do reagente reage com o carbono e o hidrogênio da biomassa formando CO<sub>2</sub> e vapor d'água. Como é um processo exotérmico, ocorre a liberação de energia para o processo de volatilização e gaseificação. A seguir são apresentadas as equações características das reações endotérmicas dessa etapa descritas em REDDY (2010) e também em ANDRADE (2007):



IV. Zona de redução (gaseificação propriamente dita), que inclui reações heterogêneas exotérmicas entre os gases e o coque residual, assim como reações homogêneas entre os produtos já formados (REDDY, 2010; ANDRADE, 2007).



Reações homogêneas (fase gasosa)

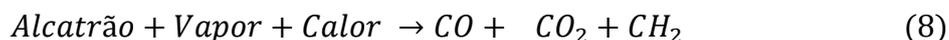


Reação de formação do metano

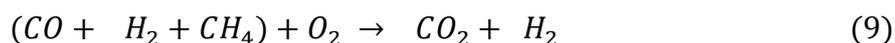


CENBIO (2002) fornece uma descrição do craqueamento térmico do alcatrão que forma os seguintes produtos: CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e outros gases. Fornece, ainda, a reação da oxidação parcial dos produtos da pirólise:

Craqueamento do alcatrão



Oxidação parcial dos produtos da pirólise.



SÁNCHEZ (2003) reporta que, quando a madeira é pirolisada à baixa velocidade de aquecimento, a seguinte sequência de fenômenos pode ser observada:

- A 105 °C aproximadamente - eliminação quase total da umidade, que tem um máximo a 130 °C ;
- Entre 200 °C e 280 °C, decompõe-se a maior parte das hemiceluloses, originando, predominantemente, produtos voláteis (CO, CO<sub>2</sub> e vapores condensáveis). Na faixa de 280 °C a 500 °C, a celulose decompõe-se a uma velocidade maior atingindo o máximo em torno dos 320 °C.

Ainda segundo SÁNCHEZ (2003), de acordo com as suas condições de operação, a pirólise pode ser classificada em três tipos:

I. Pirólise convencional: é realizada, geralmente, à pressão atmosférica e temperaturas finais máximas de 500 °C, com taxas de aquecimento baixas ( 0,1 - 1 °C/s) e tempos de residência grandes (≥ 1 min). Normalmente são tratados pedaços maiores de biomassa.

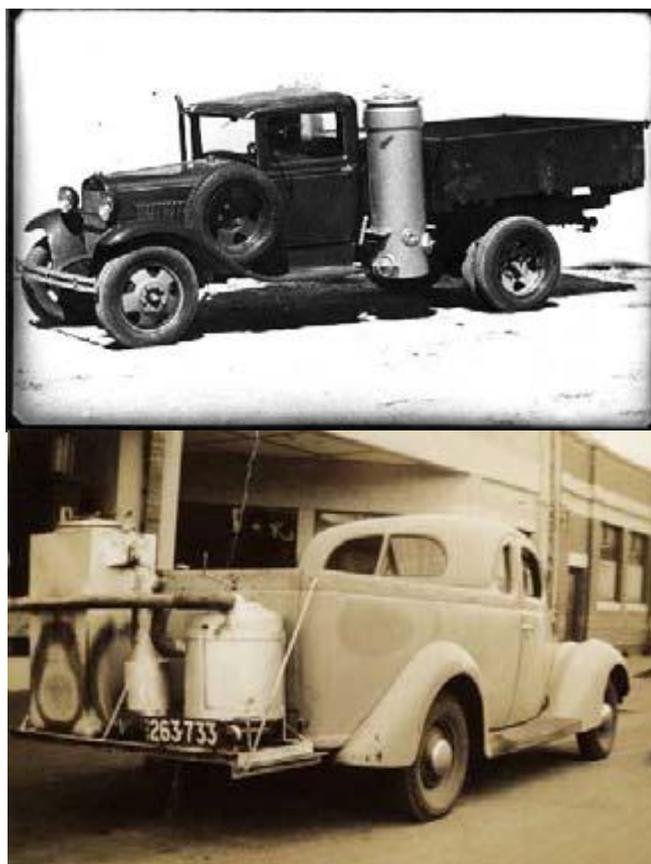
II. Pirólise rápida: as condições de operação são variadas, caracterizando-se por uma alta velocidade de aquecimento (10 - 200 °C/s), um tempo de residência de 0,5 – 5 segundos e tratamento de partículas de pequenos tamanhos ( < 1mm).

III. Pirólise flash: do mesmo modo que a pirólise rápida, as condições de pressão são variáveis, a faixa de temperatura de trabalho é mais restrita (800 - 1000 °C) e os

tempos de residência são muito baixos (<0,5 segundos). Nessas condições, as partículas são tratadas na forma de pó.

### 3.6.2 Tipos e Características dos Gaseificadores

O processo de gaseificação de biomassa teve início em 1839 com a construção do gaseificador em contracorrente desenvolvido por BISHOFF, sendo posteriormente modificado por SIEMENS em 1857, e utilizado largamente na Europa nos cem anos seguintes, tendo seu auge durante a 2ª Guerra Mundial na locomoção dos veículos. ANDRADE, 2007 apud CORTEZ, 1997. (Figura 3-23).



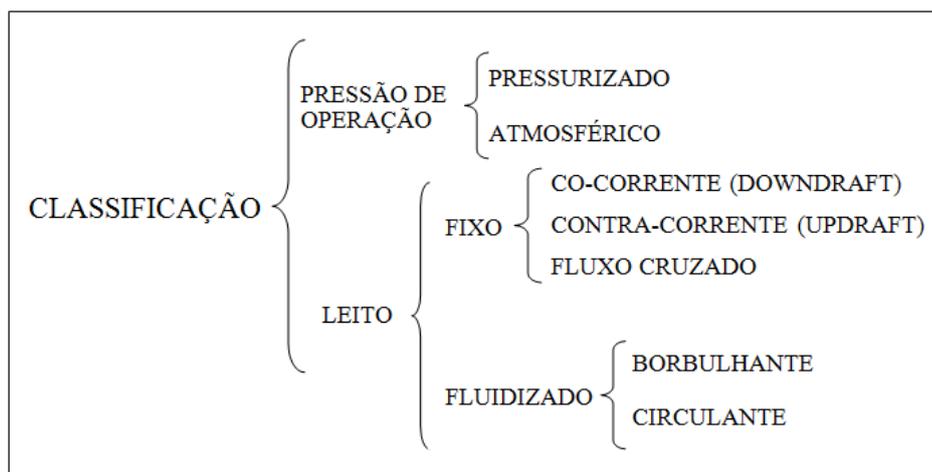
**Figura 3-23:** Veículos movidos a gás de biomassa.

**Fonte:** ANDRADE (2007).

Ainda segundo ANDRADE (2007), os motores desses veículos podiam operar com cerca de 75% da potência do mesmo motor operando com gasolina. Entretanto,

cuidados adicionais com a manutenção eram necessários devido ao alcatrão e aos particulados presentes no gás.

Uma classificação geral dos gaseificadores é apresentada na Figura 3-23.



**Figura 3-24:** Classificação geral dos gaseificadores de biomassa.

ANDRADE (2007) apresenta as principais vantagens e desvantagens de alguns gaseificadores.(Tabela 3-10).

**Tabela 3-10:** Características de gaseificadores de leito fixo e fluidizado.

Fonte: ANDRADE (2007)

<b>Cocorrente (“downdraft”)</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Construção relativamente simples e seguro	Requer baixa umidade do combustível a ser utilizado
Gás produzido relativamente limpo	Restrição de granulometria do material a ser utilizado como combustível (não pode ser muito pequeno)
Alto potencial para conversão de carbono	Alta temperatura do gás produzido (saída)
Pouco arraste de cinzas	Possibilidade de fusão das cinzas devido às altas temperaturas de operação
Alta eficiência de conversão	

Tabela 3-10 (continuação)	
<b>Contracorrente (“up draft”)</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Construção muito simples e robusta	Gás produzido muito sujo e com alto teor de alcatrão
Baixa temperatura dos gases de saída	Devido o gás produzido ser muito sujo, não se adequa ao uso com motores de combustão interna por necessitar de um sistema de limpeza muito caro.
Alta eficiência térmica	
Alta conversão de carbono	
Pouco arraste de cinzas	
Alto tempo de residência dos sólidos	
Produção de gás adequado para queima direta	
Desligamento fácil	
Excelente eficiência de conversão	
<b>Leito fluidizado (“fluidized bed”)</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Tolera variações da qualidade do combustível	Sistema de alimentação
Grande tolerância à granulometria do combustível	Pode haver aglomeração do leito
Bom controle da temperatura do leito	Demora na partida
Rápida resposta à carga	Não é de operação trivial
Excelente distribuição da temperatura do leito	Alta concentração de particulados no gás produzido
Possibilidade de processo catalítico no leito	Perda de carbono com as cinzas
Moderados níveis de alcatrão no gás produzido	
Pode operar à carga parcial	
Alta eficiência de conversão	

Para uma mesma biomassa, dependendo do tipo de gaseificador utilizado e do agente gaseificante, o gás gerado no processo pode sofrer variações significativas, tanto na sua composição, quanto no seu poder calorífico. Um exemplo dessas variações é apresentada por GERALDO (2013) e BRIDGEWATER (2002) (Tabela 3-11).

**Tabela 3-11:** Percentual de gases gerados em função do agente gaseificante.

Adaptado de GERALDO (2013); BRIDGEWATER (2002)

CARACTERÍSTICAS DO GÁS GERADO						
BRIDGEWATER, 1995; NNFCC (2009)						
TIPO - agente gaseificante	Composição do gás (% em volume – base seca)					
	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	PCS (MJ/Nm <sup>3</sup> )
Cocorrente ( <i>Downdraft</i> ) - (ar)	17	21	13	1	48	5,7
Cocorrente ( <i>Downdraft</i> ) - (O <sub>2</sub> )	32	48	15	2	3	10,4
Contracorrente ( <i>Updraft</i> ) – (ar)	11	24	9	3	53	5,4
Leito fluidizado Circulante - (ar)	15	47	15	23	0	16,1
Leito fluidizado Borbulhante - (ar)	31	48	0	21	0	17,4
ANDRADE, 2007 apud MANSARAY, 1999						
Leito fluidizado	4	20	15	5	57	5

GERALDO (2013) acrescenta também que, em função do agente gaseificante, o gás gerado pode ter um poder calorífico denominado de baixo, médio ou alto, conforme Tabela 3-12.

**Tabela 3-12:** Tipo de gás obtido em função do agente gaseificante.

Fonte: GERALDO (2013).

Tipo de gás	Poder calorífico (MJ/Nm <sup>3</sup> )	Agente gaseificante
Baixo PC	4-6	Ar
Médio PC	10-12	Oxigênio
Alto PC	40	Hidrogênio

KALTSCHMITT e HARTMAN (2001) acrescentam que a composição do gás também varia com a pressão interna do gaseificador (se atmosférico ou pressurizado), conforme apresentado na Tabela 3-13. Observa-se, nessa tabela, que o gaseificador “atmosférico” em atmosfera de ar como gaseificante (semelhante ao utilizado nesse

trabalho) gera um gás que tem, em média, 12,5% de H<sub>2</sub>, 16,5% CO, 4,4% de CH<sub>4</sub>, 1,2% de outros hidrocarbonetos e 52% de N<sub>2</sub>.

**Tabela 3-13:** Composição volumétrica típica do gás gerado sob condições diferentes de pressão interna do gaseificador. **Fonte:** KALTSCHMITT e HARTMAN, (2001).

Componente	Gaseificador		
	Atmosférico (Ar)	Pressurizado (Ar)	Atmosférico (Vapor)
	(% do gás)	(5 – 10 bar)	(%) do gás
H <sub>2</sub>	12,5	4,0 – 15,0	38,1
CO	16,3	10,0 – 19,0	28,1
CO <sub>2</sub>	13,5	14,0 – 19,0	21,2
CH <sub>4</sub>	4,4	5,0 – 9,0	8,6
HC	1,2	-	3,0
N <sub>2</sub>	52,0	45,0 – 60,0	0

Em NNFCC (2009) encontramos, também, dados de temperatura de operação, potência gasosa gerada (Pot) e respectivas eficiências ( $\eta_g$ ) para alguns gaseificadores de grande porte (Tabela 3-14).

**Tabela 3-14:** Dados de alguns gaseificadores de grande porte. Adaptado de NNFCC (2009).

Gaseificador (tecnologia)	Local	Temperatura de operação (°C)	Gases (%) em volume						Pot	$\eta_g$
			H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> S	MW	%
Plasma	USA	4000 a 5000	42,5	45,3	4,3	5,2	0,01	0,11	40	90
Leito fluidizado	Atlanta USA	800-850	22	44,4	12	-	-	-	-	37
Leito fluidizado circulante	Suécia	950-1000	11	16	10,5	44	12	-	6	-
Fluxo de arraste	Havaí	1200-1400	51	24	17,8	0,5	-	-	-	81
Leito fluidizado borbulhante	Dinamarca	850	22	20	9,9	41,72	3,32	0,008	20	87

### 3.7 FUNDAMENTOS DA TERMODINÂMICA

“Termodinâmica” é a ciência que trata do calor e do trabalho e daquelas propriedades das substâncias ligadas ao calor e ao trabalho (VAN WYLEN *et al.*, 2003). Ela fornece subsídios que nos permitem entender os processos reais de uma forma mais dinâmica, fundamentada na 1ª e na 2ª Leis da Termodinâmica. Por meio de um balanço energético é possível avaliar a eficiência de cada processo de conversão de energia; no entanto, a qualidade da forma na qual a energia se encontra não pode ser identificada. Trabalho e calor, por exemplo, são formas de energia com qualidades intrínsecas diferentes, mas que não podem ser percebidas pelo simples balanço energético. O conceito de exergia foi criado em função da necessidade de se corrigirem essas diferentes interpretações.

A exergia ou disponibilidade exergética decorre da 2ª Lei da Termodinâmica, e advém do conceito de *irreversibilidade* e *disponibilidade*, sendo definida como o trabalho máximo que se pode obter quando o sistema atinge o estado de equilíbrio com o ambiente, passando por um processo reversível. Como nos processos reais ocorrem irreversibilidades, o saldo de trabalho é que nos dá uma medida da irreversibilidade do processo.

A eficiência de qualquer processo, ou máquina, é fundamental para minimização do consumo dos recursos naturais, o que implica diretamente em diminuição dos rejeitos. O conceito de exergia vem sendo objeto de muitos trabalhos, podendo ser aplicado a diferentes processos, tais como econômicos, tecnológicos, ambientais e sociais (SZARGUT *et al.*, 1988; KASEMBE, 2012; PTAZINSKI, 2007; BEJARANO, 2009).

Segundo VALERO *et al.*, (2006), a exergia é um critério unificado de avaliação quantitativa e qualitativa dos sistemas de saneamento que fornece informação sobre o processo de degradação termodinâmica da água provocada pela poluição. Dessa forma, um aumento na exergia da poluição da água leva a uma diminuição no valor ecológico do ambiente aquático (BEJARANO, 2009; HUANG *et al.*, 2007).

De acordo com MATSUSHIGE *et al.* (1986), a exergia pode ser usada para a avaliação do requerimento energético de um sistema de tratamento de esgoto e na determinação do sistema mais eficiente do ponto de vista de energia entre vários processos físicos, químicos e biológicos.

LATTOUF e OLIVEIRA Jr. (2003), definem dois parâmetros fundamentais de avaliação para sistemas de tratamento de esgoto: a eficiência exergética ambiental ( $\eta_{ex}$ ) e o indicador exergético de renovabilidade ( $\lambda_r$ ), usados também por Bejarano (2009):

- a) Eficiência exergética ambiental: razão da exergia do produto final (ou efeito útil de processo) pela exergia total consumida dos recursos humanos e naturais, incluindo todos os insumos, conforme equação 10:

$$\eta_{ex} = \frac{B_{\text{prod.final}}}{B_{\text{Rec,nat}} + B_{\text{Prep}} + B_{\text{Desat}} + B_{\text{Remoc}}} \quad (10)$$

Onde:

$B_{\text{Rec, nat}}$  = exergia dos recursos naturais consumida pelos processos (kW);

$B_{\text{Prep}}$  = exergia requerida para extração e preparação dos recursos naturais (kW);

$B_{\text{Remoc}}$  = exergia relacionada à remoção dos rejeitos do processo (kW);

$B_{\text{Prod, final}}$  = exergia produzida ou efeito útil de um processo (kW);

$B_{\text{Desat}}$  = exergia dos recursos naturais adicionais, destruída durante a desativação dos rejeitos (kJ/kg).

- b) Indicador exergético de renovabilidade: razão entre a exergia dos produtos pela soma das exergias não renováveis: a exergia destruída, a exergia de desativação e a exergia das emissões e resíduos, conforme equação 11:

$$\lambda_r = \frac{B_{\text{produtos}}}{B_{\text{destruída}} + B_{\text{Desativação}} + B_{\text{Emissões/Resíduos}} + B_{\text{não renovável}}} \quad (11)$$

Onde:

$B_{\text{produtos}}$  = exergia dos produtos do sistema de tratamento de esgoto (kW);

$B_{destruída}$  = exergia destruída no sistema de tratamento de esgoto (kW);

$B_{desativação}$  = exergia dos recursos adicionais, destruída durante a desativação das emissões e resíduos (kW);

$B_{emissões/resíduos}$  = exergia das emissões e resíduos caso esses não sejam reaproveitados para fins úteis no próprio sistema de tratamento de esgoto ou para a sociedade (kW);

$B_{não renovável}$  = exergias de recursos não renováveis utilizados no sistema de tratamento de esgoto (kW).

O índice exergético de renovabilidade ( $\lambda_r$ ) estará entre 0 e 1 quando o termo  $(B_{destruída} + B_{desativação} + B_{emissões/resíduos} + B_{não renovável}) > B_{produtos}$ . Nesse caso, o sistema de tratamento de esgoto é considerado ambientalmente desfavorável.

Se  $\lambda_r > 1$  o termo  $B_{produtos} > (B_{destruída} + B_{desativação} + B_{emissões/resíduos} + B_{não renovável})$  e, nesse caso, o sistema de tratamento de esgoto é ambientalmente favorável, o que significa dizer que vai haver uma sobra de exergia para ser aplicada na melhoria do próprio sistema de tratamento ou para recuperar o ambiente, deixando-o nas condições de antes da poluição.

Se  $\lambda_r = 1$ , o sistema de tratamento de esgoto é interna e externamente reversível, com uso apenas de insumos não renováveis.

Se  $\lambda_r \rightarrow \infty$ , caso em que o denominador da equação tende para 0, o sistema de tratamento de esgoto é interna e externamente reversível, com uso apenas de insumos renováveis.

Segundo SZARGUT (1988), a exergia total de um sistema pode ser dividida em quatro parcelas: exergia física, química, cinética e potencial, conforme equação 12.

Exergias envolvidas:

$$B = B_{Física} + B_{química} + B_{potencial} + B_{cinética} \quad (kJ) \quad (12)$$

Onde:

$$b_{cinética} = \frac{V^2}{2} \quad (kJ/kg) \quad (13)$$

$$b_{potencial} = gZ \quad (kJ/kg) \quad (14)$$

Em muitos processos, a velocidade e a diferença de cota são desprezíveis, tornando as exergias cinética e potencial também desprezíveis ou nulas, assim, a exergia total do sistema pode ser calculada em função apenas das exergias física e química (Equação 15):

$$B = B_{Física} + B_{química} \quad (kJ) \quad (15)$$

### 3.7.1 Exergia Física

A exergia física é determinada fazendo o sistema ou o processo sair do estado inicial e atingir o estado final de referência (índice  $_0$ ), passando por um processo reversível, e representa a máxima quantidade de trabalho possível de ser realizada. Assim, a exergia física total para um sistema (massa fixa) pode ser descrita pela equação 16

$$B_{física} = U - U_0 + P_0 (V - V_0) - T_0 (S - S_0) \quad (kJ) \quad (16)$$

Onde:

U, S e V são a entalpia, entropia e volume no estado de estudado.

$U_0$ ,  $S_0$ ,  $V_0$ ,  $P_0$  e  $T_0$  são respectivamente, energia interna, entropia, volume, pressão e temperatura no estado de referência, sendo U e S (kJ/kg), P (kPa), V ( $m^3$ ) e  $T_0$  (K).

Em se tratando de fluxo, a equação 16 pode ser apresentada em função da entalpia (h) em (kJ/kg), ou seja:

$$B_{física} = \dot{m}[h - h_0 - T_0 (s - s_0)] \quad (kW) \quad (17)$$

Segundo SZARGUT *et al.* (1988), a exergia (química e total) de um combustível líquido pode ser dada pela equação:

$$B_{combustíveis\ líquidos} = PCI \cdot \beta \quad (kJ/kg) \quad (18)$$

$$\beta = 1,0407 + 0,0154 \frac{\%H}{\%C} + 0,0562 \frac{\%O}{\%C} + 0,5904 \frac{\%S}{\%C} \left[ 1 - 0,175 \frac{\%H}{\%C} \right] \quad (19)$$

Onde PCI é o poder calorífico inferior e %C, %H, %O e %S são, respectivamente, os percentuais volumétricos de: carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre.

O PCI pode ser calculado em função do PCS (poder calorífico superior) por meio da seguinte equação:

$$PCI = PCS - \frac{m_{H_2O}}{m_{combustível}} \cdot L \quad (kJ/kg) \quad (20)$$

Onde L é o calor latente (kJ/kg) de vaporização da água na pressão do gás.

Segundo PERA (1990), o poder calorífico inferior de combustíveis sólidos e líquidos pode ser calculado, com boa aproximação, pela equação 21:

$$PCI_{comb\ st} = 8100 + 33960 \left[ H - \frac{O}{8} \right] + 2214 \cdot S - 600 \cdot (9H + H_2O) \quad (kJ/kg) \quad (21)$$

Onde:

C: teor mássico de carbono (%);

H: teor mássico de hidrogênio (%);

O: teor mássico de oxigênio (%);

S: teor mássico de enxofre (%);

H<sub>2</sub>O: teor mássico de umidade (%).

Para uma biomassa sólida e sem substâncias complexas, a exergia física ( $B_{física}$ ) pode ser descrita pela equação 22.

$$b_{física} = c_p (T - T_0) - T_0 c_p \ln \frac{T}{T_0} + \frac{T_0}{T} v (P - P_0) \quad (kJ/kg) \quad (22)$$

Ou, em termos de entalpia específica:

$$b_{física} = h - h_0 - T_0 (s - s_0) \quad (kJ/kg) \quad (23)$$

Onde:

$u$  e  $u_0$  são as energias internas do sistema e de referência, respectivamente, em (kJ/kg);

$v$  e  $v_0$  são os volumes específicos do sistema e de referência, respectivamente, em (m<sup>3</sup>/kg);

$P_0$  e  $T_0$  são a pressão e temperatura de referência, respectivamente, em (kPa e K);

$s$  e  $s_0$  são entropias específicas do sistema e de referência, respectivamente, em (kJ/kg).

Quando envolver um fluxo de massa ( $\dot{m}$ ), a equação 23 fica da seguinte forma:

$$B_{física} = \dot{m}[h - h_0 - T_0 (s - s_0)] \quad (kW) \quad (24)$$

Onde:

$h$  e  $h_0$  são as entalpias específicas do sistema e de referência, respectivamente, em (kJ/kg);

$s$  e  $s_0$  são entropias específicas do sistema e de referência, respectivamente, em (kJ/kg)

$T_0$  é a temperatura de referência, em (K).

A função de Gibbs representa o potencial químico (exergia química) de uma determinada substância em um dado estado e é muito útil no cálculo do trabalho disponível em um processo de reação química (LI, 1996).

A função de Gibbs ( $G$ ), também chamada de energia livre de Gibbs, pode ser escrita na forma:

$$G = h - Ts \quad (kJ/kg) \quad (24)$$

Onde:

$h$ : entalpia específica (kJ/kg);

$T$ : temperatura (K)

$s$ : entropia específica (kJ/kg).

### 3.7.2 Exergia Química dos Combustíveis

A exergia química ( $B^q$ ) dos combustíveis sólidos, líquidos e gasosos pode ser calculada com boa precisão pelas equações 25 e 26 (LI, 1996).

Combustíveis sólidos:

$$B^q = (PCI) \cdot \left[ 1,0438 + 0,0013 \frac{H}{C} + 0,1083 \frac{O}{C} + 0,0549 \frac{N}{C} \right] \quad (kJ/kg) \quad (25)$$

Se  $\frac{O}{C} \leq 0,666$

Ou

$$B^q = (PCI) \frac{1,0438 + 0,0013 \frac{H}{C} + 0,4455 \frac{O}{C} \left( 1 + 0,0051 \frac{H}{C} \right) + 0,0521 \frac{N}{C}}{1 - 0,5385 \frac{O}{C}} \quad (kJ/kg) \quad (26)$$

Se  $0,666 < \frac{O}{C} < 2,67$

Onde:

$C$ : teor mássico de carbono (%);

$H$ : teor mássico de hidrogênio (%);

$O$ : teor mássico de oxigênio (%);

$N$ : teor mássico de nitrogênio (%).

Em PTAZINSK (2007), encontramos as exergias químicas de algumas biomassas, que podem ser observadas na Tabela 3-15.

**Tabela 3-15:** Exergia química de algumas biomassas.

Adaptada de PTAZINSK (2007).

Combustível	$B_q$ (kJ/kg de biomassa)
Carvão	26638
Óleos vegetais	40338
Palha	16506
Madeira tratada	17129
Madeira não tratada	16634
Gramma/plantas	14760
Lodo	9249
Estrume	8427

### 3.7.3 Termodinâmica Aplicada à Valoração da Biomassa

A aplicação da Termodinâmica, tendo como base o conceito de exergia, fundamenta o entendimento dos processos de conversão, além de oferecer algumas vantagens como a de fornecer uma média comum para diferentes processos e produtos, a de fornecer uma ferramenta efetiva para atingir uma utilização eficiente da energia com um mínimo impacto ambiental e a de facilitar o entendimento das questões ambientais (HUANAG *et al.*, 2007). Em se tratando de uma biomassa altamente prejudicial ao meio ambiente (quando não tratadas e destinadas adequadamente), a não quantificação e valoração das magnitudes das perdas exergeticas, em um gaseificador, poderá inviabilizar as tentativas de sua utilização como fonte de energia alternativa renovável pelo processo da decomposição termoquímica ou, até mesmo, dificultar a sua comparação com outros processos de tratamento convencionais.

SZARGUT *et al.*, (1988); HELLSTROM (1997); KHOSRAVI *et al.*, (2013); MIHELICIC *et al.*, (2008); REDDY (2010); ROSEN *et al.*, (2013); GALLEGOS-MUÑOZ (2003) e LAMAS *et al.*, (2013) utilizaram os conceitos de energia e exergia para elaboração e determinação de métodos visando à qualificação, quantificação e otimização dos processos de saneamento e seus impactos ambientais.

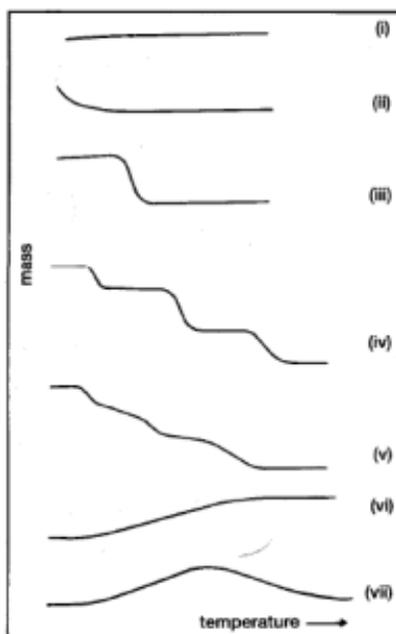
BEJARANO (2009) aplicou os conceitos da exergia discutidos por SZARGUT *et al.*, (1988) e HELLSTROM (1997) para comparar três sistemas de tratamento de esgoto utilizando os parâmetros de eficiência exergética ambiental e índice exergético de renovabilidade, e chegou à conclusão de que os maiores valores foram obtidos com o sistema RAFA – Lagoa Facultativa. Concluiu, ainda, que o índice exergético de renovabilidade ( $\lambda_r$ ) maior que 1 significa que a exergia dos produtos desse sistema poderia ser usada para restaurar o meio ambiente às condições de antes da poluição da água acontecer e, ainda, ter um fluxo de exergia positivo para outro uso. SOUTHGATE e DURNIN (1970), estudaram a energia metabolizada pelo organismo humano em função da dieta calórica, utilizando 4 grupos de pessoas: homens e mulheres jovens, de acordo com as dietas, por um período preliminar de 2 a 3 dias (sem coleta de fezes), a partir do qual as fezes eram colhidas para posterior análise, e homens e mulheres idosos, ingerindo três tipos de dietas diferenciadas entre si pela quantidade de carboidrato disponível. Os estudos demonstraram que a exatidão de qualquer método, para calcular a energia metabolizável de um regime alimentar, é, em grande parte, determinada pela precisão com a qual o método é capaz de prever a energia total contida na dieta. Concluíram, ainda, que não houve efeito significativo do sexo ou da idade sobre a digestibilidade aparente de proteína, gordura ou de carboidrato disponível.

