

**ITALO TADEU MACHADO FERREIRA**



**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOMASSA  
RESIDUAL DE FÁBRICA DE PAPEL-CARTÃO**

**MESTRADO EM  
BIOENERGIA**

**GUARAPUAVA - PR**

**2015**

**ITALO TADEU MACHADO FERREIRA**

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOMASSA RESIDUAL DE FÁBRICA DE  
PAPEL-CARTÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, área de concentração em Biocombustíveis, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Waldir Nagel Schirmer

Orientador

Profa. Dra. Gilmara de Oliveira Machado

Coorientadora

GUARAPUAVA-PR

2015

Catálogo na Publicação  
Biblioteca Central da Unicentro, Campus Cedeteg

F383a

Ferreira, Italo Tadeu Machado

Aproveitamento energético de biomassa residual de fábrica de papel-cartão / Italo Tadeu Machado Ferreira. -- Guarapuava, 2015  
xvii, 82 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, área de concentração em Biocombustíveis, 2015

Orientador: Waldir Naguel Schirmer

Co-orientadora: Gilmara de Oliveira Machado

Banca examinadora: Yara de Souza Tadano, Paulo Rogério Pinto Rodrigues, Waldir Naguel Schirmer

Bibliografia

1. Biogás. 2. Energia renovável. 3. Etanol. 4. Sustentabilidade. I. Título.  
II. Programa de Pós-Graduação em Bioenergia.

CDD 660

**ITALO TADEU MACHADO FERREIRA**

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOMASSA RESIDUAL DE FÁBRICA DE  
PAPEL-CARTÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, área de concentração em Biocombustíveis, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 21 de agosto de 2015

Profª. Dra. Yara de Souza Tadano - UTFPR - Ponta Grossa

Prof. Dr. Paulo Rogério Pinto Rodrigues – UNICENTRO

Prof. Dr. Waldir Nagel Schirmer – UNICENTRO

Orientador

GUARAPUAVA-PR

2015

**A minha esposa Rosani,  
aos filhos Alexandre, Guilherme e Saulo,  
dedico.**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, por tudo que tem me proporcionado na vida.

Ao meu orientador Professor<sup>o</sup> Dr. Waldir Nagel Schirmer, pela paciência, pela contribuição para meu desenvolvimento acadêmico, pelo acompanhamento e prontidão sempre que necessário, por ter acreditado no desenvolvimento deste trabalho, muito obrigado!

A minha coorientadora Profa. Dra. Gilmara de Oliveira Machado, pela paciência, pela motivação, pelos ensinamentos na área de energia térmica, pela grande contribuição no desenvolvimento deste trabalho, muito obrigado!

A minha família, Rosani, Alexandre, Guilherme e Saulo, pelo apoio nos momentos difíceis e compreensão nos momentos de ausência.

Aos meus pais, pela contribuição para minha formação pessoal e profissional.

A Matheus Gueri, pela dedicação e suporte nas análises realizadas no laboratório Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais da UNICENTRO, Campus de Irati.

A Guilherme Turcatel Alves, pela contribuição com análises realizadas na Central de Análises do Departamento de Química da UTFPR, Campus de Pato Branco.

A Tiago Sawczen e Guilherme Pozzobom Pavanello, pela análises realizadas no Laboratório de AMBIOTEC da Unicentro.

Ao Prof. Dr. Paulo Rogério Pinto Rodrigues, pela sua visão inovadora e empreendedora e no apoio sempre que foi necessário.

A toda Diretoria da Ibema – Cia Brasileira de Papel Ltda, fábrica de papel-cartão localizada em Turvo, PR, que na sua visão inovadora, deu todo suporte e apoio para a viabilização deste trabalho.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	I
LISTA DE TABELAS .....	II
LISTA DE QUADROS.....	III
LISTA DE EQUAÇÕES .....	IV
LISTA DE REAÇÕES .....	VI
LISTA DE ABREVIATURAS E UNIDADES .....	VII
RESUMO .....	IX
ABSTRACT .....	X
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
3.1. BIOCOMBUSTÍVEIS .....	4
3.1.1. Biodiesel .....	5
3.1.2. Biogás.....	6
3.1.3. Bioetanol.....	7
3.2. BIOMASSA.....	8
3.2.1. Resíduos Florestais.....	8
3.2.2. Resíduos Agroindustriais.....	10
3.2.3. Subprodutos de Origem Animal.....	11
3.2.4. Resíduos Sólidos Urbanos e Aterros .....	12
3.2.5. Resíduos da Indústria de Papel e Celulose.....	14
3.3. APROVEITAMENTO DE ENERGIA DE BIOMASSA .....	17
3.3.1. Gaseificação .....	19
3.3.2. Pirólise .....	23
3.3.3. Carbonização ou Torrefação.....	24
3.3.4. Liquefação .....	25
3.3.5. Biodigestão.....	25
3.3.6. Secagem e Combustão Direta.....	27
3.3.7. Cogeração .....	28
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
4.1. O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PAPEL-CARTÃO .....	30
4.2. BIOMASSA E RESÍDUOS CELULÓSICOS GERADOS NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PAPEL-CARTÃO ...	35
4.2.1. Caracterização das amostras por análise imediata .....	38
- Determinação do teor de umidade em base seca para cálculos da análise imediata.....	38
- Determinação do teor de voláteis, cinzas e carbono fixo .....	39
4.2.2. Estimativa do poder calorífico a partir da análise imediata.....	40
4.2.3. Caracterização das amostras por análise elementar .....	41
4.2.4. Estimativa do poder calorífico superior (PCS) das amostras a partir da análise elementar.....	42