### **3.7.4 Termogravimetria (TG) e Análise Termogravimétrica Diferencial (DTA)**

#### **3.7.4.1 Termogravimetria**

A termogravimetria é a técnica utilizada para medir as variações de massa de uma amostra durante o aquecimento (ou resfriamento) ou quando mantida a uma temperatura específica. Os principais itens medidos nessa técnica incluem: evaporação, sublimação, decomposição, oxidação, redução, adsorção e dessorção de gás (WENDLANDT, 1964; HAINES, 1995). A Figura 3-25 apresenta curvas características obtidas por meio dessa técnica.

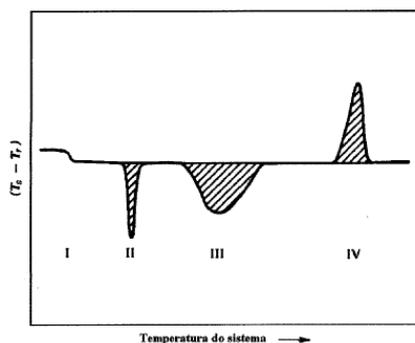
Como exemplo, a curva “III” representa a decomposição da amostra em um único estágio, e a curva “IV”, a decomposição em vários estágios.



**Figura 3-25:** Curvas características da TG.  
**Fonte:** Caponero & Tenório (PMI-2201).

#### 3.7.4.2 Análise Termogravimétrica Diferencial (DTA)

A DTA é uma técnica utilizada para medir a variação da entalpia no tempo ( $dH/dt$ ) em que a amostra e a referência são mantidas a uma mesma temperatura ao longo do ciclo térmico programado. Dessa forma, uma quantidade de energia deve ser fornecida à amostra durante o processo, sendo essa quantidade registrada em função do ciclo térmico programado. Por meio dessas técnicas, podem-se acompanhar os efeitos de calor associados com alterações físicas ou químicas da amostra (fusão, ebulição, sublimação, congelamento, inversões de estruturas cristalinas). Em geral, reações de decomposição produzem efeitos exotérmicos, enquanto que reações de oxi-redução, decomposição, desidratação e dissociação produzem efeitos endotérmicos. Curvas típicas geradas com essa técnica podem ser visualizadas na Figura 3-26.



**Figura 3-26:** Curva DTA onde são exemplificadas quatro reações típicas: I) Transformação de segunda ordem; II) Reação endotérmica ocorrendo em uma temperatura específica (ex.: fusão); III) Reação endotérmica ocorrendo em uma faixa de temperatura (ex.: decomposição do  $\text{CaCO}_3$ ); IV) Reação exotérmica. **Fonte:** Caponero & Tenório (PMI-2201).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 FEZES HUMANAS

#### 4.1.1 Coleta e Amostragem

Dentro do contexto de reaproveitamento de fezes humanas como fonte de energia, foi feita a caracterização das fezes em função do seu poder calorífico. Assim, as amostras foram coletadas com auxílio de bacias sanitárias secas, segregadoras (Figura 4-1), e esse procedimento é descrito a seguir:

Deve-se também enfatizar que, para essas coletas, não se levou em consideração a dieta alimentar, sexo ou idade dos indivíduos.

a) Três bacias foram instaladas nos banheiros sanitários da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da UFES – ao final de cada dia, as fezes eram coletadas e secadas, conforme item 4.3.1.1. Período de coleta: 2 meses.

b) Cinco bacias foram instaladas nos banheiros sanitários da empresa Fluir Engenharia, situada na Rodovia do Sol, Vila Velha – ES. De dois em dois dias, as fezes eram coletadas e secadas, conforme item 4.3.1.1

c) Uma outra parte foi coletada no laboratório de análises clínicas Bioclínico, situado na Av. Rio Branco, 310 – Santa Lúcia – Vitória-ES. E também no Laboratório Deomar Bittencourt, situado à rua Carlos Martins, 594 – Jardim Camburi – Vitória – ES.

A coleta das amostras foi feita procurando-se abranger um maior número de indivíduos e diversidade de alimentação possível. Deve-se salientar que esses laboratórios recebem materiais de várias regiões da Grande Vitória.

No caso dos laboratórios, uma pequena quantidade da biomassa era retirada dos recipientes para uso do laboratório, e o restante era cedido para o uso nesse trabalho. A coleta era realizada a cada dois dias e, nesse intervalo, as fezes ficavam armazenadas em geladeira no próprio laboratório.



**Figura 4-1:** Uma das bacias sanitárias secas, segregadoras, utilizadas para coleta dos excretas humanos na ETE – UFES.

No momento da coleta nos laboratório de análises clínicas, as fezes se apresentavam embaladas em recipientes plásticos hermeticamente fechados, pesando em torno de 30 g cada recipiente (Figura 4-2), os quais eram colocados em sacos plásticos (Figura 4-3) específicos para descarte desse tipo de material. Na abertura dos recipientes, o material fecal se apresentava nas cores variando de marrom claro a marrom escuro (Figura 4-4).



**Figura 4-2:** Embalagem para transporte da biomassa.



**Figura 4-3:** Embalagem da coleta.



**Figura 4-4:** Coloração típica das amostras *in natura*.

#### **4.1.2 Preparação das Amostras e dos Corpos de Prova**

Para evitar a contaminação pessoal, foram utilizadas luvas cirúrgicas, máscaras e óculos de proteção apropriados, além de jaleco específico para uso em laboratório.

Excetuando-se os casos em que a coleta era feita para a determinação do teor de umidade, em todos os outros casos de coleta - após a abertura dos recipientes - as fezes eram transferidas para uma estufa de pré-secagem e esterilização.

As amostras foram preparadas de acordo com o ensaio desejado e passaram por três tipos básicos de preparação: Para determinação do poder calorífico, para queima no reator de bancada e para queima no Gaseificador.

As amostras foram então trituradas e, posteriormente, passadas em peneiras padrão com malhas nas medidas de 2, 5, 15, 30 e 50 mm, conforme ensaio desejado de acordo com a Tabela 4-1.

**Tabela 4-1:** Granulometrias utilizadas nos ensaios.

Diâmetro da partícula				
Aplicação				
Calorímetro	Reator de bancada	Gaseificador		
≤ 2 mm	~ 5 mm	~ 15 mm	~ 30 mm	~ 50 mm

Para a determinação do poder calorífico, o material foi triturado até atingir uma granulometria  $\leq 2$  mm, homogeneizado e prensado<sup>1</sup> em um molde apropriado fornecido pelo fabricante do calorímetro. Foram então conformados 05 corpos de prova num formato cilíndrico, com diâmetro de 8 mm, pesando, aproximadamente, 1 grama cada.

Para o ensaio no reator de bancada, o material foi triturado e peneirado com diâmetro em torno de 5 mm.

Para ensaio no gaseificador, o material foi triturado e peneirado de modo a se obterem diâmetros em torno de 10 mm, 30 mm e 50 mm.

As diferentes granulometrias utilizadas no gaseificador foram escolhidas para se testar a influência do diâmetro da partícula na geração de singás. O valor máximo de

<sup>1</sup> Pressão suficiente apenas para conformar os corpos de prova.

~50 mm se deveu ao fato de que, após a secagem, as biomassas apresentavam diâmetros dessa ordem. Além disso, na prática, não haveria necessidade de se consumir energia para a sua moagem.

### **4.1.3 Amostras para Ensaio em Função da Dieta**

Foram consideradas as fezes de um único indivíduo adulto (entre 50 e 60 anos), ingerindo distintamente durante um período de tempo pré-estabelecido três classes de alimentos (aqui chamadas de fases), intercaladas em três etapas, da seguinte forma:

Etapa 1- composta por três fases:

I. Fase 1: Ingestão somente de alimentos ricos em gordura (carne, leite, ovos, queijo amarelo, etc.), por três dias consecutivos (dieta estimada com sendo muito calórica).

II. Fase 2: Ingestão somente de alimentos ricos em carboidratos (macarrão, arroz, feijão, batata, pão, etc.), por três dias consecutivos (dieta estimada como sendo de média caloria em relação à da fase 1).

III. Fase 3: Ingestão somente de alimentos à base de fibras (banana, maçã, melão, goiaba, melão, alface, repolho, cenoura, pepino, beterraba, etc.), por três dias consecutivos (dieta estimada como sendo de caloria inferior à da fase 2).

As etapas 2 e 3 foram constituídas das mesmas três fases e intercaladas de, aproximadamente, uma semana para regularização do metabolismo, possibilitando, assim, a aquisição de três amostras distintas para cada fase. No terceiro dia de cada fase (período também adotado por SOUTHGATE e DURNIN, 1969), as fezes foram coletadas em um recipiente plástico, hermeticamente fechado, para evitar a evaporação da água.

Foi também levado em consideração que o indivíduo fornecedor da biomassa tinha uma frequência de evacuação de duas vezes por dia para garantir que, ao final do terceiro dia, as fezes coletadas eram correspondentes ao tipo de alimentação ingerida.

As amostras foram então secadas em estufa a 105 °C até massa constante e, posteriormente, conformadas em corpos de prova, cuja coloração típica em função da dieta calórica é apresentada na Figura 4-5.



**Figura 4-5:** Formas dos corpos de prova e sua coloração típica em função da dieta calórica.

## 4.2 FEZES DE OUTROS ANIMAIS

### 4.2.1 Coleta, Amostragem e Preparação

A coleta dessas biomassas foi realizada da seguinte forma:

a) Fezes de boi: foram coletadas 05 (cinco) amostras, em dias alternados, com intervalo de uma semana, aproximadamente, entre uma coleta e outra, totalizando 15 amostras. A coleta era feita em um curral da zona rural da cidade de Domingos Martins - ES. A alimentação básica dos animais consistia em 70%, de capim e 30%, de ração, em massa. Nesse caso as fezes foram previamente misturadas antes da coleta;

b) Fezes de porco: Usou-se o mesmo procedimento e local do item (a), porém, a alimentação era baseada em ração; as fezes foram, também, misturadas antes da coleta;

c) Fezes de galinha: Usou-se o mesmo procedimento do Item (a). As fezes foram coletadas em uma granja, também na zona rural da cidade de Domingos Martins. A alimentação era à base de ração, e as fezes já se encontravam misturadas;

d) Fezes de cão: Foram coletadas em um hotel/hospital para cães em Jardim Camburi-Vitória-ES. Para esse caso, as fezes foram coletadas ao final do dia e englobava, aproximadamente, fezes de 40 cães, entre porte grande, médio e pequeno. A alimentação era à base de ração, e as fezes foram misturadas no ato da coleta.

A manipulação e a inativação biológica seguiram os mesmos procedimentos utilizados no item 4.1.2

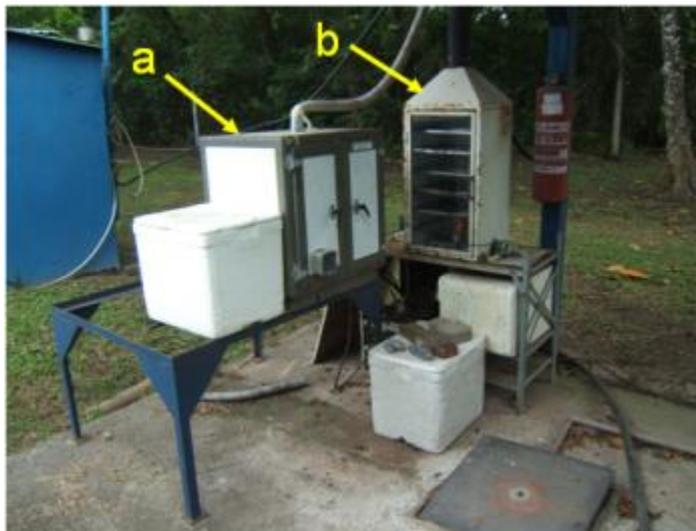
A preparação das amostras para a determinação do poder calorífico superior das fezes de outros animais seguiu os mesmos procedimentos para as fezes humanas.

## 4.3 EQUIPAMENTOS

### 4.3.1 Estufa de Pré-secagem e Secagem

A estufa de pré-secagem (Figura 4-6<sub>a</sub>) foi construída em aço carbono, contendo em sua base uma resistência elétrica de 500 W. Um ventilador centrífugo insuflava ar sobre a resistência elétrica, no sentido ascendente, permitindo o aquecimento da biomassa e o carreamento da umidade.

O secador (Figura 4-6<sub>b</sub>) foi construído a partir de uma estufa de esterilização convencional com temperatura na faixa dos 105 °C, sendo nela adaptado um pequeno exaustor para auxiliar o carreamento da umidade.



**Figura 4-6:** Secador de biomassa (a) e pré-secador (b).

#### 4.3.1.1 Procedimento de Secagem

As fezes humanas, após retiradas dos respectivos recipientes, eram colocadas em bandejas de alumínio e levadas ao pré-secador, mantido a 80 °C, por um período de 12 horas, para pré-secagem e esterilização (Figura 4-7). Após esse processo, as fezes eram armazenadas em caixas de isopor (Figura 4-8).



**Figura 4-7:** Vista interna do pré-secador de biomassa.



**Figura 4-8:** Amostras de biomassa após pré-secagem armazenadas em caixas de isopor.

Antes do seu uso no reator de bancada ou gaseificador, as fezes eram colocadas no secador de biomassa (Figura 10-a) para extrair todo o conteúdo de umidade.

As amostras utilizadas na determinação do PCS, em função da dieta alimentar, foram secadas em uma estufa de menor capacidade nas proximidades do calorímetro.

Deve-se salientar o odor característico, não só das fezes *in natura*, mas o que era exalado durante o processo de secagem por ser bastante repugnante. Um outro fato que deve ser salientado é que, durante as duas primeiras semanas, as moscas se apresentavam em grande número no momento da abertura dos recipientes e que, após esse período, elas simplesmente desapareceram. Acredita-se que o odor exalado durante o processo de secagem, e que ficava impregnado nos próprios secadores de biomassa e vizinhanças, serviram como repelente contra esse tipo de inseto.

### **4.3.2 Calorímetro e Balança Analítica**

O calorímetro utilizado na determinação do PCS é de modelo GCA-Unicamp (Figura 4-9), e a balança analítica é da marca QUIMIS, sendo periodicamente rastreada pelos padrões da Rede Brasileira de Calibração (RBC) INMETRO.



**Figura 4-9:** Calorímetro GCA usado na determinação do PCS.

Para a determinação do PCS, inicialmente foi feita a calibração do calorímetro utilizando-se um combustível padrão de poder calorífico conhecido (ácido benzoico). Foram feitos 5 ensaios para a determinação da constante do equipamento e, a partir daí, determinou-se o poder calorífico das biomassas conforme norma ABNT NBR 8633/84.

Foram feitos cinco ensaios para cada tipo de amostra determinando-se, assim, o poder calorífico superior médio para cada amostra.

Antes de serem levadas ao calorímetro para determinação do PCS, as amostras eram novamente secadas em estufa a  $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$  até massa constante. Os mesmos procedimentos citados anteriormente foram realizados para as fases 2 e 3 de cada etapa descrita no item 4.1.5.

A determinação do PCS das fezes de outros animais (cão, porco, boi, galinha) seguiu os mesmos procedimentos das fezes humanas.

O poder calorífico inferior foi determinado através da equação 27:

$$PCI = PCS - \frac{1795,7 \cdot m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{comb}}} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (27)$$

Onde:

- 1795,7 é o calor latente de mudança de fase da água (em kJ/kg) a 30 bar (pressão interna da bomba calorimétrica);
- $m_{H_2O}$  é a massa de água presente no combustível (kg);
- $m_{comb}$  é a massa de combustível (kg).

## 4.4 ANÁLISES TERMOQUÍMICAS

Para uma caracterização mais abrangente, uma série de análises foi realizada para identificar as características termoquímicas, a composição elementar, assim como os teores macroscópicos de composição. Com base nessa proposição, foram utilizados laboratórios da própria universidade e outras instituições. O principal objetivo dessa investigação foi conhecer a forma do craqueamento térmico dessas biomassas e adquirir subsídios para uma melhor interpretação dos resultados obtidos.

### 4.4.1 Análise Elementar e Imediata

A determinação dos metais pesados e dos outros elementos presentes na biomassa, bem como nas cinzas, foi feita no Laboratório de Petróleo da Universidade Federal do Espírito Santo (LABPETRO-UFES), através da técnica ICP OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry), à luz da Norma ASTM 5373-93 (Figura 4-10). As amostras foram digeridas em forno de micro-ondas Multiwave 3000, Anton Paar, conforme EPA 3052, e analisadas em ICP OES 7000DV, PerkinElmer.

A determinação dos elementos carbono, hidrogênio, fósforo e enxofre foi feita no LABPETRO – UFES, e O&G (Óleos e Graxas) foi feita no Laboratório de Saneamento do Departamento de Engenharia Ambiental da UFES, utilizando-se o Aparelho Soxhlet (Método de Extração Soxhlet 5520 D). Nitrogênio total foi determinado através do Método de Kjeldahl 4500-Norg.

O teor de cinzas foi determinado com base no Método ASTM 3174-00 (desenvolvido para carvão e coque), e serviu como parâmetro durante as análises que foram realizadas em forno pré-aquecido a 300 °C; em seguida, aquecido até 950 °C, ao final de duas horas. O teor de cinzas foi, então, determinado como indicado na Equação 28,

$$\text{cinzas, \%} = \frac{D}{C} \times 100 \quad , \quad (28)$$

$C$  = massa da amostra antes do aquecimento (g), e

$D$  = massa da amostra após aquecimento (g),

Foi também determinado o percentual de cinzas resultante do processo de gaseificação no reator de bancada com deficiência de ar (cerca de 5% de  $O_2$ ) e do processo de queima no calorímetro, onde a queima é realizada em atmosfera rica em  $O_2$  (pressão de 30 bar).



**Figura 4-10:** Equipamento para Análise Elementar - CE Instruments/EA 1110.

**Fonte:** LABPETRO - UFES.

A análise imediata foi realizada em parceria com o Núcleo de Competências em Química do Petróleo (LABPETRO – UFES). O teor de umidade foi determinado por secagem, em uma estufa a 105 °C, durante uma hora, segundo o Método ASTM 3173-87.

De acordo com as recomendações da norma, o teor de umidade foi determinado segundo a Equação 29:

$$\text{umidade, \%} = [(A - B)/A] \times 100 \quad , \quad (29)$$

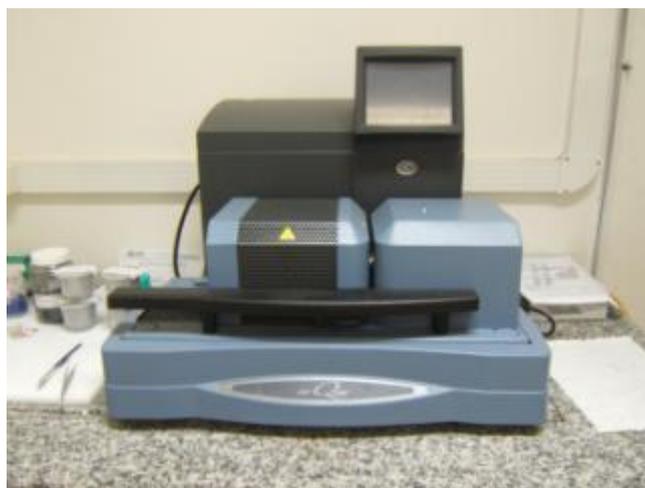
onde:

A = massa da amostra antes do aquecimento (g), e

B = massa da amostra após aquecimento (g).

#### 4.4.2 Termogravimetria (TG) e Análise Termogravimétrica Diferencial (DTA)

As curvas TG e DTA foram obtidas em parceria com o LABPETRO – UFES, utilizando o equipamento TA INSTRUMENTS, modelo Q600, com capacidade para até 50 mg de amostra e temperatura máxima de aquecimento equivalente a 1500 °C (Figura 4-11). Nesse modelo, é possível realizar a análise termogravimétrica e a análise térmica diferencial simultaneamente devido à existência de um termopar de referência. Nos ensaios realizados, utilizou-se cadinho e haste de alumina, e taxa de aquecimento de 10 °C/min até a temperatura de 1000 °C, com fluxo ar sintético de (50mL/min), com uma massa de amostra de, aproximadamente, 25,0 mg.

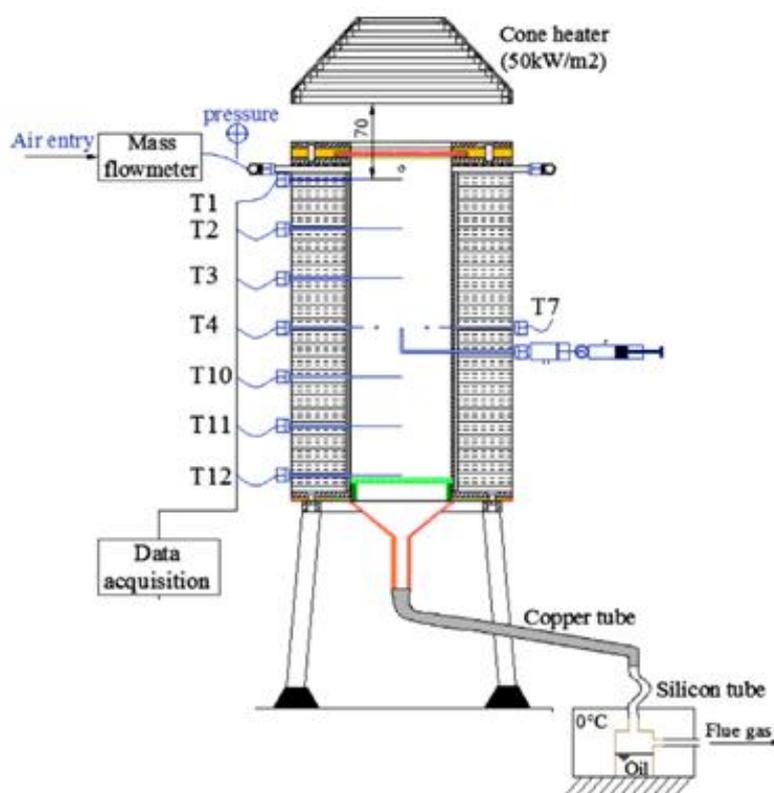


**Figura 4-11:** Analisador SDT Q600 da TA Instruments.

**Fonte:** LABPETRO - UFES.

## 4.5 REATOR DE BANCADA

Para uma análise preliminar objetivando avaliar a possibilidade de se utilizar a biomassa fecal, sem mistura com outras biomassas, possíveis gases e os resíduos gerados, foi construído um reator de bancada, em aço inox, conforme desenho esquemático da Figura 4-12:



**Figura 4-12:** Desenho esquemático do gaseificador de bancada do tipo contracorrente (Updraft).

**Fonte:** MONHOL e MARTINS (2014).

O reator tem as seguintes dimensões: 450 mm de comprimento e 73 mm de diâmetro interno, isolado termicamente, sendo a tampa inferior em formato de cone, com uma saída para os gases, e a tampa superior, uma placa de quartzo para possibilitar a ignição por radiação (Figuras 4-13 e 4-14):



**Figura 4-13:** Reator de bancada com os aparatos de medição.



**Figura 4-14:** Parte superior do reator de bancada, onde se observa o cone de ignição (a) e os dutos de entrada de ar (b).

O sistema de ignição é composto por uma resistência elétrica de 500 W e 220 V em formato de cone e revestida externamente por um cone também em aço inox (cone de ignição). Entre o cone de ignição e a tampa de quartzo, foi colocada uma folha de isolante térmico removível para permitir iniciar a ignição no tempo desejado. No centro do cone de ignição, foi introduzido um termopar do tipo K, para medir a temperatura de ignição.

O corpo do reator é equipado com 8 termopares, distribuídos ao longo do seu comprimento e espaçados entre si de 45 mm, e mais 5 termopares, distribuídos uniformemente ao longo da circunferência do reator e posicionados a 200 mm do seu topo, objetivando a verificação do comportamento da velocidade da frente de combustão (Figura 4-12).

Para a aquisição da pressão, foi utilizado um manômetro de mercúrio sendo a tomada de pressão próximo ao topo do reator.

A alimentação de ar foi feita por quatro tubos em aço inox, no topo do reator, distribuídos igualmente ao longo de sua circunferência, interligados em paralelo e com uma saída para um rotâmetro devidamente calibrado para medição da vazão.

Os gases gerados, cuja saída era por baixo do reator, passava por um sistema de lavagem para retenção dos voláteis condensáveis antes de serem lançados na atmosfera por meio de um sistema de exaustão. Esse sistema de lavagem era composto por três recipientes de vidro, contendo um pouco de água em seu interior, interligados em série, e envoltos por uma solução de água e gelo para resfriamento.

A coleta dos gases para a determinação de sua composição era feita por outro tubo posicionado também no cone inferior. Os gases passavam então por um filtro seco antes de entrarem no analisador de gases.

#### **4.5.1 Procedimento de Ensaio**

Após o carregamento do reator, a ignição era dada da seguinte forma: quando o cone de ignição apresentava temperatura da ordem de 600 °C, a folha de isolante térmico que estava posicionada entre o cone de ignição e o topo do reator era retirada permitindo que a radiação inflamasse a biomassa. Na figura 4-15, pode-se observar o momento em que a biomassa entra em combustão.



**Figura 4-15:** Topo do reator mostrando o início de ignição da biomassa.

Com o passar do tempo, a frente de chama ia avançando contra a biomassa fazendo o craqueamento térmico da mesma. Esse processo gerava gases característicos como  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $C_xH_y$ ,  $NO_x$ , além de grande quantidade de condensado de alcatrão.

Depois do primeiro ensaio com o reator à plena carga, observou-se um tempo muito longo para a queima total da biomassa (cerca de 6 horas). Em função disso, passou-se a utilizar somente meia carga (370 g), que era posicionada da metade superior do reator para cima. Dessa forma, somente as temperaturas dos termopares T1 a T4 foram medidas (Figura 4-12).

## 4.6 GASEIFICADOR

O gaseificador utilizado nesse trabalho foi o modelo ALL POWER PELLET GEK 20 kW, de fabricação americana, adquirido por meio do PPGEA/PPGEM, e que se encontra no Laboratório de Motores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFES (Figura 4-16).



**Figura 4-16:** Gaseificador de biomassa ALL POWER PELLET GEK 20 KW.

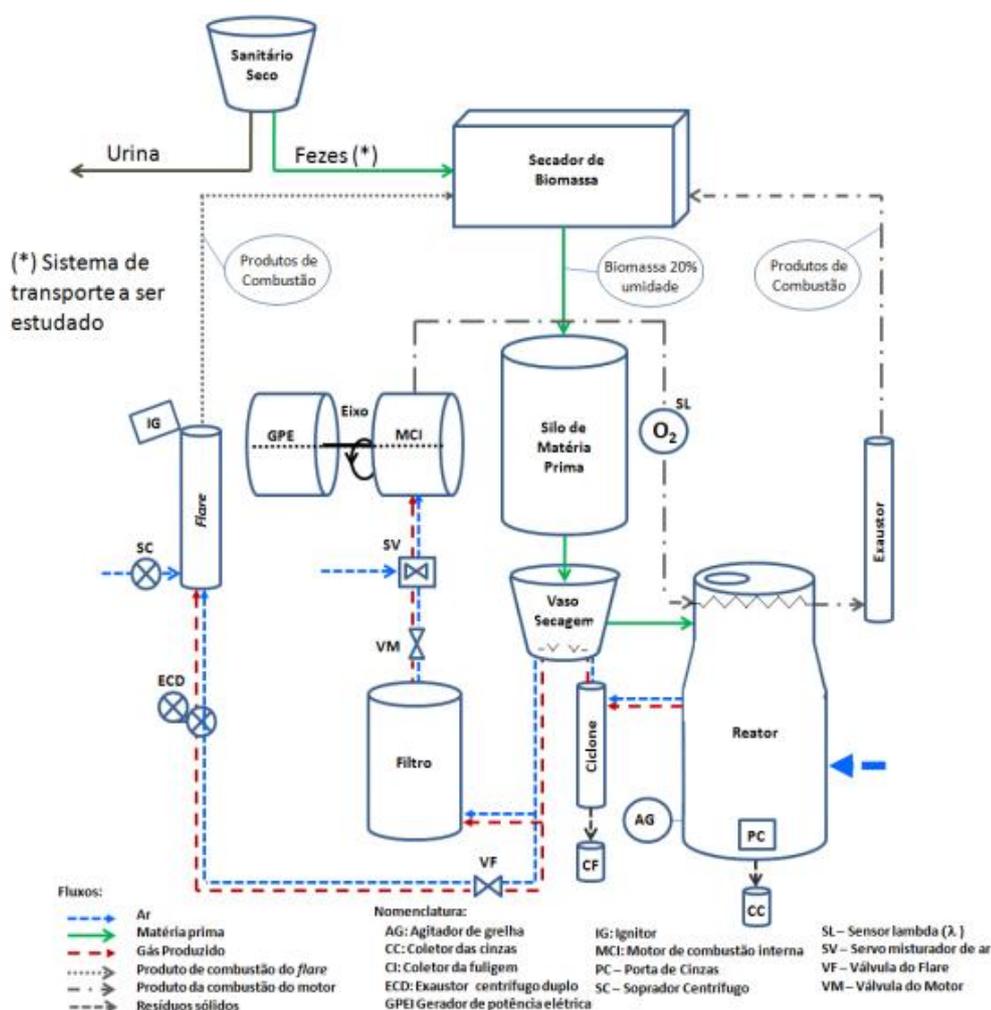
Tendo em vista que o gaseificador não pode operar dentro do laboratório (ambiente fechado), pelos riscos de emissão de gases tóxicos, sua viabilização foi feita com a construção de uma plataforma em aço e alumínio (Figura 4-17), anexa ao laboratório de Motores.



**Figura 4-17:** Plataforma para possibilitar o uso do gaseificador de biomassa fora do laboratório.

O gaseificador ALL POWER PELLET é, na sua essência, uma unidade de geração de energia elétrica que usa como combustível o singás, gerado num gaseificador de biomassa, montado na mesma unidade. Essa unidade é montada em um pellet, dotado de roldanas, que possibilita a sua movimentação e transporte. O gaseificador é do tipo cocorrente (*Downdraft*), conforme descrito no Item 3.2.

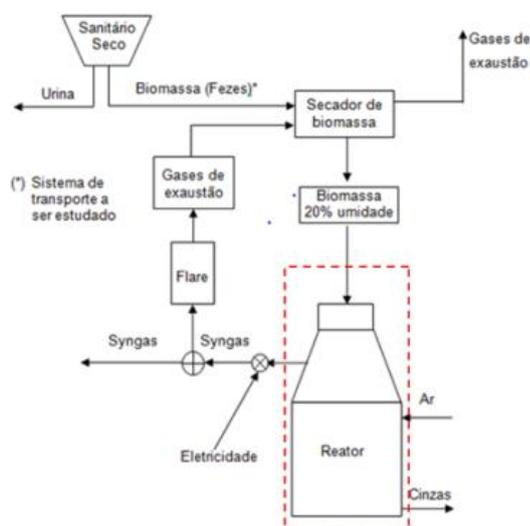
O fluxograma de processo geral do Gaseificador GEK de 20kW é mostrado na Figura 4-18, que permite, a qualquer momento, utilizar singás para a produção de energia elétrica ou como uma fonte de calor, bastando, para isso, o acionamento das válvulas respectivas.



**Figura 4-18:** Fluxograma de processo contendo as configurações: reator-flare-gases de exaustão e reator-motogerador-gases de exaustão + secador de biomassa.

Nesse sistema proposto, o reator é alimentado com biomassa (já com o teor de umidade desejado) pelo processo de batelada e também alimentado com ar. A biomassa é, então, queimada com déficit de ar, gerando singás.

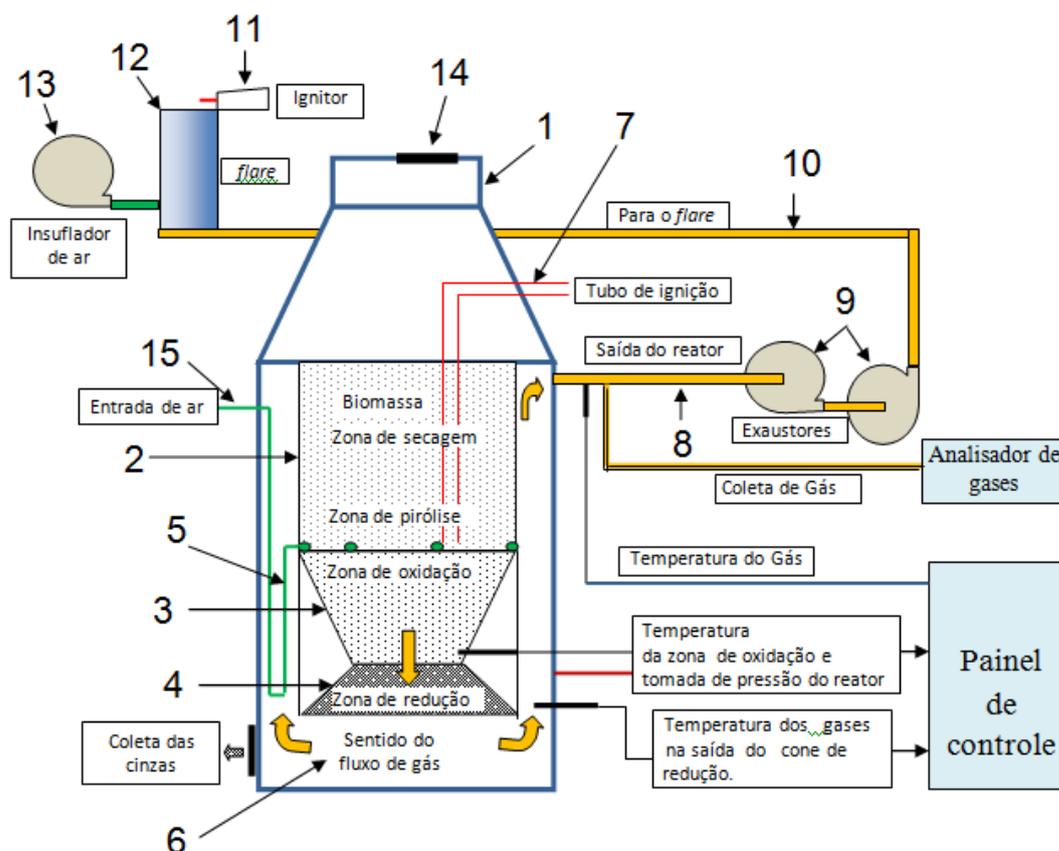
Como a proposta desse trabalho consiste essencialmente na gaseificação da biomassa fecal e posterior determinação dos parâmetros *eficiência exergética ambiental* e *índice exergético de renovabilidade*, foi utilizada somente uma parte do sistema, que consiste basicamente do reator destacado pela linha pontilhada em vermelho (Figura 4-19).



**Figura 4-19:** Fluxograma de processo do sistema de tratamento via gaseificação de biomassa proposto (GEK 20 kW).

#### 4.6.1 Descrição do Gaseificador

O desenho esquemático do gaseificador é apresentado na figura 4-20.



**Figura 4-20:** Desenho esquemático do gaseificador com suas partes e zonas de processo, bem como dos pontos de tomada de dados.

O gaseificador é composto pelo reator (1) e seus acessórios externos: duto de saída de gás (8), exaustores (9), duto de condução de gás para o *flare* (10), ignitor (11), queimador (*flare*) (12) e insuflador de ar (13).

O reator (1), por sua vez, é constituído internamente pelas seguintes partes e zonas:

#### Partes internas:

- (2) cilindro de biomassa;
- (3) cone de entrada;
- (4) cone de saída;
- (5) pré-aquecedor de ar;
- (6) depósito de cinzas;
- (7) duto de ignição;
- (14) Tampa de inspeção e recarga.

**Zonas de processo:**

- **zona de secagem:** partes central e superior do cilindro de biomassa (2);
- **zona de pirólise:** parte inferior do cilindro de biomassa (2);
- **zona de oxidação:** parte superior do cone de entrada (3);
- **zona de redução:** parte superior e central do cone de saída (4).

O ar, que é sugado pelos exaustores (9), entra no reator no ponto (15), é pré-aquecido em (5) e alimenta as reações de oxidação (zona de oxidação). O calor gerado nesse processo aquece a biomassa que está imediatamente acima, formando a zona de pirólise (temperatura entre 250 °C a 500 °C) e fazendo, também, a secagem da biomassa situada na parte superior do reator (zona de secagem), com temperaturas entre 30 °C a 130 °C. Os produtos (voláteis) gerados na zona de pirólise, juntamente com a umidade da zona de secagem, são forçados a passar pela zona de oxidação devido ao fluxo descendente do ar, fazendo o craqueamento térmico desses produtos (principalmente do alcatrão). Os gases (singás) que são formados basicamente na zona de redução seguem o fluxo ascendente pela parte externa dos cones (3) e (4) e do cilindro (2), passando pelos exaustores (9) e conduzidos para o *flare* (12) pelo duto (10). No flare, o gás pode ser queimado, ou não, dependendo do objetivo do projeto.

#### 4.6.1.1 Teor de Umidade para o Gaseificador

A escolha dos teores de umidade ensaiados foi para se testar a influência desses teores na geração do singás. Foram testados os teores de 0%, 10% e 20% de umidade, sendo este último o valor limite que, segundo a literatura (BEJARANO – 2009, ANDRADE – 2007 e (OBERNBERGER - 2008), permite o funcionamento desse tipo de reator (*Downdraft*) com uma boa eficiência.

A determinação dos teores de umidade das amostras para 0% seguiu os mesmos procedimentos adotados em 4.1.3.1. Para os teores de umidade diferente de zero, as amostras foram umedecidas com água, na forma de *sprey*, deixadas em recipiente fechado por um período de 12 horas para absorção da água e foram

sendo secadas gradativamente em estufa e pesadas até atingir o valor desejado, conforme Equação 29.

#### 4.6.1.2 Vazão de Ar

Antes de os ensaios serem realizados, foram feitas calibrações da vazão de ar em função da diferença de pressão com uma placa de orifício (Figura 4-21). Para todos os ensaios realizados, foi utilizada a vazão máxima (diferença de pressão máxima) produzida pelos exaustores (2 exaustores) que equipam o próprio gaseificador, indicados na Figura 4-20 e visualizados na Figura 4-28b



**Figura 4-21:** Sistema de medição da vazão de ar.

#### 4.6.1.3 Recarga da Biomassa

O carregamento da biomassa foi feito através de uma janela de inspeção e recarga situada no topo do reator (Figura 4-22). O carregamento foi realizado de tal forma que a biomassa ficasse acima da zona de oxidação, obrigando os produtos da pirólise (principalmente o alcatrão) a passarem pela zona de oxidação para serem queimados.



**Figura 4-22:** Topo de reator onde se observa a janela de inspeção e recarga.

#### 4.6.1.4 Pontos de Tomada de Temperatura e Pressão

As temperaturas internas do gaseificador (zona de oxidação e zona de redução) foram obtidas pelos próprios termopares do gaseificador conforme Figura 4-23. A tomada de temperatura de saída dos gases foi feita por um termopar do tipo K instalado diretamente no centro do duto de saída do reator, conforme Figura 4-24.



**Figura 4-23:** Ponto de tomada de pressão interna do gaseificador bem como da temperatura do gás logo após a sua saída da zona de oxidação.



**Figura 4-24:** Ponto de coleta do gás e de sua temperatura na saída do reator.

## 4.7 ANÁLISE DE GASES

A coleta dos gases foi feita logo após a saída do reator por meio de uma mangueira de silicone (Figura 4-24) conectada a um analisador de gases de fabricação italiana, da marca TESTO, modelo 454 M/XL e com capacidade para medição *on line* (Figura 4-25). Antes de entrar no analisador, os gases passavam por um filtro intermediário do tipo seco para evitar a entrada de particulados no analisador.



**Figura 4-25:** Analisador de gases, marca TESTO, modelo 454 M/XL.

No analisador, foram medidos os teores dos seguintes gases: CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e NO<sub>x</sub>, onde os gases O<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub> foram determinados através de células eletroquímicas e, CO<sub>2</sub>, por infravermelho.

Para comparar com os resultados iniciais, do ensaio com 20% de umidade e diâmetro da partícula de 50 mm, foram retiradas três amostras para análise no Laboratório de química da Arcelor Mittal através de cromatografia gasosa. Uma parte desses gases foi coletada em ampolas de vidro conforme ASTM 1247-C e foram fornecidas pela própria Arcelor Mittal (Figura 4-26). Uma outra parte foi coletada em um balão plástico devidamente preparado para tal.

#### 4.7.1 Coleta com as Ampolas

As ampolas de coleta eram inicialmente preenchidas com água. No momento da coleta, a bomba era ligada, e o registro superior da ampola era aberto. Em seguida, abria-se o registro inferior para que a água escoasse lentamente permitindo, assim, a entrada do gás na ampola que era impulsionado por uma bomba do tipo usada em aquário. Quando toda a água se esgotava, fechava-se o registro inferior e, depois, o superior. A ampola era revestida com plástico preto para evitar a incidência de luz. Após preenchidas com gás, as ampolas eram imediatamente colocadas em uma maleta apropriada para evitar a incidência da luz solar durante o transporte.



**Figura 4-26:** Desenho do tipo de ampola utilizada para a coleta do gás, com capacidade de 250 ml, utilizada para análise dos gases no laboratório de química da Arcelor Mittal.

### 4.7.2 Coleta com Balão Plástico

Antes da coleta, o balão de plástico era totalmente evacuado utilizando-se a própria linha de sucção da bomba de coleta dos gases (Figura 4-27a). Em seguida, o balão era fechado e colocado na linha de recalque para ser preenchido com gás. Deve-se ressaltar, também, que o referido balão foi revestido com plástico preto para evitar a incidência da luz (Figura 4-27b).



**Figura 4-27:** Balão plástico para coleta de gás (a), e envolto em plástico preto para evitar a incidência de luz (b).

### 4.7.3 Definição de Ensaios e Parâmetros

A análise estatística dos resultados de caracterização quali-quantitativa foi realizada com auxílio do software Excel, obtendo-se, assim, a estatística descritiva dos parâmetros analisados (média, desvio padrão, máximos, mínimos e coeficiente de variação).

Em função dos objetivos dos testes combinando umidade e diâmetro da partícula, foi definido que seriam feitos ensaios para testar os teores de umidade de 0%, 10% e 20% e também os diâmetros da partícula de 10 mm, 30 mm e 50 mm. Assim, montou-se a Tabela 4-2 cuja combinação resultou em 27 ensaios.

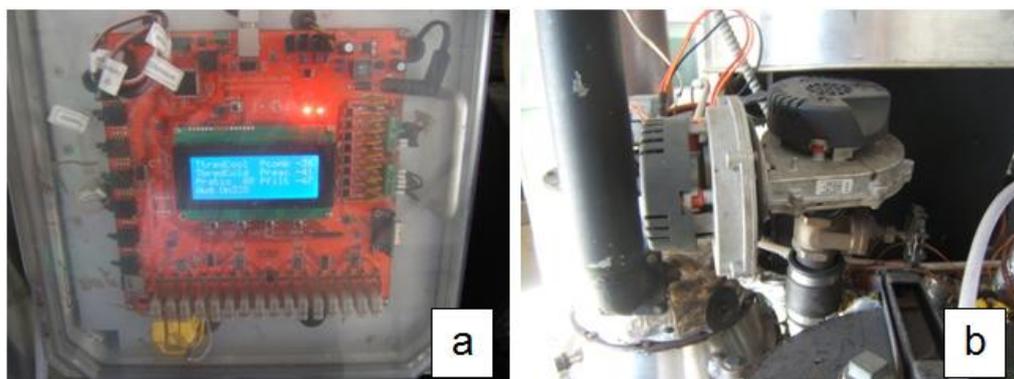
Tabela 4-2: Combinação de ensaios realizados.

Gaseificador				
Ensaio	Umidade (%)	Diâmetro da partícula (mm)		
		~ 15	~ 30	~ 50
	0	A	A	A
		B	B	B
		C	C	C
	10	A	A	A
		B	B	B
		C	C	C
	20	A	A	A
		B	B	B
		C	C	C

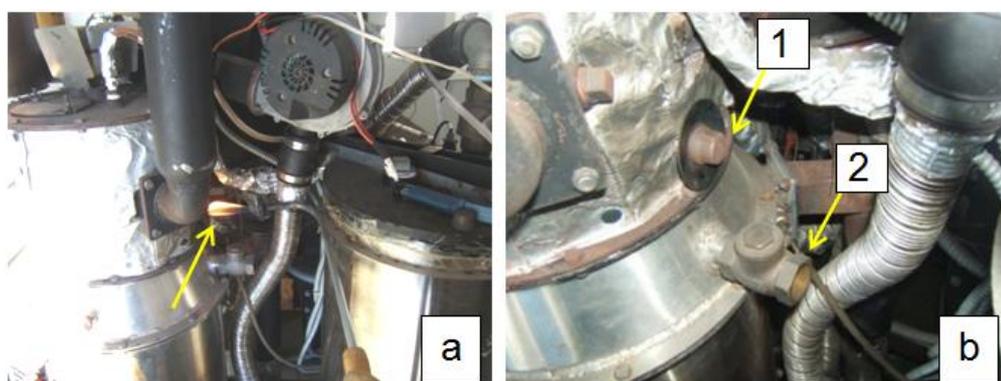
#### 4.7.4 Procedimento de Ensaio

Após o carregamento do reator, e com o painel e os instrumentos ligados, era feita a verificação da pressão interna do reator ligando-se os exaustores (Figuras 4-28<sub>a</sub> e 4-28<sub>b</sub>). Com um maçarico a gás GLP, dava-se início à ignição deixando a chama do maçarico penetrar no duto de ignição (Figura 4-29<sub>a</sub>). Assim que a temperatura da zona de oxidação atingia cerca de 150 °C, desligava-se o maçarico e fechava-se o duto de ignição com um tampão (Figura 4-29<sub>b</sub>). Nessa etapa era, também, ligado o analisador de gases.

Durante o experimento, eram anotadas as temperaturas e os percentuais de O<sub>2</sub> no analisador, fazendo-se assim, a correspondência de temperatura com os gases gerados. As temperaturas de início e final de combustão no *flare* eram também anotadas juntamente com os teores de O<sub>2</sub> correspondentes.



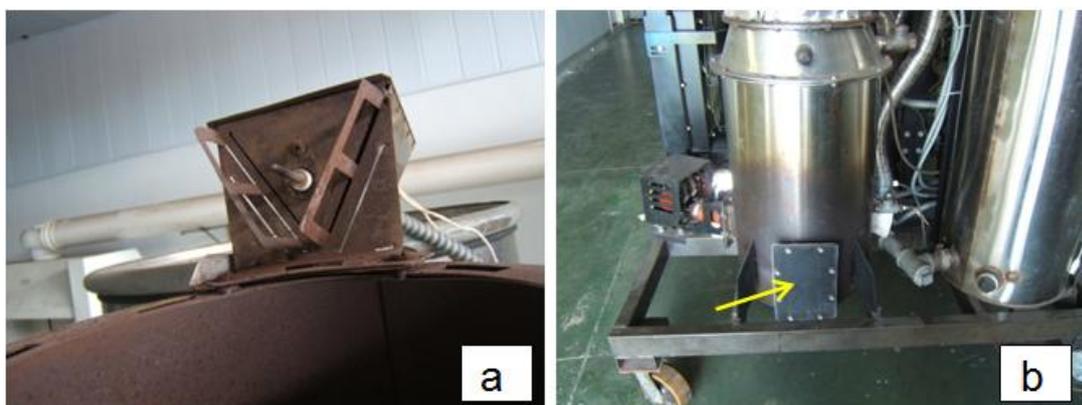
**Figura 4-28:** Painel de controle do reator (a), e exaustores (b).



**Figura 4-29:** Chama de ignição (a); tampão do duto de ignição (b-1) e válvula de entrada de ar (b-2).

Por uma questão de segurança, no momento em que o equipamento era ligado, o ignitor do *flare* também ficava constantemente ligado para garantir a queima dos possíveis gases gerados (Figura 4-30<sub>a</sub>).

Após cada ensaio, e resfriamento do reator, as cinzas eram coletadas através de uma janela posicionada na parte inferior do reator (Figura 4-30<sub>b</sub>).



**Figura 4-30:** Ignitor do flare instalado na boca de saída dos gases (a) e base do reator com a janela para inspeção e retirada das cinzas (b).

### 4.7.5 Análise Exergoecológica

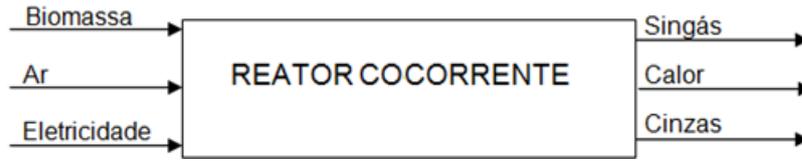
A análise exergoecológica consiste na determinação dos parâmetros de Eficiência Exergética Ambiental (definida pela Equação 10) e do Indicador Exergético de Renovabilidade (definido pela Equação 11), ambos adaptados para o sistema proposto.

Para a determinação desses parâmetros, foram feitas as seguintes considerações: as exergias foram calculadas com base nas equações desenvolvidas por SZARGUT *et al.*, (1988), também utilizados por BEJARANO (2009), em que o estado de referência para a condição de equilíbrio foi tomado como Temperatura normal  $T_n = 298,15$  K e Pressão normal  $P_n = 101,325$  kPa. A exergia química padrão de alguns elementos e compostos químicos, foi obtida de livros específicos de termodinâmica, bem como de algumas tabelas de trabalhos correlatos: BEJARANO (2009), SZARGUT *et al.*, (1988) e Mendes (2009).

#### 4.7.5.1 Balanço Exergético

O Esquema da Figura 4-31 apresenta os insumos e produtos que foram levados em consideração na análise exergética, sendo a Eficiência exergética ambiental ( $\eta_e$ ) calculada pela razão da exergia do produto final (ou efeito útil de processo) pela exergia total consumida dos recursos humanos e naturais, incluindo todos os insumos, conforme equação 30. A exergia do ar é considerada nula por estar nas condições de referência.

Num primeiro cenário, considerou-se somente o singás e as cinzas como produto e, num segundo cenário, o calor dissipado pelo reator foi também levado em consideração.



**Figura 4-31:** Esquema do balanço exergético para o sistema de tratamento proposto.

$$\eta_e = \frac{B_{singás} + B_{cinzas} + B_{calor}}{B_{biomassa} + B_{eletricidade}} \quad (30)$$

Onde:

$B_{singás}$  = exergia do singás, em kJ/kg;

$B_{cinzas}$  = exergia das cinzas, em kJ/kg;

$B_{calor}$  = exergia do calor dissipado pelo reator, em kJ/kg;

$B_{biomassa}$  = exergia da biomassa, em kJ/kg;

$B_{eletricidade}$  = exergia da eletricidade (exergia do exaustor), em kJ/kg;

Como as exergias mecânica e térmica da biomassa (combustível sólido) são, nesse caso, desprezíveis, a sua exergia foi calculada pela parcela química através da Equação 25 e a do combustível gasoso (singás) pelas parcelas química, mecânica e térmica (SANTOS, 2007), por meio das equações 32, 33 e 34, respectivamente.

$$B^q = (PCI) \cdot \left[ 1,0438 + 0,0013 \frac{H}{C} + 0,1083 \frac{O}{C} + 0,0549 \frac{N}{C} \right] \quad (31)$$

$$\dot{B}_s^q = \frac{\dot{m}_s}{\sum_{i=1}^7 y_i \cdot PM_i} \cdot \sum_{i=1}^5 y_i \cdot [B_i^{qp} + R \cdot T_0 \cdot \ln(y_i)] \quad (32)$$

$$\dot{B}_s^m = \frac{\dot{m}_s}{\sum_{i=1}^7 y_i \cdot PM_i} \cdot \sum_{i=1}^5 y_i \cdot R \cdot T_0 \cdot \ln\left(\frac{P_s}{P_0}\right) \quad (33)$$

$$\dot{B}_s^t = \frac{\dot{m}_s}{\sum_{i=1}^7 y_i \cdot PM_i} \cdot \sum_{i=1}^5 y_i \cdot \int_{T_0}^{T_c} C_{p_i} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot dT \quad (34)$$

Onde:

$B^q$  = Exergia química da biomassa, (kJ/kg);

$\dot{B}_s^q$  = Exergia química do singás, (kJ/kg);

$\dot{B}_s^m$  = Exergia mecânica do singás, (kJ/kg);

$\dot{B}_s^t$  = Exergia térmica do singás, (kJ/kg)

$B_i^{qp}$  = Exergia química padrão do componente "i", (kJ/kg);

$\dot{m}_s$  = Fluxo de massa do singás, (kg/s).

$y_i$  = Fração molar do componente "i"

$R$  = Constante do gás (kJ/kg.K)

$P_s$  = Pressão do singás (kPa)

$P_0$  = Pressão de referência (kPa)

$PM_i$  = Peso molecular do componente "i" (kg/kmol)

$Cp_i$  = Calor específico do componente "i" (kJ/kg.K)

$T_0$  = Temperatura de referência (K);

$T$  = Temperatura do singás (K).

O Indicador exergetico de renovabilidade ( $\lambda_r$ ) foi calculado pela razão entre a exergia dos produtos e pela soma das exergias não renováveis: exergia elétrica e exergia destruída, conforme equação 35:

$$\lambda_r = \frac{B_{singás} + B_{cinzas} + B_{calor}}{B_{eletricidade} + B_{destruída}} \quad (35)$$

Onde:

$B_{singás}$  = exergia do singás, (kJ/kg);

$B_{cinzas}$  = exergia das cinzas, (kJ/kg);

$B_{calor}$  = exergia do calor dissipado pelo reator, (kJ/kg);

$B_{eletricidade}$  = exergia da eletricidade (exergia do exaustor), (kJ/kg).

$B_{destruída}$  = exergia dos insumos (biomassa, eletricidade, ar) menos a exergia dos produtos (singás, cinzas, calor), (kJ/kg).

Como a exergia física da cinza é considerada nula, pois está nas condições de referência, a sua exergia foi calculada pela parcela química através da Equação 36

$$B_{cz}^q = \sum_{co=1}^n x_{co} \cdot b_{co}^q + R \cdot T_0 \cdot \ln x_0 \quad (kJ/kg) \quad (36)$$

Onde:

$B_{cz}^q$  = exergia química da cinza, em kJ/kg;

$x_{co}$  = fração molar do componente, em %;

$b_{co}^q$  = exergia química de cada componente da cinza, em kJ/kg.

Considerações:

- A fronteira do volume de controle envolveu apenas o reator do gaseificador;
- O processo foi considerado em regime permanente;
- A exergia do processo de secagem da biomassa não foi levada em consideração;
- As exergias dos insumos e produtos foram calculadas conforme tabelas do Apêndice C.