4.3.	ELABORAÇÃO DO BALANÇO DE MASSA E TÉRMICO DA CALDEIRA .....	43
4.3.1.	<i>Cálculo do PCI, PCU e da quantidade de energia liberada na combustão (Q), de cada componente combustível introduzido na caldeira.....</i>	44
4.3.2.	<i>Cálculo da energia calorífica para evaporar água para secagem dos resíduos.....</i>	48
4.3.3.	<i>Cálculo do consumo de combustível, em função da geração de vapor e do rendimento da caldeira</i>	49
4.3.4.	<i>Cálculo do consumo de combustível com a queima de combustíveis normalmente utilizados.....</i>	50
4.3.5.	<i>Cálculo do consumo de combustível com a queima de combustíveis após secagem.....</i>	51
4.4.	ALTERNATIVAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUO CELULÓSICO DE FÁBRICA DE PAPEL-CARTÃO	52
4.4.1.	<i>Cálculo do retorno do investimento para instalação de secador de biomassa.....</i>	52
4.4.2.	<i>Viabilidade de cobertura da área de estocagem de cavacos e cascas de madeira para evitar redução do poder calorífico pela absorção de umidade devido às chuvas .....</i>	53
4.4.3.	<i>Geração de biogás pela fermentação de resíduo celulósico em mistura com glicerina.....</i>	53
4.4.4.	<i>Geração de etanol pela fermentação de resíduo celulósico em mistura com glicerina. ....</i>	54
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>55</b>
5.1.	RESULTADOS DA ANÁLISE IMEDIATA .....	55
5.2.	RESULTADOS DA ANÁLISE ELEMENTAR.....	56
5.3.	RESULTADOS DA ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO POR CORRELAÇÃO DA ANÁLISE IMEDIATA E ANÁLISE ELEMENTAR .....	58
5.4.	ELABORAÇÃO DO BALANÇO DE MASSA E TÉRMICO DA CALDEIRA .....	58
5.4.1.	<i>Cálculo do PCI, PCU e da quantidade de energia liberada na combustão (Q), de cada componente combustível introduzido na caldeira.....</i>	59
5.4.2.	<i>Cálculo do consumo de combustível, em função da geração de vapor e do rendimento da caldeira</i>	61
5.5.	ALTERNATIVAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUO CELULÓSICO DE FÁBRICA DE PAPEL-CARTÃO	63
5.5.1.	<i>Secagem de resíduos em secador de leito fluidizado.....</i>	63
5.5.2.	<i>Viabilidade de cobertura da área de estocagem de cavacos e cascas de madeira para evitar redução do poder calorífico pela absorção de umidade devido às chuvas .....</i>	65
5.5.3.	<i>Geração de biogás pela fermentação de resíduo celulósico em mistura com glicerina.....</i>	67
5.5.4.	<i>Geração de etanol pela fermentação de resíduo celulósico em mistura com glicerina .....</i>	69
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>71</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>73</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>82</b>



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Tecnologias de conversão de biomassa em fontes de energia secundária (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008). .....	18
<b>Figura 2</b> – Principais processos de conversão termo-química de biomassa, produtos intermediários e produtos finais (McKENDRY, 2002). .....	19
<b>Figura 3</b> – Fabricação de papel-cartão e origem dos resíduos do estudo. ....	30
<b>Figura 4</b> – Consumo de energia para fabricação de papel-cartão. ....	34
<b>Figura 5</b> - Fluxograma simplificado da fabricação de papel-cartão indicando a origem dos materiais do estudo. ....	36
<b>Figura 6</b> – Combustíveis utilizados na produção de vapor e resíduos gerados no processo de fabricação de papel-cartão. ....	37
<b>Figura 7</b> – Combustíveis atualmente introduzidos na caldeira na base úmida: cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas de madeira (C) e fibras e fiapos (D). ....	44
<b>Figura 8</b> – Introdução de fibras e fiapos (D) e de lodo da ETE (E) após secagem, para combustão em mistura com cavacos (A), cavacos de terceiros (B) e cascas de madeira(C). ....	47
<b>Figura 9</b> – Secagem dos resíduos com aproveitamento dos gases da chaminé, para queima em mistura com combustíveis normalmente utilizados. ....	49
<b>Figura 10</b> - Análise imediata de cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas de madeira (C), fibras e fiapos (D), lodo da ETE (E), cinzas (F) e cinzas peneiradas (G). ....	55
<b>Figura 11</b> - Secador de biomassa do tipo leito fluidizado (ALBRECHT, 2014). ....	64
<b>Figura 12</b> – Variação do teor de umidade médio mensal de cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B) e cascas de madeira, estocados à céu aberto. ....	66

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Quantidade de rejeitos necessários para produção de 1m <sup>3</sup> de biogás.....	12
<b>Tabela 2</b> - Análise elementar dos materiais na base combustível.....	56
<b>Tabela 3</b> - Análise elementar dos materiais convertidos para base seca, com teores de cinzas obtidos da análise imediata.....	57
<b>Tabela 4</b> - Comparação do poder calorífico superior (PCS), estimados a partir dos resultados de análise imediata e análise elementar.....	58
<b>Tabela 5</b> – Cálculo do PCI, PCU e energia liberada na combustão (Qi) de cada combustível considerado no estudo, a partir de consumos e umidades médias mensais.....	59
<b>Tabela 6</b> - Cálculo do PCI, PCU e energia liberada na combustão com a queima de fibras e fiapos e de lodo da ETE secos a 20% de umidade, em mistura com os combustíveis normalmente utilizados a partir dos consumos e umidades médias mensais.....	60
<b>Tabela 7</b> – Cálculo da energia líquida utilizada na geração de vapor, energia perdida na chaminé e percentual de energia perdida pela chaminé, a ser utilizada para secar fibras e fiapos (D) e lodo da ETE (E) à 20% de umidade.....	61
<b>Tabela 8</b> – Cálculo da quantidade de combustível para produzir 20,7 t/h de vapor a partir do PCU1 médio de cavacos próprios, cavacos de terceiros, cascas e fibras e fiapos.....	62
<b>Tabela 9</b> – Cálculo do PCU <sub>2</sub> médio e da quantidade de combustível para produzir 20,7 t/h de vapor, com a introdução de fibras e fiapos e lodo da ETE a 20% de umidade na mistura de combustível.....	62
<b>Tabela 11</b> – Redução de custo com menor consumo de cavacos, pelo aproveitamento de resíduo celulósico seco (fibras e fiapos e lodo da ETE) em secador de leito fluidizado.....	65
<b>Tabela 12</b> – Redução de custo com menor consumo de cavacos com instalação de galpão coberto para evitar aumento de umidade da biomassa com as chuvas.....	67
<b>Tabela 13</b> – Redução de custo com cavacos, pela utilização de biogás na combustão da caldeira de biomassa, gerado a partir de fermentação de lodo da ETE, glicerina e <i>Escherichia coli</i> .....	68
<b>Tabela 14</b> – Retorno do investimento em microdestilaria para produção de 650 L/d de etanol a partir de fermentação de resíduo celulósico com glicerina e <i>Escherichia coli</i> .....	70

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Resíduos de biomassa gerados na indústria de papel e celulose. ....	15
<b>Quadro 2</b> - Classificação de secadores de biomassa. ....	28
<b>Quadro 3</b> - Modelo de cálculo do retorno de investimento, como exemplo a instalação de secador de biomassa. ....	52