#### 4.7.5.2 Balanço Energético

Uma análise energética também foi realizada com base na metodologia descrita por RODRIGUEZ (2007). Para tal foi calculado o poder calorífico inferior do gás através da equação 37, conforme Nogueira e Lora, (2003).

$$PCI_g = 0,126 C_{CO} + 0,358 C_{CH_4} + 0,108 C_{H_2} \left( \frac{MJ}{Nm^3} \right) \quad (37)$$

Em que,  $C_{CO}$ ,  $C_{CH_4}$  e  $C_{H_2}$  são as concentrações volumétricas do gás produzido em valores percentuais.

Segundo RODRIGUEZ (2007), para o gás de biomassa produzido, a entalpia ( $h_g$ ) resulta do efeito dos vários gases que o compõem (composição do gás em base úmida) (equação 38).

$$h_g = C_{CO_2} \cdot h_{CO_2} + C_{CH_4} \cdot h_{CH_4} + C_{H_2} \cdot h_{H_2} + C_{N_2} \cdot h_{N_2} + C_{O_2} \cdot h_{O_2} + C_{CO} \cdot h_{CO} + C_{H_2O} \cdot h_{H_2O} \quad (38)$$

Em que:

$C_{\text{elem}}$ : Concentrações volumétricas do gás produzido em “porcentagens” (base

úmida):

$h_{\text{elem}}$ : Entalpia dos elementos que compõem o gás (kJ/kg).

A entalpia de cada um dos elementos que compõe o singás pode ser determinada utilizando os calores específicos a pressão constante ( $C_p$ ) dos gases apresentados (Perry, 1984), cujos valores estão expressos em função da temperatura em cal/mol.K. conforme a seguir:

$$Cp_{CO_2} = 10,34 + 0,0027T - 195500/T^2 \quad (39)$$

$$Cp_{H_2} = 6,62 + 0,00081T \quad (40)$$

$$Cp_{N_2} = 6,5 + 0,00100T \quad (41)$$

$$Cp_{O_2} = 8,27 + 0,000258T - 187770/T^2 \quad (42)$$

$$Cp_{H_2O} = 8,22 + 0,00015T + 0,00000134/T^2 \quad (43)$$

$$Cp_{CH_4} = 5,34 + 0,0115T \quad (44)$$

$$Cp_{CO} = 6,6 + 0,0012T \quad (45)$$

A entalpia de cada elemento do gás é dada pela equação 46.

$$h = h_f \int_{298}^{T_f} Cp \cdot dT \quad (46)$$

Em que:

$h_f$ : Entalpia de formação (kJ/kmol)

T: K

$C_p$ : kJ/kmol.K

Através da equação de reação (47), calculou-se a entalpia da biomassa.



Onde os produtos da reação são  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$  e  $N_2$ , e os reagentes são a biomassa e o ar. O salto entálpico ( $\Delta h$ ) é o poder calorífico (NOGUEIRA E LORA, 2003).

O PCI da biomassa foi então calculado em função do PCS através da equação 27, e a entalpia da biomassa através da equação 48.

$$\Delta h = -PCI = \sum_{PRODUTOS} hf - \sum_{REAGENTES} hf \quad (48)$$

Onde  $\Delta h$  = saldo entálpico (kJ/kg)

$hf$  = Entalpia de formação (kJ/kg)

Assim, o balanço de energia no gaseificador foi feito com base na equação 49.

$$m_b \cdot h_b + m_a \cdot h_a = m_g \cdot h_g + m_{cz} \cdot h_{cz} + Q_{dr} \quad (49)$$

Onde:

$m_b$  : Fluxo de biomassa que entra no gaseificador, (kg/s);

$m_g$  : Fluxo de gás produzido na gaseificação, (kg/s);

$m_a$  : Fluxo de ar introduzido no gaseificador, (kg/s);

$m_{cz}$  : Fluxo de cinzas, (kg/s);

$Q_{dr}$  : Calor dissipado pelo reator para o meio ambiente, (kW);

$h_b$  : Entalpia da Biomassa, (kJ/kg);

$h_g, h_a$  : Entalpia do gás e do ar, ((kJ/kg);

$h_{cz}$  : Entalpia das cinzas, (kJ/kg).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando que este trabalho tem como foco principal a produção de energias renováveis, procurou-se aqui fazer uma caracterização dessas biomassas, visando não só a sua aplicação como matéria-prima para geração de singás, mas também, como uma possibilidade de minimizar, através desse processo, os impactos no meio ambiente e na saúde da população.

### 5.1 O PODER CALORÍFICO SUPERIOR DA BIOMASSA FECAL

O poder calorífico superior (PCS) em base seca, das fezes humanas, utilizando uma amostragem mais abrangente através de coleta em laboratórios clínicos da cidade de Vitória, é apresentado na Tabela 5-1. É apresentado, também, o poder calorífico inferior (PCI) para os teores de umidade de 0%, 10% e 20%.

Comparando os valores de poder calorífico das fezes humanas com os de algumas madeiras nacionais, verifica-se que as fezes humanas possuem PCS e PCI bem acima daqueles das madeiras nacionais determinados por (QUIRINO *et al.*, 2005).

**Tabela 5-1:** Poder calorífico inferior (PCI) das fezes humanas em função do teor de umidade e PCI médio de madeiras nativas.

Poder calorífico inferior (kJ/kg) x teor de umidade para fezes humanas			Média do Poder calorífico das madeiras nacionais (QUIRINO et al, 2005)
PCS médio = 23.221 kJ/kg	Umidade (%)	PCI	PCS: 19.615 kJ/kg
	0	18.599	
	10	17.880	PCI: 15807 kJ/kg
	20	17.162	

Com base no Poder Calorífico Inferior das fezes humanas (18.599 kJ/kg), na taxa de geração dessa biomassa de 0,150 kg/pessoa-dia (WHO, 2008) e nas populações características de interesse (Brasil, Espírito Santo e Grande Vitória), montou-se a Tabela 5-2 em que é quantificada a energia rejeitada através das fezes em termos de Brasil, Espírito Santo e Grande Vitória.

**Tabela 5-2:** Potencial energético (em base seca) da biomassa fecal humana.

População (IBGE 2014)	Produção de fezes (t/dia)		Energia Rejeitada	
			MJ/dia	MW
	Base úmida	Base seca	Base seca	
Brasil (202,7 milhões)	30.400	6.083	113.137.717	1.309,0
Espírito Santo (3.89 milhões)	583	116,6	2.168.643	25,1
Grande Vitória (1,884 milhões)	282,6	56,52	835.839	12,2

Tomando a usina de ITAIPU como referência (20 turbinas e 14000 MW), observa-se que a energia rejeitada através da biomassa fecal humana, em termos de Brasil, corresponde quase duas das 20 turbinas em funcionamento e, para o Estado do Espírito Santo, corresponde à soma do que produzem as usinas de Rio Bonito (15 MW), Jucu (4,5 MW), Alegre (1,99 MW) e Viçosa (4,5 MW) juntas (edp-ESCELSA, 2015).

Motivado pelos valores encontrados anteriormente e levando-se em consideração a dificuldade de obtenção dos poderes caloríficos dessa biomassa na literatura, para efeito de comparação, determinou-se, também, os poderes caloríficos superiores das fezes de alguns animais: galinha, cachorro, porco e boi, por se tratar de animais mais comuns e populosos cujas fezes são de fácil coleta. A coleta e a caracterização térmica dessas biomassas foram feitas conforme Itens 4.2.1 e 4.3.1. Esses resultados são apresentados na Tabela 5-3.

**Tabela 5-3:** Poder calorífico superior (PCS) médio de fezes de alguns animais e do ser humano.

Espécie	PCS (base seca)	
	Kcal/kg	kJ/kg
Galinha	2.370	9.916
Cachorro	3.886	16.259
Porco	3.742	15.657
Boi	3.941	16.490
Humano	5.550	23.221

Observa-se, na Tabela 5-3, que os poderes caloríficos superiores das fezes do cachorro, porco e boi são bem próximos entre si. Já o das fezes da galinha tem um valor bem inferior, razão essa que, aparentemente, deve-se ao seu alto teor de resíduo (~40%). Embora a alimentação desses animais seja baseada em ração (para o boi, 70% capim e 30% ração), a galinha, por exemplo, é um animal que ingere, também, muita areia (sílica), daí o percentual de resíduo ser bastante elevado, diminuindo o seu poder calorífico. A mesma tendência se observa para o porco.

## 5.2 O PODER CALORÍFICO EM FUNÇÃO DA DIETA CALÓRICA

Tendo em vista que cada pessoa tem um metabolismo diferente e que o tipo de alimentação (em valor calórico) varia de pessoa para pessoa, bem como de região para região, procurou-se determinar como seria a variação do poder calorífico das fezes humanas em função da dieta alimentar, conforme procedimentos descritos no item 4.1.3.1.

Os valores de poder calorífico superior (PCS) em base seca de fezes humanas, em função da dieta alimentar, são mostrados na Tabela 5-4.

**Tabela 5-4:** Valores do PCS das fezes humanas em base seca, em função de dieta alimentar.

Tipo de alimentação	(PCS) em base seca	
	Kcal/kg	kJ/kg
Rica em gorduras (*)	6.425 ± 28	26.882 ± 117
Rica em carboidratos (**)	5.496 ± 22	22.995 ± 92
Rica em frutas e verduras (***)	4.726 ± 17	19.773 ± 71
Média	5.549 ± 22	23.217 ± 93
Média (coleta em laboratórios)	5.550 ± 30	23.221 ± 126
(*) À base de carne, ovos, queijo, leite, etc. (**) À base de feijão, arroz, macarrão, batata, pão, etc. (***) À base de banana, maçã, goiaba, melão, Alface, repolho, cenoura, pepino, etc.		

Os valores apresentados na Tabela 8 mostram que o poder calorífico das fezes variou consideravelmente em função do tipo de alimentação, indicando que a base alimentar foi determinante para os resultados obtidos.

Comparando os resultados da Tabela 8 com aqueles determinados por QUIRINO et al (2005), verifica-se que o poder calorífico em base alimentar de frutas e verduras é equivalente à maioria daqueles das madeiras nativas nacionais, o poder calorífico em base alimentar de carboidratos é ligeiramente superior e que o poder calorífico em base alimentar de gorduras são bem superiores aos das madeiras nativas.

Em princípio, podemos concluir que o poder calorífico das fezes dos animais, aqui analisadas devem também variar em função da sua dieta alimentar.

Em termos mundiais, o cálculo do quantitativo da energia contida nas fezes humanas, por continente e por país, é apresentado nas Tabelas 5-5 a 5-11. Essa análise foi feita com base na ingestão calórica per capita (ICPC) de cada país (FAO, 2012), na sua população e no Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) (UNDP, 2013).

Para esses cálculos, considerou-se:

- a) Para o ICPC > 3000 kcal, o poder calorífico das fezes foi assumido como sendo equivalente a uma alimentação rica em gorduras (PCS = 6.425 kcal/kg, com PCI = 5426 kcal/kg). Na falta do ICPC, considerou-se o IDH > 0,700. (Cor laranja).
- b) Para  $2000 \leq \text{ICPC} \leq 3000$  kcal, o poder calorífico foi assumido como sendo equivalente a uma alimentação rica em carboidratos (PCS = 5.496 kcal/kg, com PCI = 4687 kcal/kg). Na falta do ICPC, considerou-se  $0,500 \leq \text{IDH} \leq 0,700$ . (cor verde).
- c) Para o ICPC < 2000 kcal, o poder calorífico foi assumido como sendo equivalente a uma alimentação rica em frutas e legumes (PCS = 4.726 kcal/kg, com PCI = 3991 kcal/kg). Na falta do ICPC, considerou-se o IDH < 0,500. (cor azul)
- d) Média de fezes excretadas de 0,150 kg/pessoa-dia (WHO, 2008), o que corresponde a 0,03 kg de massa seca por pessoa/dia.

**Tabela 5-5:** Energia contida nas fezes humanas, por país. (América do Sul)

AMÉRICA DO SUL					
Energia rejeitada					
País	(kJ/dia)	(MW)	País	(kJ/dia)	(MW)
Argentina	2.847.1601.203	329,53	Guyana	472.824.363,9	5,47
Brazil	1,37603E+11	1592,62	Suriname	320.005.415,3	3,70
Bolivia	6.381.966.674	73,87	Paraguay	406.979.4072	47,10
Chile	10.456.248.499	121,02	Uruguay	2.011.307.796	23,28
Peru	18.102.259.067	209,52	Venezuela	18.150.658.323	210,08
Colombia	28.786.635.819	333,18	Trinidad and Tobago	1344235	<b>8,59</b>
<b>TOTAL</b>	<b>2957,96 MW</b>				
	Rica em gorduras				
	Rica em carboidratos				
	Rica em frutas e legumes				

**Tabela 5-6:** Energia contida nas fezes humanas, por país. (América do Norte)

<b>AMÉRICA DO NORTE</b>			
<b>Energia rejeitada</b>			
<b>País</b>	<b>(Kcal/dia)</b>	<b>(kJ/dia)</b>	<b>(MW)</b>
Canadá	5.785.269.405	24.206.148.137	280,16
Tanzânia (U.R)	7.137.06.310	29.861.951.088	345,62
Groelândia	9.163.700	38.341.841,42	0,44
Estados Unidos	51.903.551.576	2,1717E+11	2513,54
<b>TOTAL</b>	<b>3.139,76 MW</b>		

**Tabela 5-7:** Energia contida nas fezes humanas, por país. (América Central)

<b>AMÉRICA CENTRAL</b>					
<b>Energia rejeitada</b>					
<b>País</b>	<b>(kJ/dia)</b>	<b>(MW)</b>	<b>País</b>	<b>(kJ/dia)</b>	<b>(MW)</b>
México	84.318.143.170	975,90	Puerto Rico	2.416.770.141	27,97
Cuba	7.668.093.806	88,75	Curaçao	155872	0,86
Guatemala	9.330.687.806	107,99	Antigua and Barbuda	53.480.631	0,62
El Salvador	3.755.729.576	43,47	Dominica	49.270.577	0,57
Honduras	4.860.016.389	56,25	Barbados	194.836.082	2,26
Belize	199.888.587	2,31	Bahamas	225.076.604	2,61
Nicarágua	3.629.543.574	42,01	Jamaica	1.600.984.283	18,53
Costa Rica	2.905.011.425	33,62	Aruba	70.445.599	0,82
Panamá	2.309.779.290	26,73	Netherlands Antilles	32.082.025	0,37
Cuba	7.668.093.806	88,75	Turks and Caicos Islands	22.977.180	0,27
Haiti	5.240.771.965	60,66	Dominican Republic	6.194.461.180	71,70
Saint Vincent and the Grenadines	109371	0,70	Saint Lucia	183598	<b>1,17</b>
Bermudas	65181	0,42	Saint Kitts and Nevis	54789	0,35
Granada	106303	0,68	Cayman Islands	59226	0,33
Equador	15.9.82551	102,2	Sint Maarten (Dutch Part)	37664	0,20
<b>TOTAL</b>	<b>1.759,07 MW</b>				

Tabela 5-8: Energia contida nas fezes humanas, por país. (África)

ÁFRICA					
Energia rejeitada					
País	(kJ/dia)	(MW)	País	(kJ/dia)	(MW)
Angola	11.089.934.140	128,36	Madagascar	13.868.006.598	160,51
Argélia	15.670.361.591	181,37	Malawi	9.901.029.029	114,60
Benin	6.235.971.134	72,18	Mali	9.276.863.592	107,37
Botswana	1.199.354.469	13,88	Morocco	22.811.613.921	264,02
Burkina Faso	10.248.418.683	118,62	Mauritania	2.344.161.083	27,13
Burundi	5.251.464.004	60,78	Mauritius	741.840.710	8,59
Cabo Verde	296.302.923	3,43	Mozambique	15.574.750.192	180,26
Camarão	13.424.802.701	155,38	Namibia	1.381.383.233	15,99
Costa do Marfim	24.206.148.137	280,16	Niger	10.904.512.591	126,21
Djibouti	521.441.301	6,04	Nigeria	1,05026E+11	1215,58
Egito	56.793.696.127	657,33	Quênia	1,05026E+11	1215,58
Eritrea	3.274.378.044	37,90	Central African Republic	2.359.133.369	27,30
Etiópia	48.345.887.413	559,56	Congo, Rep.	2.681.941.014	31,04
Gabon	1.006.799.370	11,65	Congo, D. R.	2905011425	33,62
Ghana	15.556.630.329	180,05	Rwanda	7.118.777.782	82,39
Guinea	7.085.742.669	82,01	Senegal	8.559.072.487	99,06
Guinea-Bissau	1.027.098.982	11,89	Sierra Leone	3.650.789.803	42,25
Guinea-Equatorial	472.824.364	5,47	Seychelles	53.847.158	0,62
Gâmbia	1.123.087.958	13,00	Somália	5.413.224.244	62,65
Lesotho	1.234.021.011	14,28	South Africa	31.770.772.432	367,72
Libéria	2.586.796.287	29,94	Sudan	22.805.935.962	263,96
Libyan Arab Jamahiriya	4.259.150.278	49,30	Tunísia	10.996.600	83,71
Sao Tome and Principe	197882	1,26	Swaziland	1267704	8,11
Uganda	38.844.624	248,39	Togo	6993244	44,72
Zimbabwe	14599325	93,36	Chad	13211146	84,48
Yemen	24968508	159,66	Tanzania	50757459	324,57
Zambia	15021002	82,58	Comores	752438	4,13
<b>TOTAL</b>	<b>8254 MW</b>				

**Tabela 5-9:** Energia contida nas fezes humanas, por país. (Europa)

<b>EUROPA</b>					
<b>Energia rejeitada</b>					
<b>País</b>	<b>(kJ/dia)</b>	<b>(MW)</b>	<b>País</b>	<b>(kJ/dia)</b>	<b>(MW)</b>
Albânia	1.702.895.940	19,71	Maldova	206.839.075	2,39
Andorra	54.591.236	0,63	Malta	291.099.678	3,37
Áustria	5.812.738.945	67,28	Monaco	25.926.291	0,30
Belarus	6.449.902.092	74,65	Montenegro	365.821.331	4,23
Bulgária	4.251.417.479	49,21	Netherlands	11.479.179.534	132,86
Bélgica	7.645.352.282	88,49	Norway	3.498.390.797	40,49
Bosnia e Herzegovina	2.604.988.092	30,15	Países Baixos	11.458.417.933	132,62
Croácia	2.492.385.791	28,85	Poland	25.878.293.768	299,52
Cyprus	785.333.813	9,09	Romenia	13.561.137.097	156,96
Dinamarca	3.841.039.292	44,46	Portugal	7.081.538.211	81,96
Slovakia	3.187.849.911	36,90	Czech Republic	7.158.618.969	82,85
Estônia	894.707.670	10,36	Republic of Macedonia	17.512.812	0,20
Finlândia	3.721.188.941	43,07	Russian Federation	97.953.763.355	1133,72
França	45.088.946.421	521,86	San Marino	23.533.163	0,27
Alemanha	55.092.860.351	637,65	Serbia and Montenegro	4.194.430.423	48,55
Georgia	2.649.880.757	30,67	Slovenia	1.404.551.657	16,26
Grécia	7.463.183.754	86,38	Solomon Islands	337.031.580	3,90
Hungria	6.716.665.820	77,74	Spain	31.605.611.354	365,81
Iceland	223.116.893	2,58	Sweden	6.599.438.338	76,38
Ireland	3.141.666.941	36,36	Sri Lanka	12.142.467.741	140,54
Itália	41.775.468.937	483,51	Sweden	6.599.438.338	76,38
Kazakhstan	11.775.403.718	136,29	Switzerland	5.578.265.593	64,56
Letônia	1.371.029.874	15,87	United Kingdom	43.937.234.332	508,53
Liechtenstein	25.332.382	0,29	Turkey	51.651.674.124	597,82
Lithuania	1.995.126.351	23,09	Ukraine	30.896.120.762	357,59
Luxemburgo	378.735.254	4,38	United Arab Emirates	6.433.299.894	74,46
<b>TOTAL</b>	<b>6.962,04 MW</b>				

Tabela 5-10: Energia contida nas fezes humanas, por país. (Ásia)

ÁSIA					
Energia rejeitada					
País	(kJ/dia)	(MW)	País	(kJ/dia)	(MW)
Afeganistão	15.670.361.591	181,37	Macao SAR, China	391.953.126	4,54
Armênia	1.755.559.974	20,32	Malaysia	17.760.334.965	205,56
Azerbaijan	6.496.095.514	75,19	Maldives	206.839.075	2,39
Bahrain	915.457.693	10,60	Mongolia	1.695.212.398	19,62
Bangladesh	93.257.123.296	1079,36	Myanmar	31.604.279.014	365,79
Bhutan	383.512.724	4,44	Nepal	16.544.172.600	191,48
Brunei Darussalam	248.982.657	2,88	Oman	2.674.286.058	30,95
Camboja	9.065.091.400	104,92	Pakistan	1,08919E+11	1260,63
China	8,02636E+11	9289,77	Palestine	2.755.132.343	31,89
Cyprus	785.333.813	9,09	Philippines	58.889.407.124	681,59
Geórgia	2.649.880.757	30,67	Qatar	1.136.140.513	13,15
Hong Kong, SRA, China	4.932.234.000	57,09	Saudi Arabia	20.003.161.045	231,52
Índia	7,45646E+11	8630,16	Singapore	3.725.346.301	43,12
Indonésia	1,48736E+11	1721,48	Slovakia	3.187.849.911	36,90
Iran	53.445.116.055	618,58	Syrian Arab Republic	15.869.849.923	183,68
Iraque	20.166.865.113	233,41	South Sudan	6.802.638.259	78,73
Israel	5.595.341.146	64,76	Taiwan	15.974.915.900	184,89
Japão	74.794.989.113	865,68	Tajikistan	4.947.205.179	57,26
Jordan	3.887.072.259	44,99	Thailand	39.549.046.414	457,74
Kazakhstan	11.775.403.718	136,29	Timor-Leste	713.114.499	8,25
Korea do Sul	34.474.624.519	399,01	Ukraine	30.896.120.762	357,59
Kuwait	2.369.757.370	27,43	Uzbekistan	18.086.623.117	209,34
Kyrgyzstan	3.432.413.649	39,73	Vietnam	53.378.850.628	617,81
Lao People's D. Republic	4.055.979.581	46,94	West Bank and Gaza	2.925.055.799	33,85
Líbano	3.071.911.284	35,55	Faeroe Islands	49460	0,27
Korea do Norte	25.026.588	160,03	Turkmenistan	5307171	29,17
Guam	167546	<b>0,92</b>			
<b>TOTAL</b>	<b>29.228,37 MW</b>				

**Tabela 5-11:** Energia contida nas fezes humanas, por país. (Oceania)

<b>OCEANIA</b>					
<b>Energia rejeitada</b>					
<b>País</b>	<b>(kJ/dia)</b>	<b>(MW)</b>	<b>País</b>	<b>(kJ/dia)</b>	<b>(MW)</b>
Austrália	15.999.255.256	185,18	Nauru - Yarem	6.868.090	0,08
Nova Zelândia	3.071.501.950	35,55	Palau	12.411.921	0,14
<i>Fiji-Suva</i>	604.143.327	6,99	Samoa	11.2859.234	1,31
Papua Nova Guiné	3.745.248.581	43,35	American Samoa	27.713.237	0,32
<i>Kiribati</i>	61.151.819	0,71	Tuvalu	4.956.521	0,06
<i>Marshall Islands</i>	26.436.785	0,31	Vanuatu	151.965.287	1,76
Micronésia, Fed. Sts.	61.128.874	0,71	Tonga	52.992.799	0,61
French Polynesia	279835	1,79	New Caledônia	266000	1,7
<b>TOTAL</b>	<b>280,57 MW</b>				

Somando-se os quantitativos de energia contidos nas fezes humanas, apresentados nas tabelas 5-5 a 5-11, verifica-se que, em termos mundiais, a energia das fezes é de **53.515,48 MW**, ou seja, o equivalente a quase 4 usinas de ITAIPU (14.000 MW).

É bem verdade que nem toda essa energia está disponível, pois as fezes deveriam ser coletadas sem carreamento hídrico, secadas e transportadas para as estações de beneficiamento, o que envolveria uma mudança radical nos sistemas de tratamento de esgotos convencionais e no comportamento humano. Além disso, devem ser considerados os locais de difícil acesso e, também, a eficiência dos processos de conversão de energia que, na melhor das hipóteses, devem ficar em torno de 50%. Por outro lado, uma coleta seletiva, sem carreamento hídrico, reduziria drasticamente a contaminação dos mananciais e os custos para tratamento dos esgotos, e poderia, ainda, gerar energia em benefício do ser humano.

### 5.3 ÍNDICE DE ENERGIA REJEITADA (IER)

Com base em dados de massa corporal apresentados por CORTEZ *et al.*, (2008), *apud* Diaz e Goluene (1985), IBGE (2014), Oliveira (1993) e alguns valores indicados por esse autor, construiu-se a Tabela 5-12, onde são mostradas as massas corporais de cada indivíduo e respectivas massas de excremento por dia.

**Tabela 5-12:** Quantitativos em massa de fezes, por espécie (Brasil).

Espécie	Peso corporal (kg)	Massa úmida de excremento (kg/dia)	Umidade (%)	Massa seca (kg/dia)	População em milhões (IBGE-2014)	Quantitativo em Ton /dia
Galinha	2,5	0,12*	63,6	0,0444	1 248 785 538	55.446
Cão (porte médio)	22	0,062**	65,2	0,022	33,0	726,0
Porco	100	3,0***	68,4	0,96	36 743 593	35.274
Boi	500	32***	81,3	6,8	211 764 292	1.439.997
Humano**	70	0,150	80,4	0,03	202,7	6.083
*Moreng; Alves (1990); **Autor deste trabalho; ***Oliveira (1993)						

Visando a fazer uma comparação entre o quantitativo de energia que cada espécie rejeita nos excrementos, pegou-se como referencial a massa corporal de cada espécie. Assim, multiplicou-se a quantidade de excrementos/dia de cada espécie por seu respectivo poder calorífico e dividiu-se pela massa corporal da referida espécie, conforme Equação 32. Esse parâmetro é aqui denominado de Índice de Energia Rejeitada (IER), cujos resultados são apresentados na Tabela 5-13.

$$IER = \frac{M_{fa} \times PCS_a}{M_{ca}} \quad (32)$$

Onde:

$IER$  = Índice de Energia Rejeitada em kJ por kg de massa corporal da espécie;

$M_{fa}$  = massa seca das fezes da espécie, em kg/dia.

$PCS_a$  = poder calorífico superior das fezes da espécie, em kJ/kg;

$M_{ca}$  = Massa corporal da espécie em kg.

**Tabela 5-13:** Índice de Energia rejeitada (IER), por espécie.

Espécie	Peso corporal (kg) (a)	Massa seca de fezes (kg/dia) (b)	Poder Calorífico Superior		IER	
			kcal/kg (c)	kJ/kg	(kcal/kg.dia)	kJ/kg.dia
Galinha	2,5	0,0444	2.370	9.916	42,1	176,2
Cão (porte médio)	22	0,022	3.886	16.259	3,9	16,3
Porco	100	0,96	3.742	15.657	35,9	150,2
Boi	500	6,8	3.941	16.490	53,6	224,3
<b>Humano</b>	<b>70</b>	<b>0,03</b>	<b>5.550</b>	<b>23.222</b>	<b>2,4</b>	<b>10,0</b>

Observando a Tabela 5-13, verifica-se que, embora as fezes da galinha tenham um poder calorífico baixo (9.916 kJ/kg), a sua IER é bastante elevada (176,2 kJ/kg). Dentre os valores apresentados, a IER do humano é a de menor valor (10,0 kJ/kg).

Observa-se, ainda, que o ser humano possui a menor IER e que também é o ser mais evoluído intelectualmente. Em segundo lugar, aparece a IER do cão, depois do porco, da galinha e, por último, a do boi.

A segunda lei da termodinâmica estabelece que *a eficiência de uma máquina térmica operando entre duas fontes de calor, e recebendo certa quantidade de energia, é tanto maior quanto menor for a energia por ela rejeitada.*

Se considerarmos o corpo humano e os dos animais como máquinas térmicas (e na verdade o são), e que a massa corporal é proporcional à energia ingerida (MODENEZE, 2012; McARDLE et al.,1998), os resultados da Tabela 5-13 sugerem que o corpo humano é o mais eficiente de todos (talvez por ser o mais evoluído). Em seguida, vem o cão que, dentre os animais analisados parece ser, também, o mais evoluído (“inteligente”), depois o porco, a galinha e, por último vem, o boi com a

maior IER, ou seja, será que o grau de evolução (inteligência) das espécies poderá ser medido por meio do IER? No entanto, só um estudo mais aprofundado, envolvendo outras espécies e análises mais precisas poderá, ou não, comprovar essa hipótese.

#### 5.4 ESTIMANDO O PODER CALORÍFICO PELO MÉTODO DE DULONG E VANDRALEK

A análise elementar para uma amostra representativa das fezes humanas e para as fezes de outros animais é apresentada na Tabela 5-14. A partir dessa tabela determinou-se, também, o poder calorífico superior pelo método de Dulong e Vandralek apenas para as fezes humanas por se tratar da biomassa em foco.

**Tabela 5-14:** Elementos presentes nas fezes de alguns animais e do ser humano.

Fezes da Espécie	ELEMENTOS PRESENTES NA BIOMASSA						cinzas	O&G
	C	H	N	P	S	O <sup>(*)</sup>		
	%	%	%	%	%	%	%	
Galinha	26,19	3,41	4,51	0,00584	0,30	26,184	39,5	0,0148
Cachorro	37,21	5,83	3,46	0,00705	0,0458	39,247	14,2	0,805
Porco	38,33	6,12	3,59	0,0083	0,0498	27,302	24,6	1,5410
Boi	46,32	7,61	8,66	0,00225	-	25,808	11,6	0,4340
Humano (média)	48,25	7,15	4,57	0,00652	0,012	30,023	10,0	33,2481

(\*) Determinado por diferença

O poder calorífico superior, utilizando a Equação 38 de Dulong, e a Equação 39, de Vandralek (NZIHOU - 2014), são apresentados na Tabela 5-15.

$$PCS = 4,18 \times (78,4 \times C + 241,3 \times H + 22,1 \times S) \quad (kJ/kg) \quad (38)$$

$$PCS = 4,18 \times (85 \times C + 270 \times H + 26 \times (S - O)) \quad (kJ/kg) \quad (39)$$

**Tabela 5-15:** Poder calorífico superior das fezes humanas pelo método de Dulong e Vandralk.

Poder Calorífico Superior (kJ/kg)	
Dulong	23.024,9
Vandralk	21.951,2

O poder calorífico médio, determinado em calorímetro ( $23.221 \pm 126$  kJ/kg – Tabela 1), é da mesma ordem de grandeza daquele determinado pelo método de Dulong (23.025 kJ/kg) e um pouco acima em relação ao determinado pela equação de Vandralk.

Em relação à análise elementar, os resultados da Tabela 18 mostram que os teores de carbono (48,25%) e hidrogênio (7,15%) das fezes humanas estão bem próximos daqueles da madeira (50,8%) e 6,06 %, respectivamente, apresentados por PTASINSKI, *et al.* (2007). Esses resultados indicam que, teoricamente, as fezes do humano têm teor de carbono suficiente para manter a combustão contínua no gaseificador sem a necessidade de se misturar com outras biomassas.

## 5.5 ANÁLISE ELEMENTAR DOS RESÍDUOS PÓS-COMBUSTÃO

Os percentuais de resíduo das fezes das espécies, após a queima em calorímetro, são apresentados na Tabela 5-16. Deve-se ressaltar que a queima no calorímetro é realizada em atmosfera de oxigênio puro (~ 30 atm).

**Tabela 5-16:** Resíduos após a combustão, em calorímetro, das fezes de alguns animais e do ser humano.

Espécie	Resíduos após a combustão (% mássico)
Galinha	39,5
Cachorro	14,2
Porco	24,6
Boi	11,6
Humano	10,0

Verifica-se na Tabela 20 que o percentual de resíduos das fezes humanas é o de menor valor (10%); no entanto, espera-se um percentual um pouco maior após queima no gaseificador, tendo em vista as condições restritas de ar nele impostas. Para as outras espécies, verifica-se que a galinha apresenta o maior percentual (39,5%), talvez por ser a espécie que mais ingere impurezas do tipo areia (sílica). Elemento este também encontrado no resíduo das fezes do boi.

Uma análise de metais pesados para os resíduos das amostras, após sua queima em calorímetro, é apresentada na Tabela 5-17 onde foi constatada a presença dos elementos Al, Cu, Fe, Pb e Si. Espera-se, portanto, que esses mesmos elementos estejam também presentes nas cinzas após a gaseificação.

**Tabela 5-17:** Elementos presentes nos resíduos das fezes após a combustão no calorímetro.

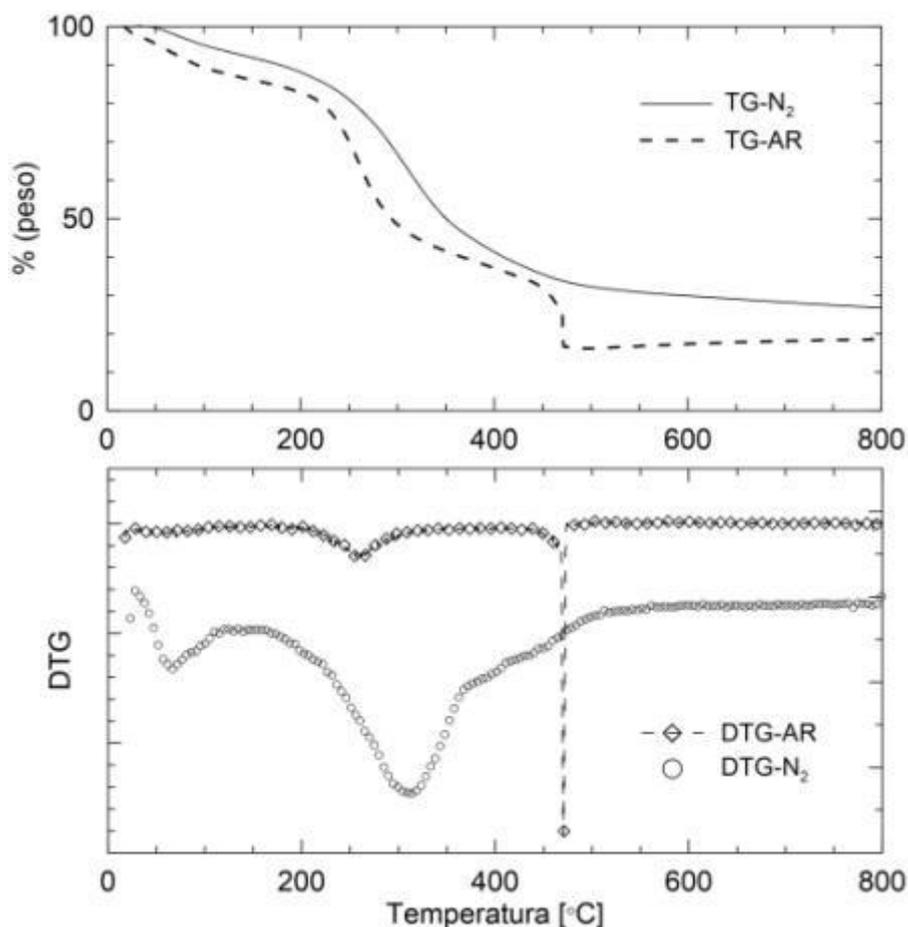
Fezes da Espécie	ELEMENTOS				
	Al	Cu	Fe	Pb	Si
	$\mu\text{g.mL}^{-1}$	$\mu\text{g.mL}^{-1}$	$\mu\text{g.mL}^{-1}$	$\mu\text{g.mL}^{-1}$	$\mu\text{g.mL}^{-1}$
Galinha	839,77 $\pm$ 12,33	39,12 $\pm$ 0,24	1.030,13 $\pm$ 15,30	6,07 $\pm$ 0,34	1.231,05 $\pm$ 69,38
Cachorro	1.103,27 $\pm$ 12,43	245,90 $\pm$ 0,77	5.849,76 $\pm$ 79,35	4,32 $\pm$ 0,23	-
Porco	19.344,33 $\pm$ 48,44	2.200,14 $\pm$ 23,01	11.615,58 $\pm$ 33,92	3,54 $\pm$ 0,21	-
Boi	52.324,14 $\pm$ 257,47	142,79 $\pm$ 0,86	22.965,72 $\pm$ 112,61	5,75 $\pm$ 1,65	1.434,57 $\pm$ 27,84
Humano	1.263,57 $\pm$ 12,64	170,37 $\pm$ 3,13	3.339,44 $\pm$ 26,26	0,98 $\pm$ 0,06	-

(-) Presença não detectada.

## 5.6 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CONVERSÃO TERMOQUÍMICA DE FEZES

### 5.6.1 Análise Termogravimétrica (TG)

Visando a um melhor entendimento do processo de decomposição térmica das fezes humanas em gaseificador, foi feita uma análise da perda de massa por meio da técnica termogravimétrica (TG/DTG) em atmosfera de ar e N<sub>2</sub> (Figura 5-1).



**Figura 5-1:** Análise termogravimétrica em atmosfera de ar e N<sub>2</sub>.

Analisando o gráfico da Figura 5-1, observam-se três faixas distintas de perda de massa:

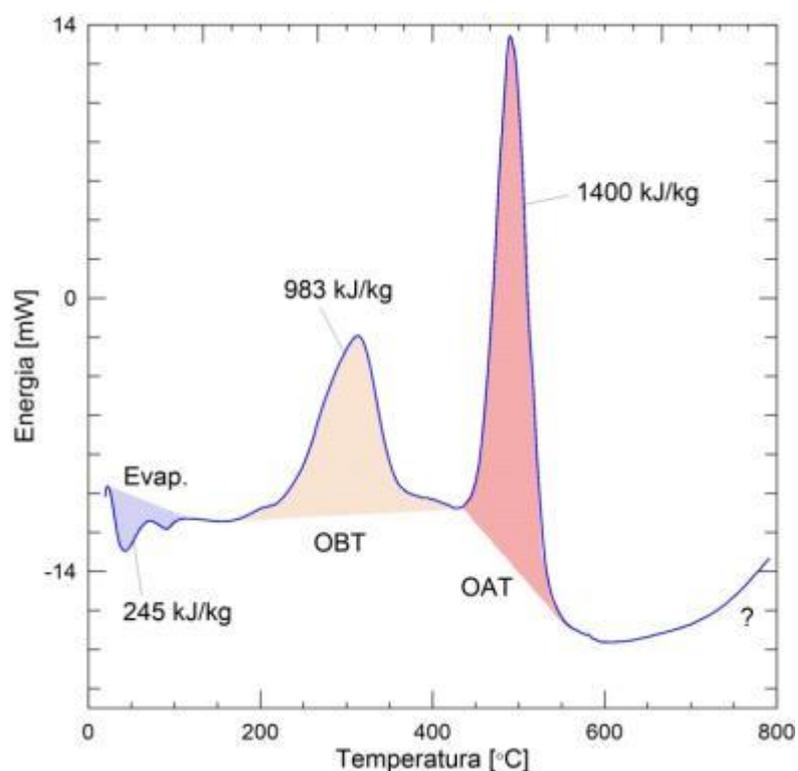
- Entre 30 °C - 115 °C, perda de massa de 17,4%, atribuída à evaporação da água;
- Entre 150 °C - 450 °C, perda de massa de 49,11%, atribuída à liberação dos voláteis (pirólise);
- Entre 450 °C - 550 °C, perda de massa de 26,57% atribuída à oxidação do carbono fixo (evidenciada na DTG-Ar).

### 5.6.2 Análise Térmica Diferencial (DTA)

A Análise Térmica Diferencial (Figura 5-2) mostra três quantidades de calor:

- Entre 20 °C - 115 °C, uma absorção de calor (calor endotérmico) de 245 kJ/kg, atribuída à evaporação da água;

- Entre 150 °C - 450 °C, uma liberação de calor (calor exotérmico) de 983 kJ/kg, atribuída à oxidação dos voláteis (também chamada de Oxidação à Baixa Temperatura - OBT);
- Entre 450 °C – 600 °C, uma liberação de calor (calor exotérmico) de 1400 kJ/kg, atribuída à oxidação do carbono fixo (chamada de Oxidação à Alta Temperatura - OAT).



**Figura 5-2:** Análise Térmica Diferencial (DTA) em atmosfera de ar sintético.

Das Figuras 5-1 e 5-2 uma análise imediata alternativa pode ser obtida, a qual é apresentada na Tabela 5-18.

**Tabela 5-18:** Análise imediata alternativa em função da TG/DTA

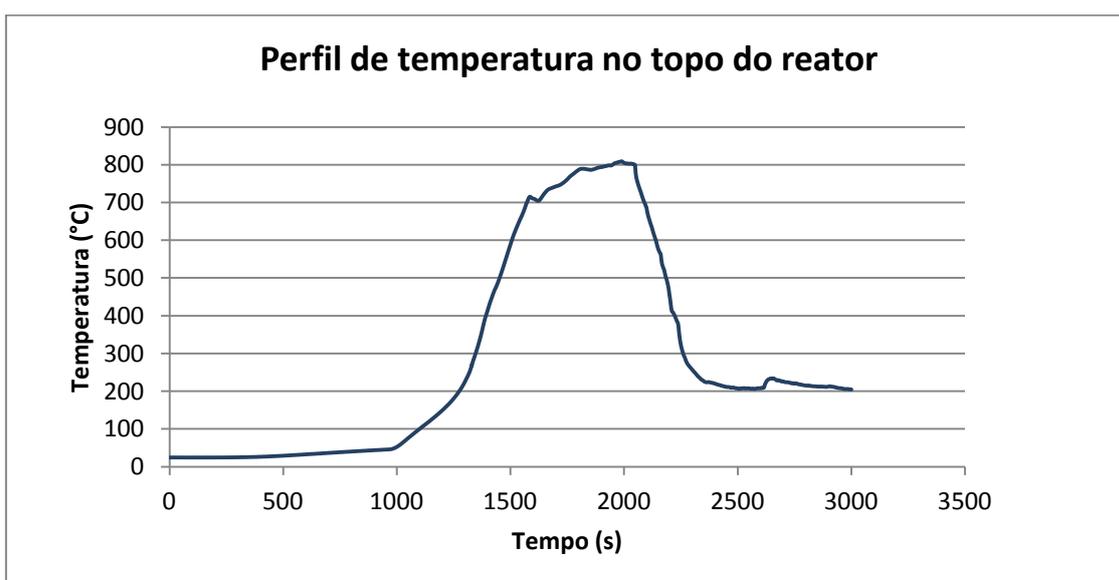
<b>Componente</b>	<b>Teor mássico (%)</b>
Umidade	17,41
Voláteis	49,11
Carbono fixo	26,57
Cinza	5,31

Os resultados apresentados na Tabela 5-18 nos permite concluir que, quando submetida ao gaseificador, essa biomassa deverá apresentar um resíduo na forma de cinzas superior a 5% e que os teores de voláteis (49,11%) e o de carbono fixo (26,57%) poderão produzir uma quantidade significativa de singás.

## 5.7 TESTE DE *BENCHMARK* DA CONVERSÃO TERMOQUÍMICA DE FEZES

### 5.7.1 Ignição do Processo

No cone de ignição, a temperatura atingiu um valor médio de 530 °C correspondendo a um fluxo de radiação de 31 kW/m<sup>2</sup>, por um período de 5,56 min, permitindo uma temperatura de ignição de 222°C, que foi lida através do termopar posicionado no topo do reator. O perfil de temperatura durante o processo de ignição pode ser observado na Figura 5-3. Esses valores estão de acordo com os encontrados por MONHOL e MARTINS (2014), que reportam a 220°C fornecendo um fluxo de calor de 30 kW/m<sup>2</sup> durante, aproximadamente, 5,5 min.

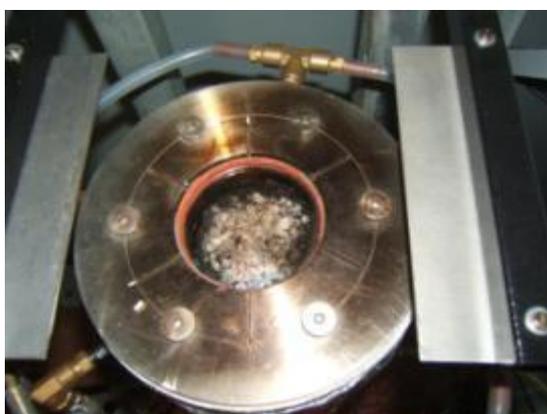


**Figura 5-3:** Perfil de temperatura durante o processo de ignição da biomassa no topo do reator medido pelo termopar 1 (Tp1).

Pode ser observado na Figura 5-4 que a biomassa se encontra incandescente e sem chama e que a frente de combustão atingiu praticamente toda a área, com exceção da região próxima à parede do reator onde a temperatura é mais baixa. Verificou-se também que, após alguns minutos, a combustão se propagou no sentido descendente deixando aparente um resíduo esbranquiçado, típico de cinza (Figura 5-5).



**Figura 5-4:** Biomassa logo após o início de ignição.



**Figura 5-5:** Biomassa após ser varrida pela combustão apresentando aparência esbranquiçada típica de cinza.

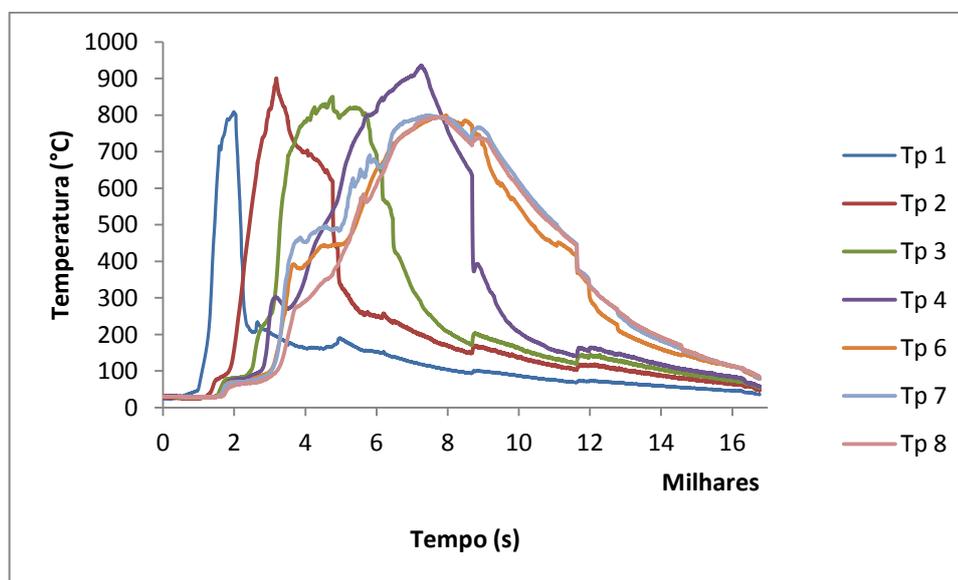
### **5.7.2 A Propagação Autossustentável da Frente de Combustão**

Após ignição do processo, foi observado que a frente de combustão se propaga de maneira autossustentável, ou seja, após o fornecimento inicial de energia para

ignição, o carbono contido nas fezes é suficiente para prover calor necessário para sustentar a frente até a conversão da biomassa.

Experimentalmente, verifica-se que a frente é autossustentável por meio do sinal de temperatura adquirido nos termopares Tp1 a Tp4, localizados no eixo de centro do reator e espaçados entre si de 45 mm (Figura 5-6), com velocidade média da frente de combustão de  $2,8 \times 10^{-5}$  m/s. Como os termopares Tp6 a Tp8 estão posicionados no mesmo plano e distribuídos ao longo do perímetro do reator e próximos à parede, registraram suas respectivas curvas de temperatura praticamente coincidentes, podendo-se constatar que a frente de combustão se propagou de forma uniforme (em planos paralelos). No entanto, se a área transversal do reator for de dimensões bem maiores, e/ou se a distribuição de ar ao longo da área não for uniforme, pode ser que o comportamento da velocidade de propagação também não seja uniforme.

Foram observados, ainda, na figura 5-6, picos de temperatura na faixa de 800°C a 900 °C.



**Figura 5-6:** Curvas do comportamento da temperatura no reator de bancada utilizando biomassa fecal humana.

Com exceção do primeiro termopar (Tp1), observa-se um pequeno patamar de temperatura em cerca de 80 °C no início do processo que é atribuído à condensação

do vapor d'água formado nas camadas superiores onde a temperatura é mais alta, voltando a subir em função da aproximação da frente de combustão. No primeiro termopar, esse fenômeno não é observado por se tratar do registro da temperatura pela radiação do cone de ignição e não pela propagação da frente de combustão. Foi constatado que o tempo médio para a frente de combustão varrer toda a biomassa presente no leito, nas condições de ensaio, foi de 2 horas e 13 minutos.

### 5.7.3 Produtos da Combustão

Durante o processo de combustão, um forte odor é sentido (predominantemente de alcatrão). Foi recuperada uma quantidade visível de alcatrão que pode ser observada na Figura 5-7, sendo a maior quantidade registrada no recipiente da Figura 5-7<sub>b</sub> por ser o primeiro da série de três a receber os gases provenientes do reator. Esse alcatrão deverá ser convertido a posteriori em singás no gaseificador *Downdraft*. Foram também identificados e quantificados os seguintes gases gerados no processo: O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, conforme Tabela 5-19, com destaque para o CO (8,0%), H<sub>2</sub> (4,0%) e CH<sub>4</sub> (3,7%), que são os gases de interesse no processo de gaseificação. Para todas as análises, considerou-se NO = NO<sub>x</sub>.

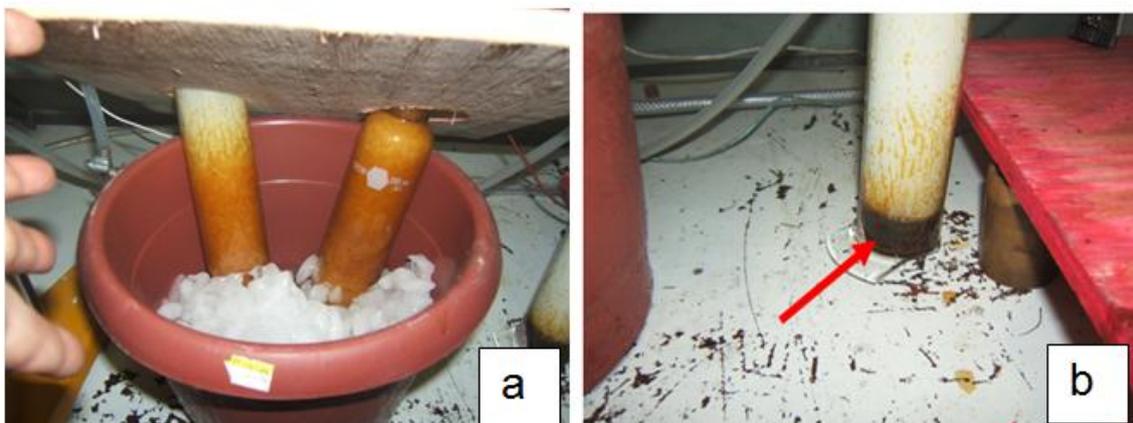


Figura 5-7: Alcatrão em processo de condensação (a) e condensado de alcatrão (b).

**Tabela 5-19:** Gases medidos na saída do reator de bancada e seus respectivos quantitativos.

Gás	O <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	NO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	N <sub>2</sub> <sup>(*)</sup>
Percentual (vol)	<b>5,0</b>	<b>8,0</b>	<b>7,0</b>	<b>0,0084</b>	<b>3,7</b>	<b>4,0</b>	<b>0,0085</b>	<b>72,28</b>
(*) Por diferença								

O fato de o reator de bancada ser de pequenas dimensões, ser do tipo contracorrente e não decompor termicamente o alcatrão, os quantitativos dos gases da Tabela 4-21 ficaram aquém dos valores esperados para o gaseificador de 20 kW.

Verificou-se, ao final do processo, que a redução de volume aparente do leito de biomassa foi de 22 %, e a redução, em massa, em torno de 77 %. A cinza recuperada tem a aparência esbranquiçada, sem odor, e de textura arenosa (Figura 5-8), com densidade aparente de 91,4 kg/m<sup>3</sup>. A Figura 5-9 mostra a retração do volume ao final do processo de gaseificação, bem como o termopar (Tp1), posicionado no topo do reator.

**Figura 5-8:** Cinzas resultantes da gaseificação no reator de bancada.



**Figura 5-9:** Topo do reator de bancada onde se observa o termopar Tp1 e a retração de volume ao final do processo de gaseificação.

Uma análise elementar preliminar da cinza, resultante da conversão da biomassa no reator de bancada, é mostrada na Tabela 5-20, onde o cálcio e o magnésio se destacam pelo seu maior percentual.

**Tabela 5-20:** Elementos presentes na composição da cinza da biomassa fecal humana decomposta termoquimicamente no reator de bancada.

<b>Material: CINZA</b>			
<b>Elemento</b>	<b>µg/g</b>	<b>% (m/m)</b>	<b>RSD (%)</b>
Ferro	6.052,18	0,61	0,52
Manganês	764,07	0,076	0,31
Zinco	2.727,18	0,24	0,35
Magnésio	32.885,00	3,29	2,09
Cálcio	90.723,76	9,07	0,54
Enxofre	7.170,17	0,72	0,89
Boro	<L/D	<L/D	
Cobre	270,76	0,03	0,15

A análise dos dados obtidos do estudo *benchmark* possibilitou a obtenção de algumas conclusões preliminares, a saber:

- a) É possível realizar a gaseificação da biomassa sem mistura com outras biomassas;

- b) A frente de combustão evolui de forma autossustentável com temperaturas de pico da ordem de 900 °C;
- c) Os gases ( $O_2$ , CO,  $CO_2$ , NO,  $NO_x$ , e  $H_2$ ) gerados nesse processo (Tabela 1) são condizentes com aqueles de um singás típico;
- d) A biomassa apresenta quantidade significativa de alcatrão para ser gaseificado;
- e) O percentual de cinzas, após a conversão da biomassa, é de, aproximadamente, 13 % da massa inicial contida no reator;
- f) A velocidade média da frente de combustão é de  $2,8 \times 10^{-5}$  m/s;
- g) Muitos nutrientes essenciais para as plantas estão presentes na composição das cinzas e sem o sério risco dos patógenos.

Esses resultados possibilitam prever melhor as condições de teste no gaseificador de 20 kW e trabalhar com mais segurança.

## 5.8 GASEIFICADOR DE 20 KW

Foram realizados testes combinando teor de umidade e tamanho de grão, sendo 03 (três) ensaios em cada combinação para a verificação da repetitividade estatística, num total de 27 ensaios (Apêndices A e B). O diâmetro médio da partícula adotado foi de 15 mm, 30 mm e 50 mm, e o teor de umidade de 0%, 10% e 20% mássico, conforme combinação apresentada na Tabela 4-2.

Inicialmente, os ensaios foram conduzidos visando a verificar a influência da umidade e do tamanho da partícula na produção do singás. Para esses ensaios, a quantidade de biomassa, introduzida no gaseificador, foi mantida constante e igual a 300 g. Ao final dessa etapa, e após ser constatada a condição mais favorável para a produção do singás, a quantidade de biomassa utilizada, para os ensaios consecutivos, foi mantida constante e igual a 1500 g. Para todos os ensaios, a vazão de ar foi mantida constante, sendo seu valor, à temperatura ambiente (25 °C), igual a 0,00247 kg/s (8,925 kg/h).

### 5.8.1 Ignição da Biomassa e o Processo de Gaseificação

Após verificação da pressão interna do reator (0,99682 bar) e da vazão de ar, que era mantida por dois exaustores em série (Figura 5-10), a ignição era iniciada. A chama de um maçarico a gás GLP era fornecida e sugada para dentro do reator, em função da pressão interna do mesmo, a qual iniciava a combustão da biomassa (Figura 5-11).



**Figura 5-10:** Exaustores responsáveis por manter a vazão de ar através do reator.



**Figura 5-11:** Simulação do início do processo de ignição do reator do gaseificador.

Esse processo durava em torno de 5 minutos até a temperatura interna do reator atingir valores da ordem de 130 °C, condição na qual o fornecimento da chama externa era cessado. Após atingir esse valor, a alimentação restrita de ar era suficiente para a propagação da combustão.