## LISTA DE EQUAÇÕES

<b>Equação 1</b> – Cálculo do teor de umidade do combustível.....	38
<b>Equação 2</b> – Cálculo do teor de voláteis do combustível .....	39
<b>Equação 3</b> – Cálculo do teor de cinzas do combustível.....	39
<b>Equação 4</b> – Determinação do carbono fixo do combustível .....	39
<b>Equação 5</b> – Estimativa do poder calorífico superior (PCS) em função da análise imediata .....	40
<b>Equação 6</b> – Cálculo do poder calorífico inferior (PCI) a partir do PCS e do teor de Hidrogênio .....	40
<b>Equação 7</b> – Cálculo do poder calorífico útil (PCU) a partir do PCI e teor de umidade .....	40
<b>Equação 8</b> – Composição do combustível sólido, na base úmida, em função da análise elementar .....	41
<b>Equação 9</b> – Composição do combustível na base seca .....	41
<b>Equação 10</b> – Composição do combustível na base combustível.....	42
<b>Equação 11</b> – Conversão de combustível de base combustível para base seca .....	42
<b>Equação 12</b> - Estimativa do poder calorífico superior (PCS) em função da composição elementar .....	42
<b>Equação 13</b> – Cálculo da energia liberada pelo combustível durante a combustão .....	45
<b>Equação 14</b> - Energia liberada pelos combustíveis normalmente inseridos na caldeira.....	45
<b>Equação 15</b> – Quantidade de energia removida com as cinzas .....	45
<b>Equação 16</b> – Quantidade de calor líquida para geração de vapor .....	45
<b>Equação 17</b> – Quantidade de energia perdida para atmosfera pela chaminé da caldeira .....	46
<b>Equação 18</b> - Quantidade de energia liberada com a introdução de resíduos secos .....	47
<b>Equação 19</b> – Quantidade de energia disponível com a queima de resíduos secos .....	47
<b>Equação 20</b> – Aumento percentual de energia liberada com a combustão de resíduos secos .....	48
<b>Equação 21</b> – Quantidade de água a ser evaporada na secagem dos resíduos.....	48
<b>Equação 22</b> – Quantidade de calor necessária para secar os resíduos .....	48
<b>Equação 23</b> – Percentual de energia liberada na chaminé para secar os resíduos .....	48
<b>Equação 24</b> – Cálculo do consumo de combustível sólido na geração de vapor pela caldeira.....	50
<b>Equação 25</b> – Cálculo do PCU1 médio dos combustíveis normalmente utilizados na caldeira .....	50

<b>Equação 26</b> – Cálculo do PCU2 médio dos combustíveis com a introdução dos resíduos secos .....	51
<b>Equação 27</b> – Quantidade de combustível reduzido com a introdução de resíduos secos.....	51
<b>Equação 28</b> – Redução percentual do consumo de cavacos com a queima dos resíduos secos.....	51

## LISTA DE REAÇÕES

<b>Reação 1</b> – Volatilização (pirólise) da biomassa.....	20
<b>Reação 2</b> – Craqueamento da biomassa e reforma do alcatrão.....	20
<b>Reação 3</b> – Reações homogêneas gás-sólido: formação do monóxido de carbono (CO).....	20
<b>Reação 4</b> - Reações homogêneas gás-sólido: formação do monóxido de carbono (CO <sub>2</sub> ).....	20
<b>Reação 5</b> – Reação de Boudard.....	20
<b>Reação 6</b> – Reação de gás-água.....	20
<b>Reação 7</b> – Formação do metano (CH <sub>4</sub> ).....	21
<b>Reação 8</b> – Reações homogêneas na fase gasosa: formação do CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> .....	21
<b>Reação 9</b> - Reações homogêneas na fase gasosa: formação do CO + H <sub>2</sub> .....	21

## LISTA DE ABREVIATURAS E UNIDADES

ETE – estação de tratamento de efluentes

GNV – gás natural veicular

BX – percentual de biodiesel na mistura com diesel mineral

tep – toneladas-equivalentes de petróleo

MDF – “*Medium density fiberboard*”

Nm<sup>3</sup> - Normal-metro cúbico

Gg – Gigagrama

MW – Megawatt

m<sup>3</sup>/h – vazão em metro cúbico por hora

m<sup>3</sup>/d – vazão em metro cúbico por dia

kWh – quilowatt-hora

kg/m<sup>3</sup> - densidade em quilograma por metro cúbico

“*smelt*” – leito de inorgânicos fundidos resultante da queima de licor negro na caldeira de recuperação química

“*producer gas*” – mistura de gases gerados na gaseificação de combustíveis sólidos

“*syngas*” – mistura de gases CO + H<sub>2</sub> gerados no processo de gaseificação

MJ/m<sup>3</sup> - poder calorífico em Megajoules por metro cúbico

kPa – pressão em kilopascal

kW – energia em quilowatt

MPa – pressão em Megapascal

“*flash-drier*” – secador de biomassa do tipo cascata

PTA – Preparação de tintas e aditivos

kgf/cm<sup>2</sup> - pressão em quilograma-força por centímetro quadrado

mmca – pressão em milímetro de coluna de água

GLP – gás liquefeito de petróleo

t/h – vazão mássica em toneladas por hora

%V – teor de voláteis

%A – teor de cinzas

%CF – teor de carbono fixo

%H – teor de Hidrogênio

%N – teor de Nitrogênio

%S – teor de Enxofre  
%C – teor de Carbono  
%O – teor de Oxigênio  
%U – teor de umidade  
mi – massa inicial da amostra  
ms – massa da amostra seca  
ma – massa da amostra  
PCS – poder calorífico superior  
PCI – poder calorífico inferior  
PCU – poder calorífico útil  
Cs – teor (%) de Carbono na base seca  
Cc – teor (%) de Carbono na base combustível  
Qi – quantidade de calor liberado na combustão pelo combustível i  
Mi – massa do combustível  
Qv – quantidade de energia calorífica para geração de vapor  
M4 – massa de água a ser evaporada na secagem dos resíduos celulósicos  
Qc – quantidade de combustível  
Qv – quantidade de vapor  
PCU1 – poder calorífico da composição média dos combustíveis normalmente utilizados na caldeira  
PCU2 – poder calorífico da composição média dos combustíveis após mistura dos resíduos secos  
%Qc – percentual de calor utilizado na secagem  
MEV – microscopia eletrônica de varredura  
% m/m – percentual em massa sobre massa  
kcal/kg – quilocaloria por quilograma  
MJ/kg – Megajoules por quilograma  
kg/d – quilogramas por dia  
ST – sólidos totais  
SV – sólidos voláteis  
% v/v – percentual de volume sobre volume  
kg SV/d – quilograma de sólidos voláteis por dia



## RESUMO

FERREIRA, Italo Tadeu Machado. **Aproveitamento Energético de Biomassa Residual de Fábrica de Papel-cartão**. 2015. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Estadual do Centro Oeste, UNICENTRO. Guarapuava - PR. 2015.