Por questões de segurança, sempre que se ligava a chave geral do gaseificador, a resistência elétrica de um ignitor (Figura 5-12) ficava incandescente para garantir a queima de possíveis gases gerados no processo, principalmente pelo risco da forte presença de monóxido de carbono (CO) no singás. Ainda, para garantir o carregamento do singás para a atmosfera, foi introduzido um injetor de ar na chaminé, que também é colocado em funcionamento assim que a chave geral é ligada.

A temperatura interna foi, então, monitorada através do painel do gaseificador, atingindo valores da ordem de 900 °C. Paralelamente ao monitoramento, o analisador de gases registrava, a cada 10 segundos, as quantidades de O<sub>2</sub> e dos outros gases gerados.

Observou-se que o teor de O<sub>2</sub> ia decrescendo concomitante com o aumento da produção dos outros gases. Quando o teor de O<sub>2</sub> atingia valores da ordem de 15%, a quantidade de singás gerada era suficiente para iniciar a queima no *flare* (Figura 5-12), com duração aproximada de 6 minutos de combustão com presença de chama abundante. Observou-se, ainda, no analisador, que os maiores percentuais de H<sub>2</sub>, CO e CH<sub>4</sub> (gases de interesse) eram atingidos para teores de O<sub>2</sub> em torno de 6% e que a temperatura interna do gaseificador, durante o período de queima no *flare*, ficou na faixa de 600 °C a 860 °C.



**Figura 5-12:** Início de chama decorrente do processo de combustão do singás a qual se inicia pela presença do filamento incandescente do ignitor (indicação da seta).

A Figura 5-13 mostra, em outros instantes, a chama abundante decorrente da produção do singás, e a Figura 5-14 mostra uma vista inferior do *flare* onde se pode observar que parte da sua estrutura está incandescente.



**Figura 5-13:** Chama decorrente da queima dos gases gerados no gaseificador.



**Figura 5-14:** Vista inferior da estrutura do flare em estado incandescente.

Ao final do processo de queima no *flare*, o gaseificador era deixado ainda em funcionamento até que a temperatura interna caísse ao valor aproximado de 250 °C, quando então o mesmo era desligado. Esse valor de temperatura foi adotado para garantir que toda a reação de gaseificação tenha terminado evitando, assim, um possível acúmulo de gás dentro do reator.

### **5.8.2 Produtos da Gaseificação**

Após o seu resfriamento à temperatura ambiente, que era alcançado no dia seguinte ao ensaio, as cinzas (Figura 5-15), apresentando aspecto arenoso esbranquiçado, eram retiradas e sua massa era medida, ficando em torno de 13% mássico em relação à massa original da biomassa. Deve-se ressaltar que, embora as cinzas tenham um aspecto arenoso, elas se transformam facilmente em pó com a simples fricção da mão.



**Figura 5-15:** Aspecto das cinzas após sua retirada do gaseificador.

Constatou-se ainda, nas cinzas, a presença de uma pequena quantidade de resíduos (8% em relação à massa de cinzas) com aspecto de material sinterizado e não observada na gaseificação com o reator de bancada (Figura 5-16). Esse material é bem mais consistente que as cinzas e necessita de impacto para ser triturado.



**Figura 5-16:** Borra presente nas cinzas com aspecto de material sinterizado.

Uma análise elementar das cinzas é apresentada na Tabela 5-21, onde se observa o elemento e a forma oxidada na qual ele se apresenta. Observa-se desta tabela que uma quantidade significativa de nutrientes para as plantas pode ser recuperada por meio do processo de gaseificação, indo corroborar com os estudos realizados por MIHELICIC *et al.*, (2011) sobre a disponibilidade de fósforo, em termos mundiais, nas fezes humanas.

**Tabela 5-21:** Percentual dos elementos presentes nas cinzas e percentual de seus respectivos óxidos.

<b>CINZAS</b>						
<b>Elemento</b>	<b>%</b>	<b>Óxido</b>	<b>Peso Molecular do óxido</b>	<b>% Óxido</b>	<b>Fração molar</b>	<b>kg/kmol</b>
P	20,791	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	141,937	47,6437	0,47644	67,624
K	14,537	K <sub>2</sub> O	94,1994	17,5111	0,17511	16,4954
Ca	15,458	CaO	56,0794	21,6288	0,21629	12,1293
Mg	6,1106	MgO	40,3094	10,1323	0,10132	4,08426
S	0,8162	SO <sub>2</sub>	64,0688	1,63063	0,01631	1,04473
B	0,0036	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	58,8082	0,0195	0,0002	0,01147
Fe	0,4161	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	159,698	0,59492	0,00595	0,95008
Mn	0,1181	MnO	70,9394	0,15251	0,00153	0,10819
Zn	0,3393	ZnO	81,4094	0,42228	0,00422	0,34378
Al	0,0935	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	101,958	0,1766	0,00177	0,18006
Pb	0,0006	PbO	223,199	0,00065	6,5E-06	0,00146
Cd	8E-06	CdO	128,409	9,1E-06	9,1E-08	1,2E-05
Hg	8E-06	HgO	216,589	8,6E-06	8,6E-08	1,9E-05
Cu	0,0432	CuO	79,5494	0,05409	0,00054	0,04303
Si	0,0154	SiO <sub>2</sub>	60,0888	0,03285	0,00033	0,01974
Soma	58,743			100		103,036

Uma análise do resíduo também foi efetuada, cujos resultados são apresentados na Tabela 5-22.

**Tabela 5-22:** Elementos presentes na Borra.

Material ELEMENTO	RESÍDUO	
	mg/kg	%
P	41.795,0	4,1195
K	30.430,0	3,043
Ca	106.240,0	10,624
Mg	18.464,0	1,8464
S	1.575,0	0,1575
B	14,13	0,001413
Fe	7.217,0	0,7217
Mn	437,2	0,04372
Zn	62,30	0,00623
Al	6.059,8	0,60598
Pb	<0,50	0,00005
Cd	<0,050	0,000005
Hg	<0,050	0,000005
Cu	215,0	0,021
Si	140,59	0,01406
Total		21,20456

Observando a composição química das cinzas e do resíduo (Tabelas 5-21 e 5-22), verifica-se que a composição do resíduo se assemelha à das cinzas, podendo ser perfeitamente trituradas e misturadas. À exceção do Nitrogênio, existe uma quantidade significativa dos nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas (macronutrientes) como fósforo (20,79%), potássio (14,54%), cálcio (15,46%), magnésio (6,11%) e enxofre (0,82%), sendo que, desses, os primários (P e K) e os secundários (Ca e S) se destacam pelo seu alto teor encontrado. Não menos importantes estão presentes também os micronutrientes: Ferro (0,42%), Manganês (0,11%), boro (0,0036%), zinco (0,34%) e cobre (0,043%).

Não foi observado nesse processo o forte odor característico de alcatrão percebido no reator de bancada e nem a presença física do referido produto, pois, no processo de gaseificação cocorrente, o alcatrão formado na fase de pirólise é forçado a passar pela zona de oxidação sendo totalmente convertido termoquimicamente, aumentando, assim, a produção do singás. Não foi observado no interior do reator sinais de presença de condensado de alcatrão nem de borras características (Figura 5-17).

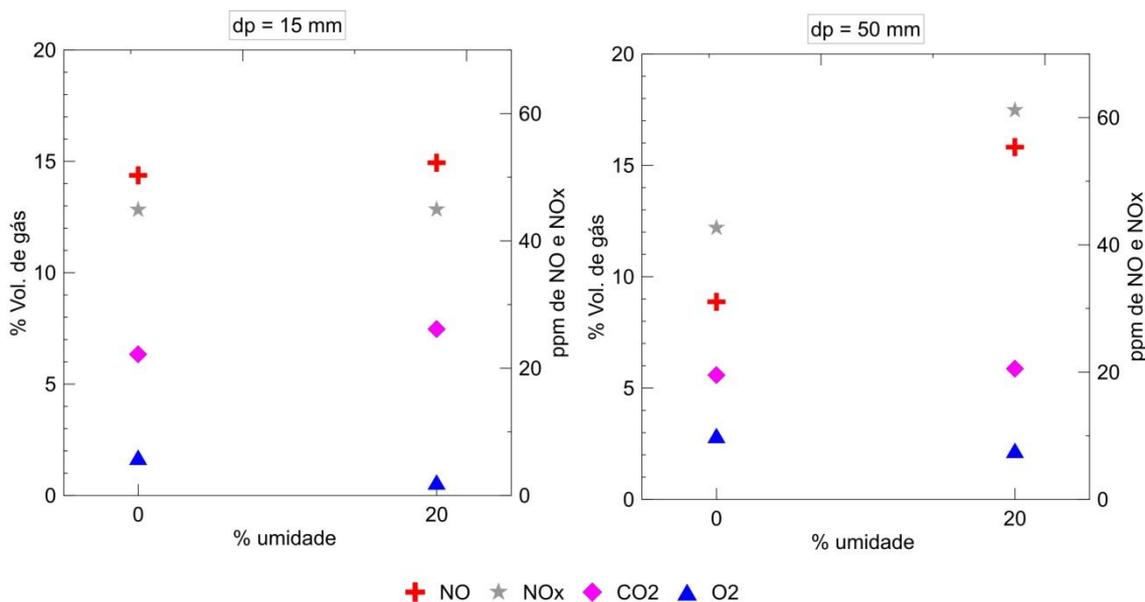


**Figura 5-17:** Vista interna do reator após retirada das cinzas

### 5.8.3 Análise do Singás

O gráfico da Figura 5-18 mostra a produção dos gases não combustíveis para teores de umidade de 0% e 20% e diâmetros da partícula de 15 mm e 50 mm. Para o diâmetro da partícula de 15 mm, observa-se que, com o aumento do teor de umidade, houve um ligeiro aumento no percentual da produção de NO, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> concomitante com diminuição do percentual de O<sub>2</sub>. Para o diâmetro da partícula de 50 mm, houve um aumento significativo nos percentuais de NO e NO<sub>x</sub> com o aumento da umidade, mantendo-se praticamente inalterado o teor de CO<sub>2</sub> concomitante com o decréscimo do percentual de O<sub>2</sub>.

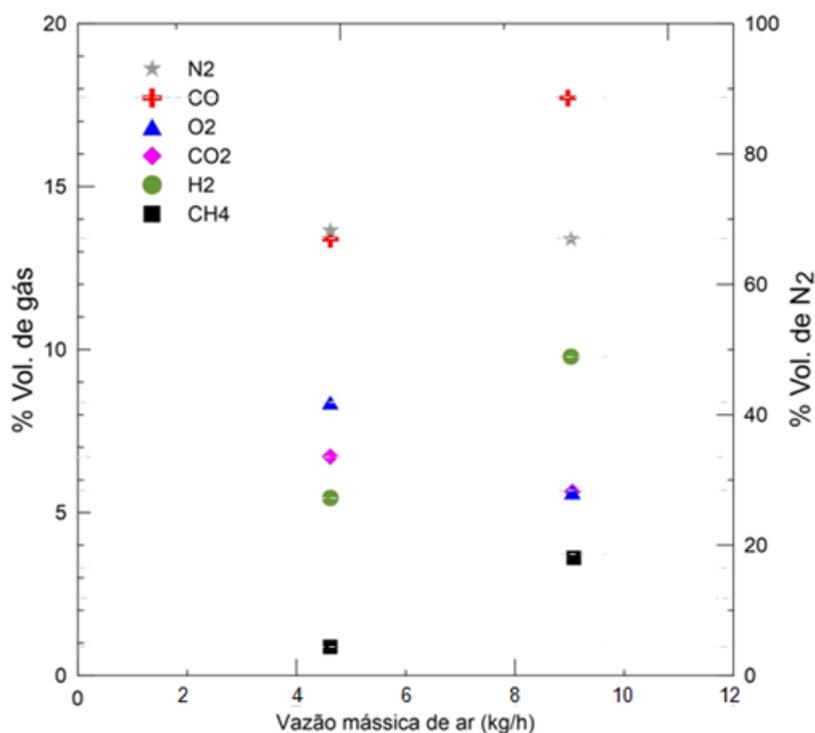
Para o teor de umidade de 0%, verifica-se que, com o aumento do diâmetro da partícula, houve um decréscimo significativo no percentual de NO e ligeiro decréscimo no percentual dos outros gases em função de um ligeiro aumento no percentual de O<sub>2</sub>. Para o teor de umidade de 20%, observa-se um aumento significativo dos teores de NO e NO<sub>x</sub> sem alteração do teor de CO<sub>2</sub>, concomitante com a diminuição do teor de O<sub>2</sub>. O aumento dos teores de óxidos de nitrogênio é atribuído à elevação da temperatura interna do gaseificador (815 °C para 860 °C).



**Figura 5-18:** Produção dos gases não combustíveis em função da umidade para diâmetro da partícula de 15 mm e 50 mm.

Para a Figura 5-19, onde é apresentada a produção de gás em função da vazão de ar, verifica-se que, com o aumento da vazão (vazão máxima) aumentou-se a produção de CO (17,72%), H<sub>2</sub> (9,7%) e CH<sub>4</sub> (3,7%) contra 13,3% e 2,3% e 1%, respectivamente para uma vazão menor (metade da vazão máxima). Em contrapartida houve um decréscimo na produção de CO<sub>2</sub> (de 6,8% para 5,7%)

Para todos os casos analisados, o que se observa é um aumento significativo da produção de gás em função do decréscimo do percentual de O<sub>2</sub>, o que é característico do processo de gaseificação de biomassa.



**Figura 5-19:** Produção de gás em função da vazão de ar.

Analisando os gráficos das Figuras 5-18 e 5-19, verifica-se que, para ambos os gráficos, houve uma tendência de aumento na produção de gás com o decréscimo do percentual de O<sub>2</sub>, independentemente do percentual de umidade e diâmetro da partícula, o que é característico do processo de gaseificação.

## 6 ANÁLISE EXERGÉTICA

Levando-se em consideração que não houve variação significativa na produção do singás, em função do diâmetro da partícula, e nem tão pouco em relação ao teor de umidade, os ensaios foram concentrados no diâmetro da partícula de ~50 mm e teor de umidade de 20% pelo fato de ser este o diâmetro que normalmente a biomassa adquire após a secagem (não havendo necessidade de dispêndio de energia para sua trituração) e nem de energia para secagem da biomassa a teores menores que 20%.

A Tabela 5-23 apresenta os valores de produção de gás para diâmetro da partícula de ~50 mm e 20% de umidade.

**Tabela 5-23:** Produção de gás para diâmetro da partícula de ~50 mm e 20% de umidade.

	<b>20% Umidade</b>	<b>% O2</b>	<b>% CO</b>	<b>% CxHy</b>	<b>% H2</b>	<b>% NOx</b>	<b>% CO2i</b>
<b>Ensaio</b>	A	5,9	18,3	3,9	9,9	4,80E-03	6,6
	B	5,8	17,9	3,6	9,6	5,80E-03	7,9
	C	5,7	17,8	3,5	9,7	3,10E-03	6,8
	D	5,5	16,8	3,8	9,8	4,60E-03	5,6
Média	%	<b>5,725</b>	<b>17,72</b>	<b>3,7</b>	<b>9,7</b>	<b>0,005</b>	<b>6,725</b>
Desvio Padrão		<b>0,15</b>	<b>0,55</b>	<b>0,16</b>	<b>0,11</b>	<b>0,0011</b>	<b>0,82</b>

Os componentes do singás, bem como seus percentuais estão condizentes com um singás típico gerado em um gaseificador cocorrente, conforme apresentado por KALTSCHMITT e HARTMAN, (2001) (Tabela 3-13).

Com base nos valores médios dos percentuais dos gases apresentados na Tabela 5-23 e nas condições do ensaio e de referência, calculou-se a eficiência energética a frio (produtos na temperatura ambiente) e a eficiência energética a quente (produtos na temperatura do ensaio) (Tabela 5-24).

**Tabela 5-24:** Eficiência do gaseificador com o singás na temperatura ambiente (frio) e na temperatura de ensaio (quente).

<b>Eficiência energética do gaseificador</b>	
Eficiência energética (frio)	<b>56,9%</b>
Eficiência energética (quente)	<b>77,0%</b>

Valores de eficiências de mesma ordem de grandeza também foram encontrados por RODRIGUEZ (2007), (62,68% - frio) e (84,73% - quente), e CHAVES (2012) (58,3 % - frio), para gaseificadores de mesmo tipo e dimensões semelhantes.

A exergia do singás, em função das condições de ensaio e das condições de referência, é apresentada na Tabela 5.25.

**Tabela 5-25:** Exergia do Singás utilizando biomassa com 20% de umidade.

Ambiente do ensaio (gás)			Ambiente de referência (ar)		
Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Vazão (kg/s)	Pressão (bar)	Temperatura (°C)	U. Relativa (%)
0,99682	600	0,004292	1,013	25	60
<b>Exergia do singás</b>			<b>19,13 kW</b>		
			<b>4457,89 kJ/kg</b>		

A Tabela 5-26 apresenta as exergias dos insumos e produtos com os quais se determinou a eficiência exergética ambiental ( $\eta_e$ ) através da equação 30, e o índice exergético de renovabilidade ( $\lambda_r$ ), através da equação 35. Seus respectivos valores são mostrados na Tabela 5-27 e discutidos adiante.

**Tabela 5-26:** Exergias dos insumos e produtos utilizados para o balanço exergético.

Exerg. Singás	Exerg. Biomassa	Exerg. Eletric.	Exerg. Secagem	Exerg. Cinzas	Exerg. Calor	Exerg. Destruída
(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)
<b>4457,89</b>	18897,6	21,31	261,88	100,1	8191,2	6148,41

**Tabela 5-27:** Eficiência exergética ambiental ( $\eta_e$ ) e o índice exergético de renovabilidade ( $\lambda_r$ ) para o gaseificador.

<b>GASEIFICADOR GEK 20KW</b>	$\eta_e$ (%)	$\lambda_r$
Produtos: singás e cinzas	<b>24,1</b>	<b>0,734</b>
Produtos: Singás, cinzas e secagem da biomassa	<b>66,44</b>	<b>1,9891</b>

A exergia de secagem (Tabela 5-26) é aqui considerada como parte da exergia do singás dissipada no pré-aquecedor de biomassa (vaso de secagem), conforme fluxograma de processo (Figura 4-18).

A análise exergética permite considerar várias possibilidades de uso dos produtos obtendo-se, assim, em função dos objetivos, valores diferentes para  $\eta_e$  e para  $\lambda_r$ . Inicialmente, considerou-se como produtos somente o singás e as cinzas. O singás pode ter seu uso como fonte de calor (aquecimento) ou para uso em motores de combustão interna gerando trabalho mecânico ou eletricidade por meio de um gerador elétrico, e as cinzas, como agente recuperador de solo devido à sua composição química. Nessa modalidade, encontrou-se para a eficiência exergética ambiental ( $\eta_e$ ) o valor de 0,241, indicando com isso que o sistema ainda pode ser otimizado, e, para o índice exergético de renovabilidade ( $\lambda_r$ ), o valor de 0,734, demonstrando que o sistema, nessas condições, é ambientalmente desfavorável, ou seja, não há sobra de exergia para recuperação do meio (BEJARANO, 2009).

Numa outra modalidade, onde são considerados os produtos singás, a cinza e o calor para secagem da biomassa, o valor da eficiência exergética ambiental ( $\eta_e$ ) sobe para 0,66, o que é uma ótima eficiência comparado com o primeiro caso. Nessa modalidade, o índice exergético de renovabilidade  $\lambda_r = 1,989$  demonstra que o sistema é ambientalmente favorável, ou seja, a exergia dos produtos poderia ser usada para restaurar o meio ambiente ou ter um fluxo de exergia para outro uso (BEJARANO, 2009).

O gaseificador foi originalmente projetado para trabalhar em regime contínuo e com dispositivos para reaproveitar o calor gerado para secagem e aumento da temperatura da biomassa. No entanto, o modelo de gaseificador aqui utilizado não permite o seu funcionamento contínuo por não possuir dispositivo para a retirada automática das cinzas, assim, só é possível o seu uso por batelada, não permitindo a recuperação de parte desse calor, o que, a princípio, pode apresentar resultados superiores aos da Tabela 5-27.

A Tabela 5-28 mostra os parâmetros  $\eta_e$  e  $\lambda_r$  aqui analisados, e esses mesmos parâmetros determinados por BEJARANO (2009), para outros sistemas de tratamento.

**Tabela 5-28:** Eficiência exergetica ambiental ( $\eta_e$ ) e o índice exergetico de renovabilidade ( $\lambda_r$ ) do sistema de gaseificação e dos sistemas analisados por BEJARANO (2009).

<b>SISTEMA</b>	<b>PRODUTOS</b>	<b><math>\eta_e</math></b>	<b><math>\lambda_r</math></b>
Gaseificação	Singás e cinzas	<b>0,241</b>	<b>0,734</b>
	Singás, cinza e calor de secagem da biomassa	<b>0,664</b>	<b>1,989</b>
Estação de Tratamento de Esgoto Barueri (Brasil)	Metano e lodo	<b>0,07</b>	<b>0,06</b>
RAFA- Lagoa Facultativa (Brasil)	Metano e lodo	<b>0,054</b>	<b>0,057</b>
Estação de Tratamento Cañaveralejo (Colômbia)	Metano aproveitado Metano desperdiçado e lodo	<b>0,394</b>	<b>0,770</b>

Verifica-se que, para os produtos singás e cinzas, os valores para o sistema de gaseificação é bem superior aos dois sistemas utilizados no Brasil e inferior ao daquele utilizado na Colômbia. Já utilizando o singás, as cinzas e o calor, o sistema de gaseificação apresenta valores bem superiores a todos os três sistemas analisados por Bejarano.

É bem verdade que os valores apresentados na Tabela 5-28 não podem ser tomados como referência uma vez que são sistemas diferentes: Neste (gaseificação), é considerada somente a eficiência do reator, não levando em consideração os processos a montante e a jusante do mesmo. Naqueles (ETE Barueri, RAFA – Lagoa Facultativa e ETE Cañaveralejo) são outros sistema de tratamento com processos bem diferentes.

O esquema da Figura 5-20, em cujo contexto se enquadra, também, a idéia representada pela Figura 3-15, ajuda a entender a proposta desse trabalho de um sistema de ecossaneamento com gaseificação da biomassa fecal humana, abrangendo os processos a montante e a jusante.

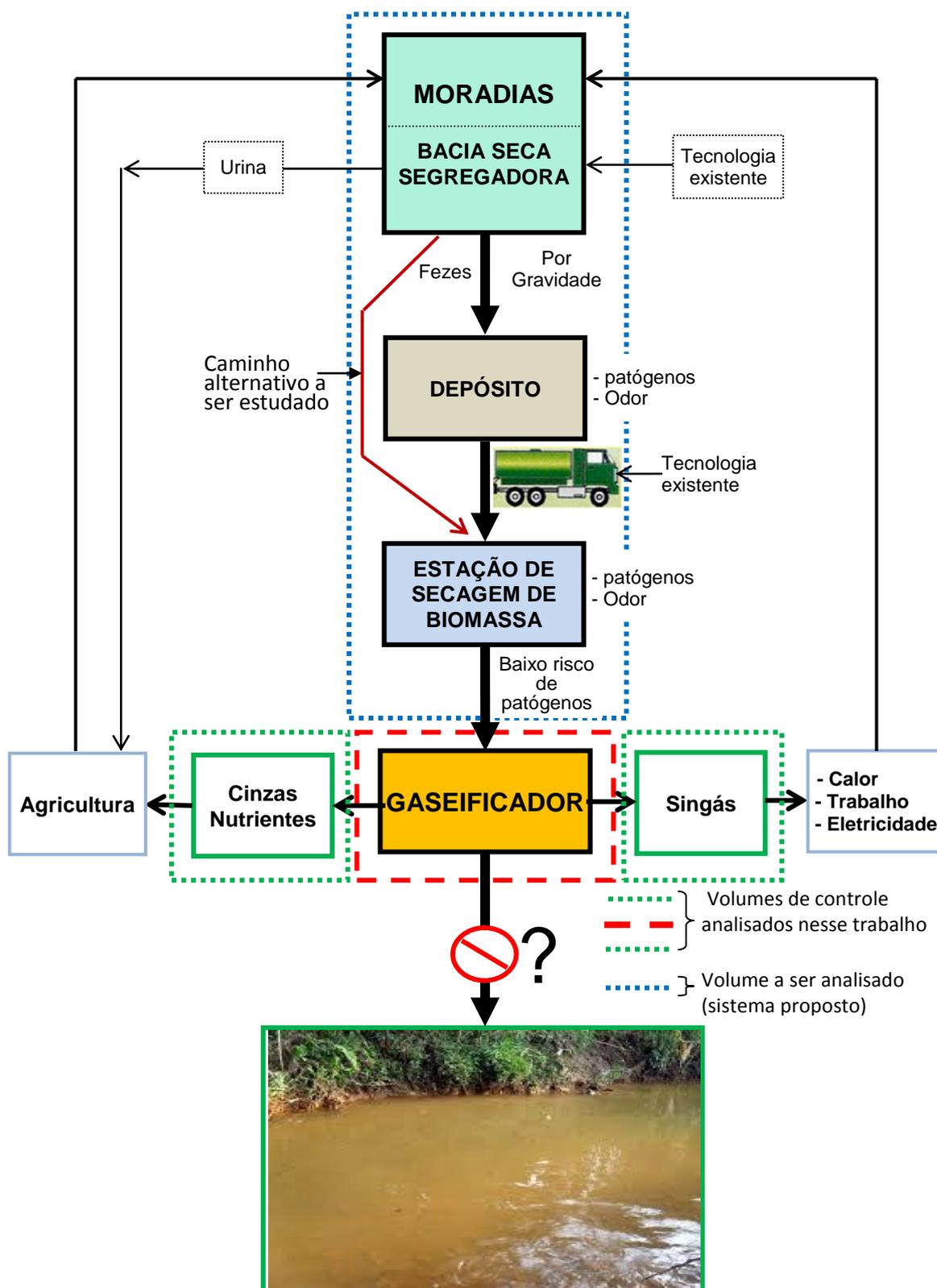


Figura 5-20: Diagrama representativo do sistema de ecosaneamento proposto.

No diagrama da Figura 5-20, MORADIAS representa um condomínio vertical, onde as fezes são coletadas em sacos biodegradáveis por meio das bacias secas segregadoras (tecnologia já existente), e transportadas, por gravidade, através de um tubo até um depósito localizado na base do edifício (tecnologia já existente). Do depósito, a biomassa é transportada, por via rodoviária, até à Estação de Secagem de Biomassa (tecnologia já existente), e dessa, para o gaseificador por meio de correia transportadora (ou outro sistema). O “caminho alternativo” indica uma possibilidade de transporte, via tubo, por meio de vácuo, ou gravidade, diretamente para a Estação de Secagem, evitando, assim, o depósito localizado na base do edifício e seus riscos de contaminação. Nesse caso, o depósito, se necessário, estaria próximo à Estação de Secagem.

No presente trabalho, foi analisado somente o gaseificador (volume de controle em vermelho), com balanço de energia e exergia. No sistema de saneamento, como um todo, aqui representado pela Figura 5-20, as energias e exergias envolvidas em todos os processos a montante (Moradias, depósito, Estação de secagem e/ou caminho alternativo) representados pelo volume de controle, em azul, e a jusante (calor, trabalho mecânico, eletricidade e agricultura), bem como suas interferências no meio ambiente, além de outros processos que poderão vir a existir ou deixar de existir com o sistema de gaseificação, deverão ser devidamente analisados para, aí sim, se fazer uma comparação com outros processos de saneamento. O sinal de “proibido”, a montante da figura do rio, indica que, com esse processo, se quer evitar a contaminação dos mananciais pelo não uso do carreamento hídrico. A interrogação indica que, em algum processo do sistema, pode ser necessário o uso de água e/ou algum lançamento, ainda não previstos.

Como, nesse caso, o carreamento hídrico e seus inconvenientes deixariam de existir, espera-se que, dentro do contexto de sistema de saneamento com gaseificação de biomassa, a eficiência exergética ambiental ( $\eta_e$ ) e o índice exergético de renovabilidade ( $\lambda_r$ ), assumam maiores valores.

## 7 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que o poder calorífico da biomassa fecal humana é equivalente ao poder calorífico da maioria das madeiras nativas nacionais e que esse poder calorífico varia em função da dieta calórica de cada indivíduo e, portanto, varia de região para região, dentro de um mesmo país e de país para país.

Os resultados também mostraram que a biomassa fecal humana possui uma quantidade significativa de energia que pode ser aproveitada como fonte de calor. De forma semelhante, ficou evidente, também, para os animais aqui analisados, a energia rejeitada através das suas fezes.

Observou-se, durante o processo de secagem e inativação biológica da biomassa, um odor característico bastante acentuado e repugnante que se evidencia quando a temperatura atinge valores acima de 80 °C. Observou-se, ainda, durante as duas primeiras semanas, a presença de uma grande quantidade de moscas no momento da abertura das amostras *in natura*, que era feita próximo ao secador de biomassa e que, a partir da 3ª semana, elas simplesmente desapareceram. Acredita-se que o odor exalado durante o processo de secagem, e que ficava impregnado nos próprios secadores de biomassa e vizinhanças, serviram como repelente contra esse tipo de inseto.

O Índice de Energia Rejeitada (IER), que é a energia rejeitada por quilograma de massa corporal, resultou para o humano, o mais baixo valor, e, na ordem crescente, o cachorro, porco, galinha e, por último, o boi, indicando que pode existir uma relação direta, entre o grau de desenvolvimento da espécie, e o índice de energia rejeitada. No entanto, estudos mais aprofundados, com inclusão de outras espécies, precisam ser desenvolvidos para comprovar, ou não, essa hipótese.

Nos testes de bancada, onde o reator simulou um processo de gaseificação do tipo contracorrente, verificou-se que, além da produção de singás, o alcatrão também era produzido e que esse alcatrão poderia ser destinado para outros processos industriais ou ser convertido em gás em um gaseificador do tipo cocorrente, conversão esta que foi verificada nos ensaios posteriores de gaseificação.

O processo de gaseificação mostrou que a biomassa fecal pode ser gaseificada sem mistura com outras biomassas e que esse processo é uma opção para o aproveitamento dessa energia rejeitada, podendo ser revertida em benefício das populações carentes, principalmente em regiões remotas do planeta.

Ficou também constatado que a frente de combustão no gaseificador é autossustentável, permitindo o seu craqueamento termoquímico sem mistura com outras biomassas. O fato de a gaseificação envolver decomposição termoquímica com temperaturas elevadas (acima de 600 °C), esse processo pode ser uma opção, desde que bem avaliado, como um processo de inativação biológica ou como um sistema de saneamento básico com geração de energia.

Do ponto de vista dos produtos, o singás produzido tem características semelhantes à de um singás proveniente da gaseificação de madeira, e pode ser utilizado como fonte direta de calor ou para produção de energia mecânica em motores de combustão interna, ou, ainda, em energia elétrica por meio de um grupo gerador. Em função da sua composição, a cinza, por sua vez, que é muito rica em fósforo, cálcio, potássio e magnésio, dentre vários outros elementos, possui características químicas que podem ser perfeitamente utilizadas como um fertilizante do solo sem qualquer risco biológico. A energia calorífica do singás que sai do gaseificador pode ser reaproveitada para pré-secagem da biomassa (vaso de secagem), conforme fluxograma de processo da Figura 4-18, ou em cogeração para outros fins.

A análise exérgica através dos parâmetros eficiência exérgica ambiental e índice exérgico de renovabilidade, quando considerados como produtos o singás e as cinzas, indicou uma eficiência de 24,1% e um índice de renovabilidade de 0,734 que caracterizam o sistema como ambientalmente desfavorável. No entanto, quando se considerou, também, o calor de secagem da biomassa como produto, a eficiência exérgica aumentou para 66,4% com um índice de renovabilidade de 1,989, o que torna, nesse caso, um sistema ambientalmente favorável, significando que o fluxo de exergia positivo excedente pode ser utilizado para outros fins ou para recuperação do meio degradado.

Por fim, a tecnologia de gaseificação de biomassa, aplicada para fezes humanas, pode vir a ser um sistema de saneamento sem carreamento hídrico, desde que analisada dentro do contexto do diagrama da Figura 5-20 e com as devidas análises energéticas e exergéticas; podendo se tornar um importante processo de recuperação de energia e nutrientes, com a vantagem adicional de minimizar ou evitar a eutrofização dos mananciais decorrentes dos processos de tratamento convencionais, preservando, assim, os já escassos recursos hídricos.

## 8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudar a possibilidade de se utilizar a tecnologia da gaseificação como um processo de tratamento de esgoto sem carreamento hídrico.

Aplicar os conceitos de exergia utilizando como produto a geração de energia elétrica por meio do próprio grupo gerador do sistema de gaseificação atual;

Estudar a possibilidade de implementação do gaseificador atual para permitir o seu funcionamento contínuo (não por batelada);

Estudar a possibilidade de se minimizar o calor dissipado pelo reator, uma vez que o gaseificador não foi otimizado para fluxo contínuo de biomassa e existem perdas de calor através do silo e adjacências.

Estudar a possibilidade de aumento do teor de hidrogênio no singás utilizando vapor d'água como agente gaseificante;

Estudar o conceito do Índice de Energia Rejeitada incluindo outras espécies de animais para verificar se existe alguma relação entre a IER e o grau de desenvolvimento do animal.

Estudar a possibilidade de se utilizar a biomassa fecal via combustão direta em caldeira para a geração de potência.

Avaliar a conversão da biomassa fecal em energia através de outras rotas, como biodigestão.

## REFERÊNCIAS

AGUDELO, C; MELS, A; BRAADBAART. **Multi-criteria framework for the selection of urban sanitation systems** - Urban Environment group – Department of Environmental Sciences Wageningen University Wageningen, The Netherlands – 2nd SWITCH Scientific Meeting Dan Panorama Hotel, Tel-Aviv, Israel, 2007.

AHN, H. K; RICHARD, T.L; GLANVILLE, T.D. **Optimum moisture levels for biodegradation of mortality composting envelope materials**. *Waste Management* 28(8),1411-6, 2008.

AIRES, M. DE M. **Fisiologia**. 3a ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan. 1232 p., 2008

ALVES, R. G. C M. **Tratamento E Valorização De Dejetos Da Suinocultura Através De Processos Anaeróbios – Operação E Avaliação De Diversos Reatores Em Escala Real**. Universidade Federal De Santa Catarina Centro Tecnológico Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Ambiental, 2007

AMJID, S. S; BILAL, M. Q; NAZIR, M. S; HUSSAIN, A. **Biogas, Renewable Energy Resource For Pakistan**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 – 2833 - 2837 –ScienceDirect – ELSEVIER- 2011.

ANDRADE, R. V. **Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental**, Itajubá, 205 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. 2007

ANDRADE NETO, C. O. HAANDEL, A VAN ; MELO, H. N. S. **O Uso do Filtro Anaeróbio para Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios no Brasil**. In: X Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2002, Braga, Portugal. **Anais do X Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Braga: APESB/APRH/ABES, 2002. CD-ROM.

ARAMBURU, J; ISEMAN, L. **Human Excreta To Energy And Biochar In Urban Kenya**. *The Faecal Sludge Management Africa - Developments, Research & Innovations – Sanitation Matters*, WIN-SA, 2013.

BARROS, R. M; TIAGO FILHO, G. L; NASCIMENTO, Y. D. S; GUSHIKEN, E; CALHEIROS, H. C; SILVA, F. G. B; STANO JÚNIOR, A. **Estudo da Produção de Biogás da Digestão Anaeróbia de Esterco Bovino em um Biodigestor**. *Revista Brasileira de Energia*, v. 15, n. 2, 2009, p. 95-116. BDT@. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~bdta/sgoto/lagoas.html>>. Acesso em: 27 fev. 2013.

BEJARANO, C. H. M. **Avaliação Exergoecológica de Processos de Tratamento de Esgoto** – (Tese de Doutorado)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

BIODIESELBR. Disponível em: <[http://www.biodieselbr.com/index2.php?option=com\\_content&task=view&id=4815&po...](http://www.biodieselbr.com/index2.php?option=com_content&task=view&id=4815&po...) 8/5/2009>. Acesso em: 20 out. 2012.

BONN2011 CONFERENCE. **The Water, Energy and Food Security Nexus.** Solutions for the Green Economy – Stockholm Environment Institute, 2011.

BRIDGWATER, A.V; TOFT, A.J; BRAMMER, J.G. **A technoeconomic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion.** Renewable & Sustainable Energy Reviews, v.6, p.181-248, 2002.

CARDOSO, B. M. **Uso da Biomassa como Alternativa Energética** – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2012.

CHAVES, L. I. **Microgeração de energia elétrica com gás de síntese de um gaseificador concorrente utilizando *Mazilaurus Itaúba***— Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, 2012. Cascavel, PR.

CHERNICHARO, C. A. de L. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios.** Belo Horizonte. Projeto PROSAB 2 – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 2001.

CHERNICHARO, C. A. de L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias - Reatores anaeróbios.** Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1997.

COMITEPCJ. Disponível em: <[http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:xhnLSdORzceJ:www.comitepcj.sp.gov.br/download/Curso-TratEsgoto\\_Capitulo-5.pdf+&hl=ptBR&gl=br&pid=bl&srcid=ADGEESikE1vVQhLdPo4M03STql28bcaVZPXjl-1OaRDMW7KCbR2ruHRRwn2ztsSagEWrHiR8kJP52ty4AyFA\\_xqGU\\_ZOpK0QsSHnJc9EaMg4KV33PiB9Px37hXSFJ4DPZzk84TKy2&sig=AHIEtbTkmzdyHxWnbmbG2S9UUZ8af5Y8bQ](http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:xhnLSdORzceJ:www.comitepcj.sp.gov.br/download/Curso-TratEsgoto_Capitulo-5.pdf+&hl=ptBR&gl=br&pid=bl&srcid=ADGEESikE1vVQhLdPo4M03STql28bcaVZPXjl-1OaRDMW7KCbR2ruHRRwn2ztsSagEWrHiR8kJP52ty4AyFA_xqGU_ZOpK0QsSHnJc9EaMg4KV33PiB9Px37hXSFJ4DPZzk84TKy2&sig=AHIEtbTkmzdyHxWnbmbG2S9UUZ8af5Y8bQ)>.

CORTEZ, L.A.B; LORA, E. E. S; AYARZA, J. A. C. **Biomassa no Brasil e no mundo.** In: CORTEZ, L.A.B; LORA, E.E.S.; GOMEZ, E.O. (org). **Biomassa para energia.** Campinas, São Paulo: Editora da UNICAMP, 2008.

DUTRA-DE-OLIVEIRA, J.E., MARCHINI, J.S. Ciências nutricionais. São Paulo, Sarvier, 1998.

edpESCELSA – Espírito Santo Centrais Elétricas S.A. – Disponível em: <[www.edpescelsa.com.br](http://www.edpescelsa.com.br)>. Acesso em: 09 out. 2015.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA DE ENERGIA. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis** - Governo Federal - Ministério de Minas e Energia, Ano 2012.

FAO STATISTICAL YEARBOOK – World Food and Agriculture, Food and Agriculture Organization of the United Nations – Rome, 2012.

FEACHEM, R. G; BRADLEY, D. J; GARELICK, H; MARA, D. D. 1983. Sanitation and Disease . Health aspects of excreta and wastewater management. World Bank studies in water supply and sanitation. John Wiley and Sons. New York.

FORUMDEENERGIA. Disponível em: <[http://www.forumdeenergia.com.br/nukleo/pub/resultados\\_pre\\_ben\\_2010.pdf](http://www.forumdeenergia.com.br/nukleo/pub/resultados_pre_ben_2010.pdf)>. Acesso em: 10 jul. 2012.

FRANSHAM, P. Disponível em: <<http://green.blogs.nytimes.com/2009/06/17/the-energy-potential-of-chicken-droppings/>>. Acesso em: 15 nov. 2012.

FRANSHAM, P. Disponível em: <<http://green.blogs.nytimes.com/2009/06/17/the-energy-potential-of-chicken-droppings/>>. Acesso em: 15 nov. 2012.

FRENOUX, C; TSITSIKALIS, A. **Domestic private faecal sludge emptying services in Cambodia: between market efficiency and need for sustainable anagement.** FSM2 2nd International Faecal Sludge Management Conference International Convention Centre, Durban, South Africa, 2012.

FUNASA – **Fundação Nacional de Saúde – Manual de Saneamento.** 3. Ed. Rev – Brasília – 2004. Disponível em: <[http://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/funasa/capitulo\\_3.pdf](http://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/funasa/capitulo_3.pdf)>

GALLEGOS-MUÑOZ, A; ZALETA-AGUILAR, A; GONZÁLEZ-RLÓN, B; RANGEL-HERNANDEZ, V. H. **On an Exergy Efficiency Definition of a Wastewater Treatment Plant** - International Journal of Thermodynamics – v. 6, n. 4, 2003.

GERALDO, B. C. A. **Gaseificação da casca e da torta da mamona para produção de gás combustível** - Universidade Federal de Pernambuco Centro de Tecnologia e Geociências - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Recife, 2013.

GILTNER, S; WARSONO, M; DARMAWAN, B; BLACKETT, I; TAYLER, K. **Development of urban septage management models.** FSM2 2nd International Faecal Sludge Management Conference International Convention Centre, Durban, South Africa, 2012.

GONÇALVES, R, F, e col. **Pós – Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios Por Reatores Com Biofilme** In Pós – Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios / Carlos Augusto Lemos Chernicharo (coordenador). Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES.V. 2001.

GUIOTTO, Z. **Fezes Humanas Alimentam o Mundo.** Disponível em: <<http://zelmar.blogspot.com.br/2010/05/fezes-humanas-alimentam-o-mundo.html>>. Acesso em: 10 out. 2012.

- GUEDES, D. P. & GUEDES, J. E. R. P.- Controle de Peso Corporal. Rio de Janeiro, Shape, 2003.
- GUYTON, A. C; HALL, J. E. **Tratado de fisiologia médica**. 10. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 973 p., 2002.
- HAUG, R.T., 1993. **The practical book of compost engineering**. Lewis Publishers. Lewis Publishers. Boca Raton. Washington D.C., ISBN 0 87371 373 7.
- HEINONEN-TANSKI, H; van WIJK-SIJBESMA, C. **Human Excreta for Plant Production**. Department of Environmental Sciences, University of Kuopio, P.O. Box 1627, FIN-70211 Kuopio, Finland b IRC International Water and Sanitation Centre, P.O. Box 2869, 2601 CW Delft, The Netherlands, ELSEVIER-2003.
- HELLSTRÖM, D; KÄRRMAN, E. **Exergy analysis and nutrient flows of various sewerage systems** - Water Science and Technology, v. 35, n. 9, p. 135–144, 1997.
- HIGMAN, C; BURGT, M. VAN DER. **Book Gasification** – Library of Congress Cataloging-in-Publication. 2003.
- HUANG, L. Q; CHEN, G. Q; ZHANG, Y; CHEN, B; LUAN, S. J. **Exergy as a Unified Measure of Water Quality**. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, v. 12, n.5, p.663-672, August, 2007.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Pecuária Municipal**, volume 41, ISSN 0101 - Brasil – 2013.
- IEA – International Energy Agency - **Publications: Scenarios and Projections 2012**. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/scenariosandprojections/>>. Acesso em: 15 maio 2013.
- JENKINS, B. M. **Bioenergy, Biofuels, and Potentials for Sustainable Development**, Energy Lecture Series – University of California, Davis - Department of Biological and Agricultural Engineering, 2007.
- JENSSEN, P. D. **Ecological Sanitation - an overview** – Course: Appropriate sanitation for the developing world - Norwegian University of Life Sciences, 2005
- JÖNSSON<sup>(a)</sup>, H; STINTZING, R; VINNERÅS, B; SALOMON, E. **Guidelines on use of urine and faeces in crop production**. *Report 2004-2, Ecosanres*, Stockholm Environment Institute, Stockholm, Sweden. Available at: [www.ecosanres.org](http://www.ecosanres.org).- 2004.
- JÖNSSON<sup>(b)</sup>, H; STINTZING, A. R; VINNERÅS, B; SALOMON, E. **Orientações de Uso de Urina e Fezes na Produção Agrícola**. EcoSanRes, 2004.

KALTCHMITT, M. H. **Energie aus biomass: Grundlagen, Techniken und Verfahren**, Springer Verlag, 2001.

KASEMBE, E. D; JOHN, G. R; MHILU, C. F. **Analysis of High Temperature Biomass Gasification**. OIDA International Journal of Sustainable Development, v. 4, n. 1, p. 53-60, 2012.

KEMPEN, T. V. **RE-Cycle: A Profitable Swine Production System With Zero Waste** - North Carolina State University, Raleigh, NC 27695, [T\\_vankempen@ncsu.edu](mailto:T_vankempen@ncsu.edu).

KHOSRAVI, S; PANJESHAHI, M. H; ATAELI, A. **Application of Exergy analysis for quantification and optimisation of the environmental performance in Wastewater Treatment Plants - International Journal of Exergy (IJEX)**. v.12, n.1, p.119 – 138, 2013.

KIRKELS, A. F; VERBONG, G. P. J. **Biomass Gasification : Still Promising? A 30 Year Global Overview**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n.1, p. 471- 481, 2011.

KONE, D. **An overview of the FSM work of the Bill and Melinda Gates Foundation**. FSM2 2nd International Faecal Sludge Management Conference International Convention Centre, Durban, South Africa, 2012.

LAMAS, W. Q. **Fuzzy Thermo-economic Optimisation Applied to a Small Waste Water Treatment Plant** – Renewable and Sustainable Energy Reviews.- v. 19, p. 214 – 219, Elsevier, 2013.

LATTOUF, R; OLIVEIRA JUNIOR, S. **Exergy Analysis of Environmental Impact Mitigation Processes**. In: Proceedings of the ECOS'2003 Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 1, 2003, Copenhagen. Denmark, 2003. P. 397-404.

LAZAROVA V; CHOO K. H; CORNEL, P. **Water and Energy Link in the Cities of the Future – Achieving Net Zero Carbon and Pollution Emissions Footprint**. Water/Energy Interactions of Water Reuse, IWA Publishing, London, 2012.

LENTNER, C., LENTNER, C. & WINK, A. **Units of Measurement, Body Fluids, Composition of the Body, Nutrition**. Geigy Scientific Tables. CIBA-GEIGY Ltd, Basle, Switzerland. ISBN 0-914168-50-9, 1981.

LETTNER, F; TIMMERER, H; HASELBACHER, P. **Biomass Gasification – State of the Art Description**, Inffeldgasse 25B, 8010 Graz – Austria- Intelligent Energy – Europe (IEE). 2007.

LI, K. W. **Applied thermodynamics: availability method and energy conversion**. Fargo: Taylor & Francis, 1996. 369p.

LORA, E. S; VENTURINI, O. J. **Termoquímica Para Combustíveis – Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída – NEST – Universidade Federal de Itajubá**, 2008.

LORA, E. S. **Motores Stirling Utilizando Biomassa Como Combustível**. Instituto de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de ITAJUBÁ – NEST- Núcleo de Excelência em Geração Temelétrica e Distribuída, 2009.

LORING, J. **The Energy Potential of Chicken Droppings – A Blog About Enegy and the Environment**. June 17, 2009, 9:33 am. Disponível em: <<http://green.blogs.nytimes.com/2009/06/17/the-energy-potential-of-chicken-droppings/>>. Acesso em: 15 fev. 2013.

MACEDO ALVES, R. G. C. **Tratamento E Valorização De Dejetos Da Suinocultura Através De Processos Anaeróbios – Operação E Avaliação De Diversos Reatores Em Escala Real**. Universidade Federal De Santa Catarina Centro Tecnológico Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Ambiental, 2007.

MACLEOD, N. **Head, Ethekwini Water And Sanitation (City Of Durban)**. Durban - Looking Beyond Conventional Sanitation Solutions. FSM2 2nd International Faecal Sludge Management Conference International Convention Centre, Durban, South Africa, 2012

MADIGAN, M.T., MARTINKO, J.M., PARKER, J., 2008. **Microbiologia de Brock**. USA: Pearson.

MASTERENERGIA. Disponível em: <<http://www.masterenergia.com.br/administra/imagens/noticias/biomassa3.jpg> >. Acesso em: 03 mar. 2013.

MATSUSHIGE, K; GODA, T; TAI, SHINGO. **Chemical Exergy of Organic Matter in Wastewater**. International Journal of Environmental Studies, v 27, Issue 3-4, 1986.

McARDLE, W. D., KATCH, F. I., KATCH, V. L. **Fisiologia do Exercício, energia, nutrição e desempenho humano**. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 1998.

MCKENDRY, I. G. **Evaluation of Artificial Neural Networks for Fine Particulate Pollution (PM 10 and PM2.5) Forecasting**. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 52, p. 174-185, 2002.

MENDES, M. E. S. S. **Metodologia para Análise Exergética-econômica de Planta a Vapor para Geração de Eletricidade Consumindo Resíduos de Biomassa Amazônica**. – Universidade Federal do Pará – Instituto de Tecnologia – PPGEM – 2009.

MIHELICIC, R. J; FRY, L. M; SHAW, R. **Global potential of Phosphorus recovery from human urine and feces**. Chemosphere, volume 84, issue 6, august 2011, Pages 832-839 – The Phosphorus Cycle. ELSEVIER.

MIRANDA, A. P; LUCAS JUNIOR, J; THOMAZ, M. C; PEREIRA, G. T; FUKAYAMA, E. H. **Anaerobic biodigestion of pigs feces in the initial, growing and finishing stages fed with diets formulated with corn or sorghum**. Scientific Papers Energy Systems - Eng. Agríc. vol.32 no.1 Jaboticabal, 2012.

MMA – **Ministério do Meio Ambiente**, 2013 – Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biomassa>>. Acesso em: 27 maio 2013.

MME – **Ministério de Minas e Energia**. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/3\\_-\\_Resenha\\_Energetica/Resenha\\_Energetica\\_2009\\_-\\_PRELIMINAR.pdf](http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/3_-_Resenha_Energetica/Resenha_Energetica_2009_-_PRELIMINAR.pdf)>. Acesso em: 10 jul. 2012.

MME(a) – **Resenha Energética Brasileira** – Exercício de 2014 – Edição de junho de 2015, Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia (N3E).

MME(b) - Ministério de Minas e Energia – **Plano Nacional de Energia 2030** - Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, 2006-2007.

MODENEZE, D. M. Atividade Física e Controle de Peso Corporal (Equilíbrio Energético)- Unicamp. (2012)

MOHAMMED, Y. S; BASHIR, N; AHMED, S; KAKU, S. J; SALIHU, O. S. **An Overview of Electrical Energy Generation Mechanisms from Bio-wastes for Sustainable Emissions Reductions**. Department of Electrical Power Engineering, Faculty o Electrical Engineering. Malaysia: Universiti Teknologi, 2012.

MONHOL, F. A. F; MARTINS, M. F; **"Ignition by Thermal Radiation of Polyethylene and Human Feces Combustible Wastes: Time and Temperature to Ignition"**, Advanced Materials Research, Vol. 911, pp. 373-377, Mar. 2014

MORAES M; RINGLER, C; CAI, X. **Policies and Instruments Affecting Water Use for Bioenergy Production, Bioenergy and Water, Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 4, p. 431-444, 2011.

MORRIS, R. D; SZARGUT, J. **Standard Chemical Exergy Of Some Elements And Compound On The Planet Earth**. Department of Chgematic Engineering, University of New Brunswick, P.O. – Fredericton, N.B. Canada E3B 5A3 – November 1985. Pergamon Journals Ltd.

MOURA, J. P. **Estudos das Rotas Tecnológicas Para Produção de Biogás e da Influência da Composição Química de Dejetos de Matrizes Suínas na Qualidade do Biogás Gerada Por Biodigestor** – Infobibos – Informações Tecnológicas, 2012. [www.infobibos.com](http://www.infobibos.com).

MUGA, H. E; MIHELICIC, J. R. **Sustainability of wastewater treatment technologies**. Department of Civil and Environmental Engineering, Sustainable Futures Institute, Michigan Technological University, Houghton, MI 49931, USA - **Journal of Environmental Management** 88, 437–447, 2008.

MÜNCH, E.V. **Characteristics of urine, faeces and greywater**. Unesco IHE – Institute of Water Education - Course 1 Unit 2, 2005.

NAKATO, T; STRANDE, L; NIWAGABA, C. B; DIONE, H; , BAAWUAH, N; MURRAY, A. **Fuel Potential of Faecal Sludge - Calorific Value Results From Uganda, Ghana and Senegal**. The Faecal Sludge Mangement Africa - Developments, Research & Innovations – Sanitation Matters, WIN-SA, 2013.

NASCIMENTO, M. S. F; Ferreira, O. M. - **Tratamento de Esgoto Urbano: Comparação de Custos e Avaliação da Eficiência** - Universidade Católica de Goiás – Departamento de Engenharia – Engenharia Ambiental, 2012.

NATAL, L. P; QUEIROZ, S. C. B; SILVA, C. D. F. **Comparação na Remoção de DQO e Sólidos Suspensos em Filtros Anaeróbios com Deifetentes Recheios** – XXVIII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental, Cancún, México. 2002

NIWAGABA, C. B. **Treatment Technologies for Human Faeces and Urine** - Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences Department of Energy and Technology-Uppsala And Faculty of Technology Makerere University Kampala, Uganda, Doctoral Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala 2009.

NIWAGABA, C.; NALUBEGA, M.; VINNERÅS, B.; SUNDBERG, C.; JÖNSSON, H. **Bench-scale composting of source-separated human faeces for sanitation**. *Waste Management*, v.29, p.585-589, 2009.

NNFCC - **Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes Final report NNFCC project 09/008** - A project funded by DECC, project managed by NNFCC and conducted by E4Tech, June 2009.

NZIHOU, J. F; HAMIDOU, S; BOUDA, M; KOULIDIATI, J; SEGDA, B. G. **Using Dulong and Vandralek Formulas to Estimate the Calorific Heating Value of a Household Waste Model**. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 5, Issue 1, January-2014 1878 ISSN 2229-5518 IJSER.

OLIVEIRA ANDRADE, H; PINHEIRO, G. D; PEREIRA, A. I. S; FERREIRA, J. C. S; BORGES, M. V. F. **Aspectos teóricos na produção de biogás e biofertilizante pelo mecanismo de biodigestão e geração de energia elétrica limpa através de um gerador específico** – VII CONNEPI – Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, Palmas – Tocantins, 2012.

OBERNBERGER. G. - **Combustion and Gasification of Solid Biomass For Heat and Power Production in Europe** – State-of-The-Art and Relevant Future Developments – 8<sup>th</sup> European Conference on Industrial Furnaces and Boilers (keynote lecture) - Austrian Bioenergy Centre GmbH, Graz, Austria, 2008.

OLIVEIRA JR., S. **Exergy: Production, Cost and Renewability** Sao Paulo: Springer, 2013.

OLIVEIRA, S. M. A; VON SPERLING, M. **Avaliação Comparativa de Seis Tecnologias de Tratamento de Esgoto, Em Termos de Atendimento a Padrões de Lançamento.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23, 2005, Campo Grande. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: ABES, 2005. p. 1-7.

OLIVEIRA, P. A. V. **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos.** EMBRAPA-CNPSA. Documentos, 27, 1993. 188 p.

OPEL, A. **Challenge Critical: Absence of Faecal Sludge Management Shatters the Gains of Improved Sanitation Coverage in Bangladesh.** FSM2 2nd International Faecal Sludge Management Conference International Convention Centre, Durban, South Africa, 2012.

PARK, K. J; ANTONIO, G. C; OLIVEIRA, R. A; KIL, J. B. P. **Conceitos de Processo e Equipamentos de Secagem** – Campinas, 2007. Disponível em <<http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>>. Acesso em: 12 jun. 2013.

PERA, H. **Geradores de vapor: um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia.** 2. ed. São Paulo: Fama, 1990. 426p.

PNSB – **Planeta Sustentável, 2008.** Disponível em: <<http://planetasustentavel.abril.com.br/home/>>. Acesso em: 25 fev. 2013.