Um dos grandes problemas da indústria de papel e celulose é a disposição de resíduos sólidos em aterros industriais, devido à escassez de áreas disponíveis para esta finalidade e ao impacto ambiental gerado. Da mesma forma, busca-se aumentar a sustentabilidade dos processos fabris com maior utilização de insumos energéticos renováveis, tais como biomassa celulósica. Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de aproveitamento energético de resíduos celulósicos de fábrica de papel-cartão (fibras residuais da estação de tratamento de efluentes – lodo da ETE, fibras e fiapos de fabricação de pasta mecânica de madeira) na combustão em mistura com cavacos e cascas de madeira, convencionalmente utilizados na geração de vapor. O poder calorífico dos combustíveis; cavacos e cascas de madeira e dos resíduos; fibras e fiapos de madeira, lodo da ETE e cinzas de caldeira foi estimado por correlação com base nas análises imediata e elementar desses materiais para elaborar o balanço energético da caldeira. O balanço indicou que a quantidade de energia liberada nos gases de exaustão da chaminé da caldeira é suficiente para secar o lodo da ETE, reduzindo sua umidade inicial de 55% para 20% e para secar fibras e fiapos de madeira, reduzindo sua umidade de 80% para 20%. A secagem desses resíduos, em secador de biomassa, permite aumentar o poder calorífico do lodo da ETE em 55% e das fibras e fiapos em 88%, possibilitando a queima em mistura com a biomassa (cavacos e cascas de madeira) atualmente utilizada na caldeira da fábrica. O balanço com a introdução dos resíduos secos; 1,5% de fibras e fiapos, 6,5% de lodo da ETE, para combustão em mistura com 89,8% de cavacos e 2,4% de cascas de madeira, indicou que é possível a redução de 411 toneladas por mês no consumo de cavacos e cascas. Foi analisado o custo-benefício de alternativas técnicas disponíveis, a fim de comparar a viabilidade econômica de cada possibilidade. O estudo indicou, portanto, que há alternativas de melhor aproveitamento energético dos resíduos celulósicos da fábrica de papel-cartão.

**Palavras-chave:** biogás, energia renovável, etanol, sustentabilidade.

## ABSTRACT

FERREIRA, Italo Tadeu Machado. **Energetic Utilization of Residual Biomass from Paperboard Mill**. 2015. Dissertation (Master in Bioenergy) – Universidade Estadual do Centro Oeste, UNICENTRO. Guarapuava - PR. 2015.

One of the biggest problems of the pulp and paper industry is the disposal of solid waste in landfills, since available areas are increasingly scarce, besides the environmental impact with the disposal. On the other hand, the aim is to increase the sustainability of manufacturing processes with increased use of renewable energy inputs, like cellulosic biomass. The goal of this study is to evaluate the energy production potential of cellulosic residues from paperboard mill (fiber sludge from wastewater treatment plant - WWTP, fibers and lint from the production of mechanical wood pulp), in the combustion mixture with wood chips and barks, conventionally used in steam generation. The calorific value of the conventional fuel; wood chips and barks and the cellulosic residues; fibers and wood lint, WWTP sludge and boiler ash were estimated by correlation based on immediate and elemental analyzes of these materials, in order to perform the mass and heat balance of the boiler. The assessment indicated that the amount of energy released in the boiler chimney exhaust gases is sufficient to dry the WWTP sludge, reducing its initial moisture content of 55% to 20% and to dry wood fibers and lint, reducing its moisture 80% to 20%. The drying of the residues in the biomass dryer, can increase the calorific value of WWTP sludge by 55% and increase fiber and lint net heat value by 88%, making possible to burn the dried residues mixed with biomass (wood chips and bark) currently used in the mill boiler. The balance with the introduction of dried residues; 1.5% of fibers and lint and 6.5% of WWTP sludge, in combustion mixed with 89.8% of wood chips and 2.4% of wood bark, indicated that it is possible to reduce 411 tons of wood chips and bark per month. A cost-benefit assessment of available technical alternatives was done, in order to compare the economic feasibility of each possibility. The study indicated that there are alternatives for energy utilization of cellulosic residues from the paperboard mill.

**Keywords:** biogas, renewable energy, ethanol, sustainability.

# 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a principal fonte de energia provém de combustíveis fósseis, mais especificamente da combustão de derivados do petróleo e apenas uma pequena parte da energia consumida é de fontes renováveis.

Como fonte de energia renovável destaca-se a biomassa, formada de plantas e animais que, ao contrário das fontes de energias não renováveis, cresce e se reproduz, daí a energia originada de biomassa ser chamada de energia renovável. As fontes de biomassa abrangem um amplo espectro, desde pequenas gramíneas até grandes árvores, de pequenos insetos a restos de grandes animais. Os principais tipos de biomassa são: biomassa celulósica, amido de cereais e açúcar de cereais e da cana-de-açúcar (BASU, 2010, p.05).

Os resíduos são definidos como qualquer material descartado de atividades produtivas, com potencial de impacto ambiental (VALE; GENTIL, 2008, apud RAMOS E PAULA; TRUGUILHO; NAPOLI, 2011).

Uma das formas de aproveitamento energético de resíduos florestais da fabricação de papel e celulose é na combustão para produção de vapor para aquecimento e geração de energia elétrica (GAVRILESCU, 2008, p. 01). Então, os resíduos florestais como pontas e galhos de árvores, cascas de madeira, costaneiras e serragem de serrarias, que antes causavam impacto ambiental com a disposição no solo, hoje podem ser aproveitados para gerar vapor na combustão em caldeira e energia elétrica através de cogeração.

A utilização de biomassa pela combustão é dependente da umidade do combustível. A redução de umidade da biomassa é indicada para aumentar a eficiência dos processos de combustão (ROOS, 2008).

A fábrica de papel-cartão objeto desta pesquisa gera resíduos como lodo da estação de tratamento de efluentes (ETE), fibras e fiapos da fabricação de pasta mecânica de madeira, cinzas da combustão de cavacos e cascas na caldeira, que acarretam em custos para tratamento e disposição dos resíduos em aterro industrial.

A biomassa utilizada como combustível (cavacos e cascas de pinus) na caldeira da fábrica de papel-cartão é estocada a céu aberto, passível de variação de umidade devido às chuvas e, portanto, variação do seu poder calorífico.

A realização do presente trabalho surgiu da necessidade de avaliar o potencial de reaproveitamento energético de biomassa residual celulósica de fábrica de papel-cartão para

combustão em mistura com a biomassa (cavacos e cascas de madeira) já utilizada na caldeira da fábrica indicando assim, alternativas para redução do consumo de cavacos e cascas. O aproveitamento energético de biomassa celulósica residual de fábrica de papel-cartão pode ser uma alternativa para reduzir o impacto ambiental, evitando-se a disposição de resíduos em aterros industriais, bem como redução de custo com manuseio e transporte de resíduos.

No Capítulo 2 são apresentados os objetivos do presente trabalho.