PTASINSKI, K. J; PRINS, M. J; PIERIK, A. **Exergetic Evaluation of Biomass Gasification–ECOS 05.** 18<sup>th</sup> International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation, and Environmental Impact of Energy Systems – ECOS-05. April 2007.

PURVES, I; GARDINER, V. **Financially and Culturally Sustainable - Applications of Loowatt Technology in Antananarivo, Madagascar – Early Feedback.** FSM2 2nd International Faecal Sludge Management Conference International Convention Centre, Durban, South Africa, 2012.

QUAAK, P; KNOEF, H; STASSEN H. Book – **Energy From Biomass** – World Bank Technical Paper no. 422 – Energy Series. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=M2WMrePllxkC&oi=fnd&pg=PR11&dq=biomass+energy+gasification&ots=mUQp3ijk6J&sig=RI33f56VsTQgN72rNfKH9qrafCY>>. Acesso em: 22 fev. 2013.

QUIRINO, W. F; DO VALE, A. T; DE ANDRADE, A. P. A; ABREU, V. L. S; AZEVEDO, A. C. S. – **Poder Calorífico da Madeira e de Materiais Ligno-celulósicos**. Revista da Madeira no 89 - Abril de 2005, p. 100-106.

QUIUMENTO, F. Disponível em: <<http://knol.google.com/k/francisco-quiumento/biocombust%C3%ADveis/2tlel7k7dcy4s/79#As>>. Acesso em: 18 maio 2012.

REBOUÇAS, T. C.; **Estabilização e higienização de fezes humanas através de compostagem em regime de batelada**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental; Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

REDDY, B. V. **Biomass and Coal Gasification based Advanced Power Generation Systems and Recent Research Advances** – 37<sup>th</sup> National & 4<sup>th</sup> International Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power, , II Madras, Chennai, India. December 2010.

ROCHA, J. D. **Gaseificação de Biomassa** - Histórico e Conceitos Básicos Tecnologia e Estado da Arte da Gaseificação de Biomassa – Universidade do Amazonas - NIPE/UNICAMP. 2002.

ROBBINS, D. M; DOCZI, J. **Best practices in faecal sludge management – Lessons learned from 4 case studies in the Philippines**. FSM2. 2nd International Faecal Sludge Management Conference - International Convention Centre, Durban, South Africa, 2012.

ROSEN, M. A; DINCER, I; KANOGLU, M. **Role of Exergy in Increasing Efficiency and Sustainability and Reducing Environmental Impact**. Energy Policy, v. 36, n. 1, p. 126–137, Elsevier, 2008.

SALAS, R. K. **Non Conventional ways to evacuate, treat and reuse human excreta and domestic liquids in poor areas of Lima-Peru**. KTH Land and Water Resources Engineering, Stockholm, 2005

SÁNCHEZ, C. G; CAMPO, E. R. B. **Tecnologia da gaseificação**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, p. 5-2, 5-17, 2003.

SANTOS, J. J. C. S. **Cogeração e Geração Distribuída - Avaliação Exergoeconômica de Sistemas de Cogeração**. Universidade Federal de Itajubá - Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída, 2007.

SAWYER, R; SIMPSON-HÉBERT, M; VARGAS, J; CALVERT, P; MORGAN, P; ROSEMARIM, A; SAWYER, R; XIAO, J; RIDDERSTOLPE, P; ESREY, S. A; GOUGH, J; RAPAPORT, D; WINBLAD, U. - **Ecological Sanitation** – Revised and enlarged edition - Stockholm Environment Institute, 2004.

SCHÖBITZ, L; GEBAUER, H; ROBBINS, D; OTOO, M; DRECHSEL, P; SRIKANTIAH, V; STRANDE, L. **Business Model Innovations for Scaling-up FSM Businesses in low- and middle-income Countries**. FSM2 2nd International Faecal Sludge Management Conference International Convention Centre, Durban, South Africa, 2012.

SHIBAMOTO, T; YASUHARA, A; KATAMI, T. **Dioxin formation from waste incineration**. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 190, 1-41 - US National Library of Medicine National Institutes of Health -2007.

SOUTHGATE, D. A. T; Durnin, J. V. G. A. **Calorie conversion factors. An experimental reassessment of the factors used in the calculation of the energy value of human diets**. *Br. J. Nutr.* (1970)~2 4, 517

STASSEN, H. E. **Scale Biomass Gasifiers for Heat and Power**. A Global Review. World Bank - Technical Paper Number 296, Energy Series. 1995.

SVB – Sociedade Vegetariana Brasileira – **Guia Alimentar de Dietas Vegetarianas para Adultos** – Departamento de Medicina e Nutrição – 2012.

SZARGUT, J; MORRIS, D. R; STEWARD, F. R. **Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes**. New York: Hemisphere 1988. 332p.

Szargut, J. **Appendix 1. Standard Chemical Exergy**. Egzergia. Poradnik obliczania i stosowania, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.

TALSMA, L; MOLENBROEK, J. F. M; CRUL, M; ARAVIND, P. V; STEFANIDIS, G; NAVARRETE M. A. **The Proposal of Plasma Gasification for an off the Grid Sanitation Solution**. FSM2. 2nd International Faecal Sludge Management Conference - International Convention Centre, Durban, South Africa, 2012.

TEIXEIRA, M. B; - Disponível em: (UFF) [miriam19novembro@yahoo.com.br](mailto:miriam19novembro@yahoo.com.br) Ana Lucia T. Seroa da Motta (UFF) [anaseroa@poscivil.uff.br](mailto:anaseroa@poscivil.uff.br) (Acesso em 10/02/2013).

TILLEY, E; ULRICH, L; LÜTHI, C; REYMOND, P. H; ZURBRÜGG, C. **Compendium of Sanitation Systems and Technologies**. 2nd Revised Edition. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). Dübendorf, Switzerland, 2014.

TONANI, C. F. - **Avaliação da biodegradabilidade aeróbia de resíduo de origem fecal** – Tese de Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo- 1984-T663a, 2010.

TORENDEL, B. **Sanitation Ventures Literature Review**: on-site sanitation waste characteristics - London School of Hygiene & Tropical Medicine, 2010.

TRATABRASIL (2011). Disponível em: <[http://www.tratabrasil.org.br/datafiles/uploads/pdfs/ranking-81-cidades-release\\_final.pdf](http://www.tratabrasil.org.br/datafiles/uploads/pdfs/ranking-81-cidades-release_final.pdf)>. Acesso em: 25 mar. 2013.

UNDP – United Nations Development Programme - Human Development Reports – Table 1 Human Development Index and its components - <http://hdr.undp.org/en/content/table-1-human-development-index-and-its-components>  
Acesso em: 08 ago. 2015.

USHIMA, A. H. **Aspectos Tecnológicos de Gaseificadores e Sistema de Limpeza de Gases**. IPT100 - Instituto de Pesquisas Tecnológicas - Agrupamento de Engenharia Térmica - São Paulo. Disponível em:  
<[http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/IIseminario/gaseificacao\\_convert.pdf](http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/IIseminario/gaseificacao_convert.pdf)>. Acesso em: 19 dez. 2012.

VALERO, A; UCHE, J; MARTINEZ, A; ESCRIU, J. **Physical Hydromomics: Application of the Exergy Analysis to the Assensment of Environmental Costs of Water Bodies**. The Case of the Inland Basins of Catalonia. Zaragoza, 2006. CIRCE FOUNDATION – Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza. Disponível em: <[http://teide.cps.unizar.es:8080/pub/publicir.nsf/codigos/o436/\\$FILE/cp0436.pdf](http://teide.cps.unizar.es:8080/pub/publicir.nsf/codigos/o436/$FILE/cp0436.pdf)>. Acesso em: 10 nov. 2012.

VAN WYLEN, G; SONNTAG, R; BORGNAKLE, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**, 4ª Edição – Editora Edgard Blücher, 2003. ISBN 8521201354, EAN 9788521201359.

WERNER, C; PANESAR, A; RÜD, S. B; OLT, C. U. **Ecological sanitation: principles, technologies and project examples for sustainable wastewater and excreta management**. *Desalination*, v. 248, p. 392- 401, 2009.

VICTORINO, C. J. A. **Planeta Água Morrendo de Sede** : Uma Visão Analítica na Metodologia do Uso e Abuso dos Recursos Hídricos. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 231 p.

VINNERAS, B; PALMQUIST, H; BALMÉR, P; WEGLIN, J; JENSEN, A; ANDERSSON, A; JÖNSSON, H. **The Characteristics of Household Wastewater and Biodegradable waste – A Proposal for New Swedish Norms**. Urban Water 3, 3-11 - 2006.

von SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias - Lagoas de estabilização**. 2. ed. v. 3. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

WIN-SA – Water Information Network – South Africa. **The Faecal Sludge Mangement Africa - Developments, Research & Innovations** – Sanitation Matters – A Magazine For Southern Africa, 2013.

WHO - World Health Organization - **Global analysis and assessment of sanitation and drinking-water (GLAAS)** - GLAAS report, 2012. Disponível em: <[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/glaas/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/glaas/en/)>. Acesso em: 22 abr. 2013.

WHO - World Health Organization. **Progress on Sanitation and Drinking Water – OMS/UNICEF. 2010** - Disponível em: <[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/9789241563956/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/9789241563956/en/)>. Acesso em 22 fev.2013.

WU, H., HANNA, M. A., JONES, D. D.- **Fluidized-Bed Gasification Of Dairy Manure By Box–Behnken design** - Agricultural Product Center, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE 68583, USA, 2012. Biological Systems Engineering: Papers and Publications. Paper 214.

## APÊNDICE A

Gráficos das curvas de produção de gás, em função do diâmetro da partícula, para os teores de umidade de 0%, 10% e 20%.

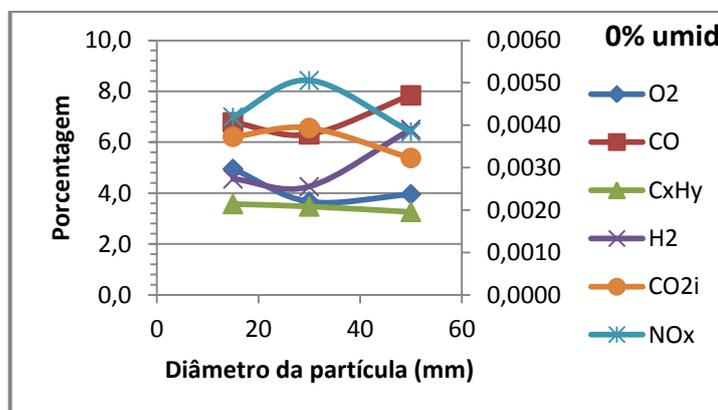


Figura 1: Curvas de produção de gás em função do diâmetro da partícula para 0% e umidade.

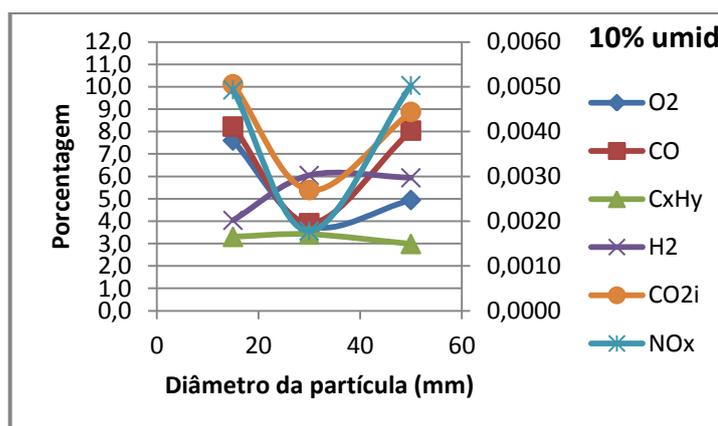


Figura 2: Curvas de produção de gás em função do diâmetro da partícula para 10% e umidade.

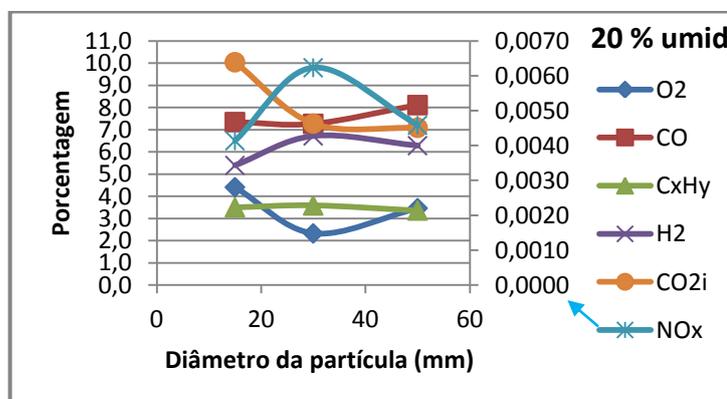


Figura 3: Curvas de produção de gás em função do diâmetro da partícula para 20% e umidade.

## APÊNDICE B

Gráficos das curvas de produção de gás, em função do teor de umidade, para diâmetros de partícula de 15 mm, 30 mm e 50 mm.

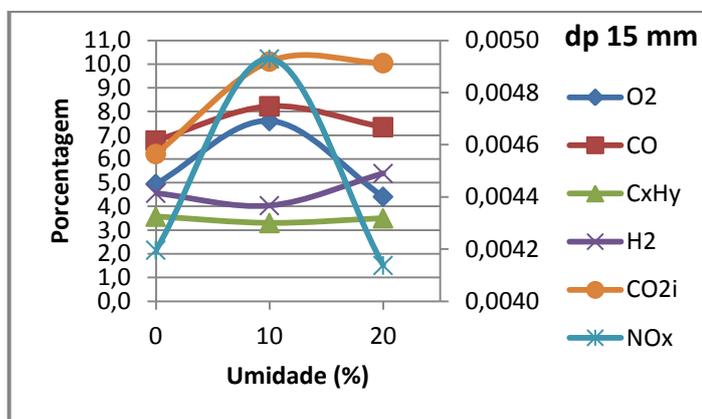


Figura 1: Curvas de produção de gás em função da umidade para um diâmetro de partícula d 15 mm.

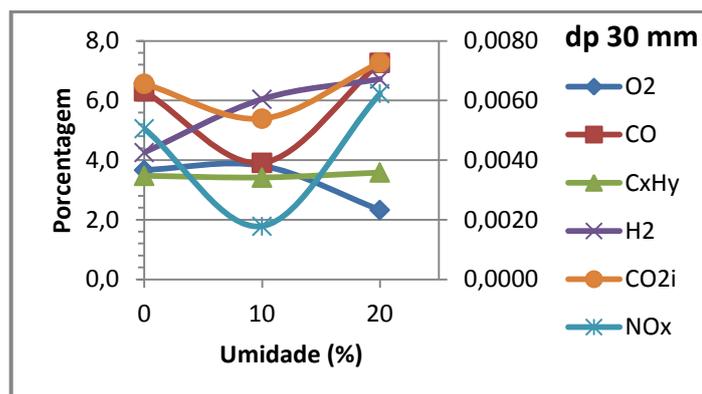


Figura 2: Curvas de produção de gás em função da umidade para um diâmetro da partícula de 30 mm.

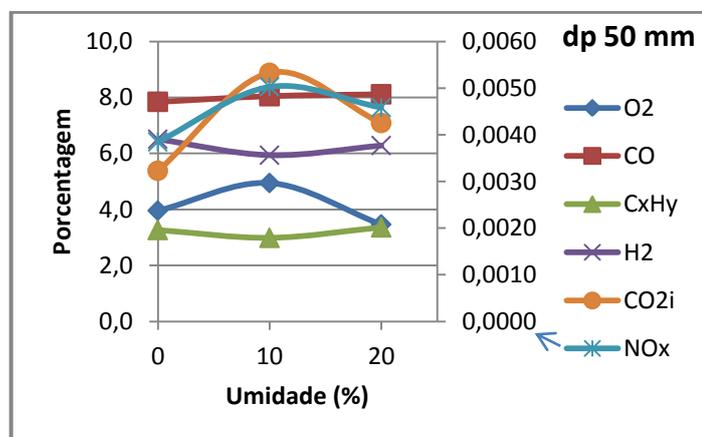


Figura 3: Curvas de produção de gás em função da umidade para um diâmetro de partícula de 50 mm.

## APÊNDICE C

Tabela das médias dos teores dos gases gerados e tabelas dos cálculos das exergias.

Tabela 1: Médias dos teores dos componentes do singás.

	<b>20% Umidade</b>	<b>% O2</b>	<b>% CO</b>	<b>% CH4</b>	<b>% H2</b>	<b>% NOx</b>	<b>% CO2i</b>
<b>Ensaio</b>	A	5,5	18,3	3,3	9,8	4,80E-03	6,6
	B	5,8	17,4	3,4	9,6	5,80E-03	7,9
	C	5,1	17,6	3,4	9,7	3,10E-03	6,8
	D	5,6	16,7	3,6	9,7	4,60E-03	5,6
<b>Média</b>	<b>%</b>	<b>5,5</b>	<b>17,5</b>	<b>3,425</b>	<b>9,7</b>	<b>0,005</b>	<b>6,7</b>
Desvio Padrão		0,29	0,66	0,06	0,08	0,001	0,94

Tabela 2: Cálculo da exergia das cinzas.

	<b>%</b>	<b>PM</b>	<b>metal</b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>Óxido</b>	<b>PM óxido</b>	<b>% óxido</b>	<b>Fração molar</b>	<b>kg/kmol</b>	<b>Eq padrão-Oxido</b>	<b>Eq. do Oxido</b>
P	20,791	30,97	2	5	P2O5	141,937	47,6437	0,47644	67,624	319540	152240,7038
K	14,537	39,1	2	1	K2O	94,1994	17,5111	0,17511	16,4954	425540	74516,83784
Ca	15,458	40,08	1	1	CaO	56,0794	21,6288	0,21629	12,1293	119620	25872,39717
Mg	6,1106	24,31	1	1	MgO	40,3094	10,1323	0,10132	4,08426	59170	5995,270625
S	0,8162	32,07	1	2	SO2	64,0688	1,63063	0,01631	1,04473	313400	5110,405323
B	0,0036	10,81	2	3	B2O3	58,8082	0,0195	0,0002	0,01147	69400	13,53499907
Fe	0,4161	55,85	2	3	Fe2O3	159,698	0,59492	0,00595	0,95008	20370	121,185253
Mn	0,1181	54,94	1	1	MnO	70,9394	0,15251	0,00153	0,10819	124800	190,3304839
Zn	0,3393	65,41	1	1	ZnO	81,4094	0,42228	0,00422	0,34378	22900	96,70307782
Al	0,0935	26,98	2	3	Al2O3	101,958	0,1766	0,00177	0,18006	204270	360,7498868
Pb	0,0006	207,2	1	1	PbO	223,199	0,00065	6,5E-06	0,00146	46900	0,306445941
Cd	8E-06	112,41	1	1	CdO	128,409	9,1E-06	9,1E-08	1,2E-05	67300	0,006151988
Hg	8E-06	200,59	1	1	HgO	216,589	8,6E-06	8,6E-08	1,9E-05	57300	0,004950979
Cu	0,0432	63,55	1	1	CuO	79,5494	0,05409	0,00054	0,04303	6500	3,515904118
Si	0,0154	28,09	1	2	SiO2	60,0888	0,03285	0,00033	0,01974	3280	1,077455056
	58,743						100		103,036		264523,0294
Exergia química das cinzas (kJ/mol)											2567,298433
Exergia química das cinzas (kJ/kg)											100,1246389

Tabela 3: Cálculo da exergia do singás.

SINGÁS		<b>Planilha de cálculo da exergia</b>					
Ambiente de Referência				SINGÁS			
Pressão		1,013	bar	Pressão		0,99682	bar
Temperatura		25,00	graus	Temperatura		600	graus
Umidade Relativa		60	%	Vazão		0,0042917	kg/s
Composição Volumetrica:							
				CH4		3,7	%
				CO		17,72	%
				H2		9,7	%
<b>Exergia do Gás</b>	<b>Singás</b>	<b>19,131778</b>	<b>KW</b>	NO2		0,027	%
		<b>4457,89</b>	<b>kJ/kg</b>	O2		5,7	%
				N2		56,58	%
		PClsingás=	4344,9 kJ/kg	CO2		6,57	%

<b>Planilha de Cálculo (Tabela 3 - continuação)</b>									
Elementos	Massa molar	Fracao molar		Fracao massica	massa/s	kmol/s	EQP(kJ/kmol)	A	B
CH4	16,042	0,037	0,593554	0,0225405	0,0001583	9,87E-06	836510	4,75	0,012
CO	28,011	0,1772	4,9635492	0,1884932	0,0013241	4,727E-05	275100	1,648	0,04124
H2	2,016	0,097	0,195552	0,0074262	5,217E-05	2,588E-05	236100	-0,966	0,07279
NO2	46,0055	0,000270	0,0124215	0,0004717	3,314E-06	7,203E-08	55600	0,945	0,08873
O2	31,999	0,057	1,823943	0,0692651	0,0004866	1,521E-05	3970	1,618	0,1085
N2	28,016	0,5658	15,852293	0,6019987	0,0042289	0,0001509	720	6,903	-0,000375
CO2	44,01	0,0657	2,891457	0,1098045	0,0007713	1,753E-05	19870	5,316	0,014285
<b>SINGÁS</b>		1,0000	26,33277	1	0,0070247	0,0002668			
Resultado =	19,131778	KW							

<b>Planilha de Cálculo (Tabela 3 - continuação)</b>					
C	D	EQ(kJ/kmol)	EM(kJ/kmol)	ET(kJ/kmol)	E(kJ/kmol)
0,00000303	-2,63E-09	30648,48171	-1,49492905	598,1625326	31245,14931
-0,0000153	1,74E-09	47987,57737	-7,15949803	4877,490014	52857,90789
-0,00003755	7,58E-09	22340,70312	-3,91913831	3851,921003	26188,70498
-0,0000438	8,36E-09	9,512192843	-0,01090894	13,96877092	23,47005482
-0,00005365	1,01E-08	-178,4912058	-2,3029988	3631,736424	3450,942219
0,00000193	-6,861E-10	-391,3620926	-22,8615055	5005,874801	4591,651203
-8,362E-06	1,784E-09	862,030169	-2,65450914	918,5720468	1777,947707
		101278,4513	-40,4034877	18897,72559	120135,7734

Tabela 4: Cálculo da eficiência exergética ambiental ( $\eta_{ex}$ ) e o índice exergético de renovabilidade ( $\lambda_r$ ).

		Sing+Cinz		Com secagem da biomassa			
	kJ/kg	$\eta_{ex}$	$\lambda_r$	$\eta_{ex}$	$\lambda_r$		
Bbiomas	18897,59	0,2408	0,7343	0,6644	1,9891		
Bsingas	4457,89						
Belet	29,184						
Bcinzas	100,12464						
Bcalor	8191,2						
Bsecagem	261,88						
Bdestruída			6177,55919		6248,499		
				Fluxo mas	Energ. kJ/s		Ef. Energ
PClbioma	<b>17162,308</b>	kJ/kg		0,00208333	53,63221313	Ef. Energ. (frio)	0,569098964
PClsingas	<b>4344,9672</b>	kJ/kg		0,00401389	30,5220369		
Calor dissip.	7395,2564	kJ/kg			10,76638762	Ef. Energ. (quente)	0,769843758

## APÊNDICE D

Tabelas com os dados do balanço energético determinados nesse trabalho.

Tabela 5: Cálculo da entalpia de formação do singás

Cp dos componentes	Cálculo da entalpia do singás					
		kJ/kgmol.K			% do comp-i	Entalpia h: kJ/mol
Cp CO =	6,6 + 0,0012T	7,6476	hCO =	-92,93	17,72	-18,2196
Cp CO2 =	10,34 + 0,00274T - 195500/T2	12,4755	hCO2 =	-366,87	6,57	-25,0245
Cp H2 =	6,62 + 0,00081T	7,32713	hH2 =	16,714	9,7	0,7146
CpN2 =	6,50 + 0,00100T	7,373	hN2 =	17,38	46,58	3,4578
Cp O2 =	8,27 + 0,000258T - 187700/T2	8,24895	hO2 =	18,326	5,7	0,4724
Cp H2O =	8,22 + 0,00015T + 0,00000134T2	9,3722	hH2O =	-220,75	10	-16,4026
Cp CH4 =	5,34 + 0,0115T	15,3795	hCH =	-45,33	3,7	-2,1800
Entalpia do gás						-57,1820

BALANÇO ENERGIA			BALANÇO DE ENERGIA		
Biomassa			mb.hb + ma.ha = mg.hg + mci.hcin + Qma		
PCI biomassa	17162,3	kJ/kg			
Vazão Biomassa	7,5	kg/h	hcinzas	78,83	
Umidade	20	%	hgas	2754,566	
Ar			PCI biom.	17,1623	
Vazão Ar	8,925	kg/h	hf CO2	-8946,6	
Vazão Ar	17,85	Nm3/h	hf H2O	-15879,4	
A/Biom			hf SO2	-4638	
T oC	30		hb	-8350,3141	
GAS			har (30oC)	83,6748	kJ/kg
Composição do gás %Volume (base úmida)			Qma	29,204596	kW
H2	9,7		y frio	2,095	
CO	17,72		y quente	2,14	
CO2	6,67		<b>Eficiência. (Frio)</b>	<b>0,56224</b>	
CH4	3,7		<b>Eficiência. (Quente)</b>	<b>0,7415275</b>	
O2	5,7				
N2	46,31		A/C	1,18:1	
H2O	7,06		Gás em base seca	%	Constante
			CO2	6,67	
MM gás	24,034	g/mol	H2	9,7	0,108
Vazão gás	15,45	kg/h	O2	5,7	
Vazão gás	30,9	Nm3/h	N2	46,31	
PCI	4,6049	MJ/Nm3	CH4	3,7	0,358
			CO	17,72	0,126
Alcatrão	0	g/Nm3			
Cinzas	0,975	kg/h			
Cinzas	13,0%	kg/h			
T oC	600		<b>PCI gás (MJ/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>4,60492</b>	
$PCI_g = 0,126.\%CO + 0,358.\%CH_4 + 0,108.\%H_2 \text{ MJ/Nm}^3$					

## APÊNCICE E

Tabelas com os dados do balanço energético determinado por RODRIGUEZ (2007).

Balanço de Energia (RODRIGUEZ,2007)			Balanço de Energia (RODRIGUEZ, 2007)		
Biomassa			mb.hb + ma.ha = mg.hg + mci.hcin + Qma		
PCI Biom	16500	kJ/kg			
Vazão Biom	100	kg/h	hcinzas	788,83	
Umidade	12,1	%	hgas	-3183,04	
Ar			PCI	16500	
Vazão Ar	155,19	kg/h	hf CO2	-8946,6	
Vazão Ar	120	Nm3/h	hf H2O	-15879,4	
A/Biom	0,25 a 0,4		hf SO2	-4638	
T oC	250		hfb	-6959,59	
GAS			hb(12,10)%umid	-8038,89	kJ/kg
Composição do gás %Volume base úmida			har (250oC)	225,7	kJ/kg
H2	17,9		Qma	32,6	kW
CO	13,4		y frio	2	
CO2	13,4		y quente	2,1455	
CH4	3,6		<b>Eficiência (Frio)</b>	<b>0,626667</b>	
O2	0,9		<b>Eficiência (Quente)</b>	<b>0,849522</b>	
N2	40,2				
H2O	10,6		Componente ( base seca)	%	constante
			CO2	13	
MM gás	24,034	g/mol	C2H4	0,19	0,59
Vazão gás	214,55	kg/h	C2H6	0,15	0,637
Vazão gás	200	Nm3/h	C2H2	0,01	
PCI	5,17	MJ/Nm3	H2	16	0,108
			O2	0,6	
Alcatrão	3	g/Nm3	N2	48	
Cinzas	40	kg/h	CH4	2	0,358
Cinzas	2,70%	kg/h	CO	20	0,126
T °C	600		PCI gás (MJ/Nm3)		5,17165
$PCI_g = 0,126.\%CO + 0,358.\%CH_4 + 0,108.\%H_2 + 0,59.\%C_2H_4 + 0,637.\%C_2H_6 \text{ MJNm}^3$					