No Capítulo 3 é apresentada a revisão da literatura, abordando os principais tipos de biocombustíveis, as fontes de biomassa residuais e as principais formas de conversão térmica de biomassa para geração de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos e a biodigestão, para geração de biogás a partir de biomassa.

No Capítulo 4 são apresentados os materiais e métodos utilizados neste estudo, com descrição simplificada do processo de fabricação do papel-cartão, os resíduos gerados em cada etapa, as metodologias analíticas para estimação do poder calorífico dos materiais e para elaboração do balanço de massa e térmico da caldeira de biomassa. A metodologia é complementada com apresentação de alternativas de aproveitamento energético de resíduos celulósicos de fabricação de papel-cartão.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados e discussão das análises laboratoriais, os resultados da estimativa do poder calorífico e elaboração do balanço de massa e térmico da caldeira, para análise de viabilidade de aproveitamento energético dos resíduos celulósicos.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões a partir dos resultados obtidos.

No Capítulo 7 são apresentadas as referências do estudo.

Nos anexos são apresentadas as tabelas de cálculos completas do balanço na caldeira de biomassa.

## **2. OBJETIVOS**

### Objetivo Geral

Avaliar o potencial de aproveitamento energético de resíduos celulósicos de indústria de papel-cartão, como combustível em mistura com cavacos e cascas, convencionalmente utilizados na caldeira industrial.

### Objetivos Específicos

1. Por meio da composição elementar e imediata, teor de umidade e poder calorífico, caracterizar os combustíveis utilizados na caldeira de biomassa (cavacos e cascas de madeira) e os resíduos celulósicos da fábrica de papel-cartão (fibras e fiapos de madeira, lodo de efluente e cinzas da caldeira);
2. Elaborar o balanço energético da caldeira a partir dos combustíveis normalmente utilizados (cavacos e cascas de madeira) e comparar com o balanço após a introdução dos resíduos secos com 20% de umidade (lodo de efluente e fibras e fiapos de madeira), para quantificar a energia disponível para secagem dos resíduos;
3. Avaliar técnica e economicamente, alternativas de aproveitamento dos resíduos celulósicos para geração de energia e redução do consumo de biomassa, normalmente utilizada (cavacos e cascas de madeira).

### **3. REVISÃO DA LITERATURA**

A principal fonte de energia consumida mundialmente provém de combustíveis fósseis, da combustão de derivados do petróleo e apenas uma pequena parte da energia consumida provém de fontes renováveis. As fontes de energia são classificadas em fontes de energia primárias e secundárias. As fontes primárias, de energia não renováveis, são derivadas de combustíveis fósseis como: hulha, petróleo, gás natural, carvão mineral e derivados de combustível nuclear. As fontes primárias, de energia renováveis são: energia hidráulica, luz solar, ondas do mar, energia eólica, geotérmicas e biomassa. As fontes secundárias, de energia não renováveis são: coque, derivados de petróleo, gás natural veicular (GNV). São exemplos de fontes de energia secundárias, renováveis: o biogás e o gás de pirólise (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008).

O Brasil possui uma matriz energética diversificada. Em 2014, a participação de energias renováveis manteve-se entre as mais elevadas do mundo, com 39,4%, valor 66% maior que o valor médio mundial. Na repartição da oferta interna de energia por fonte, os combustíveis renováveis compreendem 15,7% de biomassa proveniente da cana-de-açúcar, 11,5% de energia hidráulica, 8,1% de lenha e carvão vegetal e 4,1% de lixo e outros renováveis (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2015a).

Dentre as fontes primárias renováveis destaca-se a biomassa, utilizada na combustão direta para geração de vapor e energia elétrica por cogeração, ou como matéria-prima na geração de energia renovável secundária; na produção de biogás e gás de pirólise.

#### **3.1. Biocombustíveis**

O biocombustível, definido como combustível derivado de fonte biológica é uma das fontes de energia mais importantes, por ser renovável, pelo menor impacto ambiental gerado na sua utilização e pela capacidade de redução de gases do efeito estufa, principalmente o gás carbônico (DRAPCHO; NHUAN; WALKER, 2008).

Os biocombustíveis de primeira geração são derivados de carboidratos, destacando-se o bioetanol, produzido a partir da cana-de-açúcar e de cereais amiláceos e, o biodiesel, produzido a partir de óleos vegetais. Os combustíveis de segunda geração são derivados de biomassa lignocelulósica, incluindo madeira, galhos e gramíneas (GUPTA, DEMIRBAS,

2010).

### *3.1.1. Biodiesel*

O consumo de combustível destinado às atividades de transporte de passageiros e mercadorias corresponde a um terço de toda a energia consumida no mundo e este consumo ocorre na forma líquida, como gasolina, querosene e diesel. Ainda, segundo Angarita et al. (2012), devido ao consumo excessivo dos combustíveis fósseis, a utilização dos biocombustíveis torna-se mais atrativa a cada dia e apresentam facilidade de integração logística (ANGARITA et al., 2012).

O biodiesel é um combustível biodegradável, produzido a partir de fontes renováveis de gordura animal ou óleo vegetal, podendo ser utilizado em qualquer proporção em motores diesel sem grandes modificações no motor. Adota-se a nomenclatura BX para indicar o percentual de biodiesel na mistura com o diesel mineral. Assim, B05 significa 5% de biodiesel no diesel mineral, B10 significa 10% de biodiesel no diesel mineral e assim por diante (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, 2014a).

Embora seja possível a utilização de até 100% de óleo vegetal em substituição ao diesel, esta prática não é recomendável, uma vez que a durabilidade dos motores é reduzida. (HARDWOOD, 1984).

O principal método de produção do biodiesel é por reação de transesterificação, onde triglicerídeos de gordura animal ou óleo vegetal reagem com álcool metílico ou etílico, em presença de catalisador ácido ou alcalino, para formar ésteres de ácidos graxos e glicerina (MA; HANNA, 1999, p. 01). Os óleos vegetais também podem ser utilizados diretamente nos motores de combustão, substituindo totalmente o óleo diesel (PRYDE, 1983).

O Brasil apresenta vantagens competitivas para a produção de óleos vegetais devido a sua característica tropical e incentivos do governo para fixação de produtores rurais no campo. As variedades de oleaginosas com maior potencial de cultivo são soja, algodão, amendoim, girassol, canola, mamona, palma, gergelim e linhaça (ANGARITA, 2012, p. 199).

De 1990 a 2004, a produção mundial de biodiesel atingiu 2,5 bilhões de litros. No entanto, de 2005 a 2011, a produção de biodiesel aumentou de 3,58 bilhões para 20,35 bilhões (EARTH POLICY INSTITUTE, 2012).

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de biodiesel, em 2013 a produção brasileira foi de 2.917.488 m<sup>3</sup>, ou 2.310.651 toneladas equivalentes de petróleo – tep

(MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2015b).

O aumento da produção mundial de biodiesel para transporte nos últimos anos ocorreu pela implantação de políticas de apoio à produção e consumo de biocombustíveis pelos países da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico - OCDE (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2008).

### 3.1.2. *Biogás*

O biogás é produzido a partir de matéria orgânica pelo processo anaeróbico, composto principalmente por 55 a 70% de metano ( $\text{CH}_4$ ) e 30 a 45% de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ). É uma das fontes de energia mais antigas da humanidade, tem origem na fermentação microbológica de matéria orgânica animal ou vegetal e contém outros gases como contaminantes (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008). A digestão anaeróbica da matéria-orgânica apresenta como vantagens, menor volume de lodo biológico gerado, requer menos espaço do que aterro sanitário reduz emissão de  $\text{CO}_2$  e metano pela não disposição direta no solo. Como desvantagens, há formação de gás sulfídrico, que é corrosivo e tóxico, necessitando de filtração do biogás (INSTITUTO DE TECNOLOGIA DO PARANÁ, 2002).

O biogás é uma opção importante para tratamento de resíduos, uma vez que são coletados e utilizados, evitando-se emissão de gases para a atmosfera pela decomposição natural de resíduos (SALOMON et al., 2012).

A produção do biogás é composta por quatro etapas principais; na hidrólise (etapa 1), ocorre a quebra de moléculas orgânicas complexas em moléculas menores para melhorar a assimilação pelos micro-organismos, cujo processo pode ser facilitado através de pré-tratamento mecânico, térmico ou químico do resíduo. Na acidogênese (etapa 2), os açúcares, aminoácidos e ácidos graxos são convertidos em ácidos graxos voláteis, ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e gás hidrogênio ( $\text{H}_2$ ). Na acetogênese (etapa 3), os ácidos graxos voláteis são convertidos em ácido acético,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$  e na metanogênese (etapa 4), o ácido acético reage com o  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$  para formar o metano ( $\text{CH}_4$ ) e  $\text{CO}_2$ . Os resíduos vegetais com teor de sólidos totais de 5 a 20% apresentam teor de voláteis de 76 a 90%, com potencial de produção de 0,3 a 0,4  $\text{m}^3$  de biogás/kg de sólidos voláteis (ZUPANCIC; GRILIC, 2012, p. 05).

O biogás pode ser utilizado como combustível para aquecimento, ou geração de energia elétrica em pequena e média escala e a biomassa residual da produção do biogás pode



ser utilizada como adubo orgânico (OLIVEIRA, 2004, p.04).

### 3.1.3. *Bioetanol*

As matérias-primas para produção do etanol podem ser divididas em três grupos principais: matérias-primas contendo açúcares como cana-de-açúcar, beterraba e frutas; matérias-primas de amiláceos como milho, trigo, arroz, batata e batata-doce; e de biomassa lignocelulósica como madeira, palha e gramíneas (BALAT; BALAT, 2009).

O etanol tem 66% da energia da gasolina e 60% da energia do diesel, resultando em menor rendimento nos veículos por volume de combustível, contudo, o maior número de octanos do álcool resulta em maior taxa de compressão que a gasolina, aumentando a eficiência em 30% e o rendimento de motores com álcool atinge aproximadamente 80% do rendimento equivalente com a gasolina (DRAPCHO; NHUAN; WALKER, 2008, p. 201).

A adoção do etanol como combustível para veículos é considerada um dos principais mecanismos de combate ao aquecimento global, pois reduz as emissões de gás carbônico (CO<sub>2</sub>), uma vez que parte do CO<sub>2</sub> emitido pelos veículos movidos a etanol é reabsorvido pelas plantações de cana-de-açúcar, compensando parcialmente as emissões do CO<sub>2</sub> (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, 2014).

Um dos principais fatores para o aumento de produção de bioetanol foi a adoção, por alguns países, de políticas favoráveis à produção de biocombustíveis para redução de emissões de gases de efeito estufa. Isto também contribuiu para o aumento da produção mundial de etanol, de 30 bilhões de litros em 2005 para cerca de 82 bilhões de litros em 2012 (ENERGY INTERNATIONAL AGENCY, 2012).

A utilização do álcool depende da sua graduação e abrange várias áreas de aplicação. O principal uso do etanol no Brasil é como combustível e divide-se em duas classes: o etanol hidratado e etanol anidro. O primeiro é utilizado em motores de combustão e o segundo é adicionado à gasolina em até 25%, sendo também utilizado como solvente em indústrias químicas. O Brasil é competitivo no cultivo de cana-de-açúcar para produção de etanol por apresentar vantagens energéticas, econômicas e climáticas (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2014).

### 3.2. Biomassa

A bioenergia é a energia derivada da conversão da biomassa, podendo ser utilizada diretamente como combustível ou processada a combustíveis líquidos e gasosos (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015a).

Como fonte energética renovável, a biomassa e seus resíduos têm se destacado no mundo inteiro. A biomassa pode ser definida como,

*“todo material orgânico, não fóssil, que tenha conteúdo de energia química no seu interior, o que inclui todas as vegetações aquáticas ou terrestres, árvores, biomassa virgem, lixo orgânico, resíduos de agricultura, esterco de animais e outros tipos de restos industriais. A biomassa de madeira inclui todo o material da árvore: tronco, ramos, folhas, casca e raízes.”* (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, 2011).

A biomassa pode ser de origem florestal, agrícola ou de resíduos florestais e agrícolas. É fonte primária, quando o material é utilizado para fins energéticos sem processamento e, de fonte secundária, quando derivada de processo de industrialização agrícola ou de madeira (PANOUTSOU, 2011).

A biomassa residual de fábricas de celulose e papel pode ser um recurso energético potencial de baixo custo para aproveitamento energético e, ao mesmo tempo, contribuir para a redução do impacto ambiental, uma vez que se evita a destinação de resíduos celulósicos para aterros industriais. Por utilizar madeira de florestas plantadas, as fábricas de celulose e papel geram resíduos florestais, tanto na floresta, durante o processo de desbaste e colheita das árvores, quanto na indústria, durante o processo de descascamento das toras de madeira.

#### 3.2.1. Resíduos Florestais

Em 2013, a área plantada com árvores no Brasil atingiu 7,6 milhões de hectares, crescimento de 2,8% em relação ao ano de 2012, sendo que os plantios de árvores de eucalipto representaram 72,0% desse total e as árvores de pinus, 20,7% (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 2014).

O cultivo de biomassa florestal para fins energéticos apresenta algumas vantagens em relação ao cultivo de herbáceas, pois as árvores estocam carbono por mais tempo, tanto na própria árvore, quanto no solo, podem crescer em solos inclinados e toleram ampla faixa de solos e hidrologia (DAVIS; HAY; PIERCE, 2014, p. 16).

A utilização da biomassa de madeira é sustentável quando proveniente de fontes renováveis, ou seja, de florestas plantadas, ao invés de processo extrativista de madeira, onde não há compromisso ambiental e de sustentabilidade (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, 2011, p. 265).

As principais fontes de bioenergia renovável são de origem florestal e de plantios dedicadas à produção energética (ROSILLO-CALLE, 2004, p. 230).

Os resíduos florestais são definidos como galhos e ramos de folhagens, de desbaste, de árvores caídas ou de corte das árvores (RESSOURCES NATURELLES DU CANADA, 2015).

A quantidade de biomassa de resíduos florestais é proporcional à idade da árvore, quanto maior a idade, maior a produção de galhos e produção de folhas e copa. O sistema de manejo e as práticas silviculturais também influenciam no aumento da produtividade florestal, juntamente com a idade da árvore (BRAND et al., 2014, p. 359).

Os resíduos florestais podem ser originados de desbastes de árvores, onde a árvore inteira é cortada e cominuída por máquinas deixando a biomassa pronta para transporte e consumo. Outra fonte de resíduos florestais são sistemas integrados, em que a árvore é cortada para fabricação de celulose, fabricação de placas de madeira “*medium density fiberboard*” (MDF), ou destinada às serrarias de madeira. As pontas de árvores e galhos são moídos para utilização como biomassa (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008).

No setor industrial de processamento mecânico da madeira, são considerados subprodutos de origem florestal, a serragem, o cepilho e a lenha, originados do processo de serras e plainas, ou de maiores dimensões como costaneiras, aparas, cascas e outros, são originados de serrarias de beneficiamento de madeira. Também outros resíduos são gerados na indústria de laminados, compensados e placas, utilizados pela indústria moveleira (COUTO et al., 2004, p. 81).

Os resíduos celulósicos podem ser reutilizados energeticamente para geração de calor ou eletricidade em grupos geradores ou termoelétricas (QUIRINO, 2003, apud RAMOS; TRUGUILHO; NAPOLI, 2011, p. 238). Sendo assim, os resíduos florestais como troncos,

cascas, galhos e folhas, seja de florestas plantadas para fins industriais de fabricação de papel e celulose ou para fins energéticos e os resíduos de outros processos madeireiros como indústria de serrarias e movelarias, podem ser utilizados energeticamente.

No Brasil, por sua característica de alta produtividade de florestas plantadas e de produtos agroindustriais, produz-se grande quantidade de biomassa residual decorrente destas atividades. Espera-se que haja aumento da utilização de biomassa moderna, por meio da produção de biocombustíveis derivados de materiais lignocelulósicos, como a produção de biogás e bioetanol a partir de resíduos agroindustriais, conduzindo ao aumento da sustentabilidade energética nos setores industrial e agrícola.

### *3.2.2. Resíduos Agroindustriais*

Um dos principais resíduos agroindustriais é proveniente da indústria do álcool, a vinhaça residual do processo de destilação.

A vinhaça residual da destilação de álcool de cana-de-açúcar é um líquido de cor marrom escuro, de natureza ácido, que sai da bica de destilação à temperatura de 107°C e apresenta cheiro desagradável pela decomposição da matéria orgânica (SALOMON et al., 2012, p. 335).

Embora a vinhaça seja aproveitada como adubo de solo nas culturas canavieiras, a biodigestão anaeróbica da vinhaça é uma das alternativas para seu aproveitamento (GRANATO et al., 2002, p. 03).

A geração de energia elétrica a partir da combustão de biogás, produzido pela fermentação da vinhaça, é interessante do ponto de vista econômico e ambiental, devido a três pontos: tratamento do resíduo, produção de biogás para geração de eletricidade e utilização do resíduo do biodigestor como fertilizante para aplicação nas lavouras (AVACI et al., 2012).

Além do processo bioquímico de produção de biogás, os resíduos sólidos agroindustriais podem ser aproveitados por meio de combustão, tais como: resíduos de soja, casca de arroz, bagaço de cana, palha e sabugo de milho.

O bagaço e a palha de cana destacam-se entre os cultivos agrícolas, sendo aproveitados para combustão em caldeiras para gerar energia nas usinas, além do excedente energético ter a possibilidade de ser acrescido ao sistema elétrico (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2015b). Esta é uma forma de reaproveitamento importante, uma vez

que um hectare de cana gera em média, 26,56 toneladas de palha de cana-de-açúcar (RIPOLI et al., 2004).

As termoelétricas que utilizam biomassa podem utilizar outras opções de combustíveis, dentre eles o bagaço e a palha da cana-de-açúcar (palhiço), que são fontes importantes para geração de energia no setor sucroalcooleiro (FLORENTINO et al., 2005, p. 289). Além dos resíduos provenientes da cultura da cana-de-açúcar, a grande maioria das culturas agroindustriais brasileiras gera biomassa residual, que pode ser utilizada como fonte de energia tais como casca de arroz, casca de castanhas, coco da bahia, coco de babaçu e dendê.

O crescimento acelerado da produção de proteínas animais no país tem aumentado o volume de biomassa residual, acompanhando a produção agropecuária, especialmente para o sistema de manejo que envolve espaços restritos, como quase a totalidade dos suínos e aves que abastecem as indústrias (BLEY JR. et al., 2009, p. 28). Decorre a necessidade de destinação adequada de subprodutos de origem animal, originários de atividades agropecuárias.

### *3.2.3. Subprodutos de Origem Animal*

Os subprodutos de origem animal são gorduras provenientes do abate e industrialização de carnes e derivados e, dejetos da produção animal.

As gorduras animais e óleos vegetais, pela sua alta viscosidade, devem ser aquecidos para utilização direta nos motores a diesel (LIMA, 2004, p. 16).

A melhor opção para aproximar as características físicas e químicas do diesel mineral é o biodiesel, que consiste de ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, esterificados com álcoois de cadeia curta. Os ésteres de ácidos graxos metílicos são mais utilizados que os ésteres de ácidos graxos etílicos devido ao preço do metanol, com exceção do Brasil, onde é mais viável a utilização do etanol. Embora, atualmente, a maior parte de lipídios ainda é usada para alimentação humana (80%), alimentação animal (5%) e para fins industriais (15%), espera-se que o uso industrial de lipídios para suprimento de energia será crescente no futuro próximo (SOETAERT; VANDAMME, 2009, p. 154).

Os dejetos de animais, por sua alta carga orgânica, são indicados para geração de biogás, conforme ilustrado na Tabela 1.

**Tabela 1** – Quantidade de rejeitos necessários para produção de 1m<sup>3</sup> de biogás.

Matéria-prima	Quantidade
Esterco fresco de bovino	25 kg/m <sup>3</sup>
Esterco fresco de galinha	2,3 kg/m <sup>3</sup>
Resíduos secos vegetais	2,5 kg/m <sup>3</sup>
Esterco seco de suíno	2,86 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: (CASTANÕN, 2002, apud LORA; VENTURINI, 2012, p.343).

De acordo com a Tabela 1, o potencial de produção de biogás é muito maior para esterco de galinha, de suínos e de resíduos vegetais, do que esterco bovino. Além disso, soma-se o fato de que normalmente a suinocultura e avicultura ocorrerem em ambientes confinados, facilita-se a coleta e processamento dos resíduos.

Por outro lado, a poluição causada pelos resíduos pecuários pode provocar danos ao próprio animal, ao homem que trabalha no sistema produtivo e ao meio ambiente como um todo, uma vez que pode ser a causa de doenças nos animais e no homem ocasionando prejuízo ao próprio empreendimento (HARDOIM; GONÇALVES, 2003, apud UTENBERG; AFONSO; PEREIRA, 2013, p. 01).

Há várias técnicas para o tratamento de dejetos animais; os processos físicos compreendem a separação de sólidos por decantação, peneiramento, centrifugação ou separação química. Os processos de tratamento biológicos podem ser aeróbicos, onde a microbiologia se desenvolve em lagoas aeradas por aeradores que promovem a difusão do oxigênio do ar no efluente; processos anaeróbicos, quando não há aeração desenvolvendo as bactérias anaeróbicas; ou por processos facultativos, onde ocorrem aerobiose e anaerobiose na mesma lagoa de tratamento. No processo anaeróbio, há formação de metano, favorecendo instalação de biogidestores para aproveitamento do biogás e o lodo residual pode ser utilizado no cultivo de peixes (OLIVEIRA, 1983, p. 88, 109).

#### 3.2.4. *Resíduos Sólidos Urbanos e Aterros*

A atividade humana gera resíduos sólidos, que precisam ser descartados por não ter mais utilidade. Entretanto, a maior parte dos resíduos sólidos pode ser reutilizada como fonte de matéria-prima para produção industrial ou geração de energia, se tratados adequadamente

(TCHOBANOGLOUS; KREITH, 2002).

De acordo com NBR 10.004, define-se resíduo sólido como,

*“os resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.”* (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Os resíduos sólidos urbanos são gerados pela atividade humana concentrada nos centros urbanos, que enfrentam problemas com a disposição e gestão dos resíduos.

O número de habitantes influencia na quantidade de resíduo gerado per capita dos centros urbanos. A quantidade de resíduo gerada por uma população de até 100 mil habitantes é de 0,4 kg de resíduos sólidos urbanos por habitante, por dia (kg RSU/hab.dia) e para uma população de mais de 1 milhão de habitantes é de 0,7 kg RSU/hab.dia (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2010, p.05).

De acordo com a NBR 8419, os resíduos sólidos urbanos podem ser dispostos no solo em aterros sanitários, sem causar danos à saúde pública e a sua segurança, minimizando os impactos ambientais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992).

Uma das formas de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos é pela captação de biogás de aterros urbanos. O gás mais relevante produzido no tratamento de resíduos é o metano, produzido na decomposição da matéria orgânica por bactérias metanogênicas (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2010).

Alguns estudos indicam que os resíduos sólidos de aterros podem gerar biogás para captação do metano para geração de calor e eletricidade, no entanto, a maior parte do metano de aterros sanitários é emitida para a atmosfera.

A biodegradação completa de uma tonelada seca de biomassa de aterros pode gerar até

200 Nm<sup>3</sup> de metano, contudo, uma estimativa conservadora seria a geração de 50 Nm<sup>3</sup> de metano por tonelada de RSU de aterros (THEMELIS; ULLOA, 2007, p. 01).

Em 2005, as emissões de metano no Brasil, provenientes da disposição de resíduos sólidos foram de 1.104 Gigagramas (Gg) de metano (CH<sub>4</sub>), do tratamento de efluentes domésticos foram 443 Gg de CH<sub>4</sub> e do tratamento de efluentes industriais foram 206 Gg de CH<sub>4</sub>. Já a incineração de resíduos sólidos contribuiu para a emissão de 110 Gg de dióxido de carbono, CO<sub>2</sub> e 0,0068 Gg de N<sub>2</sub>O (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2010).

A estimativa de geração de energia elétrica, com o aproveitamento do biogás gerado no aterro sanitário de Foz do Iguaçu, Paraná, é equivalente a 0,86 MW (LUCAS; MARAN; FRARE, 2010).

O potencial de geração de energia elétrica e iluminação por meio de queima direta utilizando biogás do aterro de Caieiras, São Paulo, é suficiente para alimentar um gerador de energia elétrica com potência de 60 kWh, com consumo de 26 m<sup>3</sup>/h de biogás e para iluminação de 10 lâmpadas a gás, com consumo de 1,2 m<sup>3</sup>/h de biogás (ABREU et al., 2005).

O potencial de produção de biogás de lixívia do aterro sanitário do Teerã é de 18 m<sup>3</sup> de metano por m<sup>3</sup> de lixívia. Uma planta com vazão de 1.400 m<sup>3</sup>/d de lixívia, produziria 29.897 m<sup>3</sup>/d de biogás, cuja combustão em moto-gerador produziria 1,8 MWh. De acordo com os autores, o investimento no moto-gerador apresentaria retorno em 1,3 anos (ABDOLI et al., 2012, p. 497).

Assim, o biogás gerado em aterros sanitários apresenta potencial de aproveitamento energético, contribuindo para redução do impacto ambiental e da dependência de fonte de energia fóssil.

Quando o resíduo sólido é originado de processo industrial, o aterro é dito industrial. Assim, resíduos de indústria alimentícia, frigoríficos, tintas, fábricas de papel e celulose, são destinados a aterros industriais. Por ser um processo com base em produtos de madeira, um dos resíduos gerados no processo de fabricação de papel e celulose, é o resíduo de biomassa celulósica.

### *3.2.5. Resíduos da Indústria de Papel e Celulose*

As fábricas de celulose e papel utilizam madeira de florestas plantadas como uma das principais matérias-primas. O processamento de madeira durante a colheita gera galhos e



pontas de árvores que podem ser utilizados na combustão em caldeira de biomassa. Para fabricação de celulose química, ou produção de pasta mecânica de madeira, as toras devem ser previamente descascadas, gerando cascas que são utilizadas na queima em caldeiras de biomassa, para produção de vapor e geração de energia elétrica, nos casos de cogeração por turbinas a vapor.

No Quadro 1 estão sumarizadas as principais fontes de biomassa gerada no processo de fabricação de celulose e papel.

**Quadro 1** - Resíduos de biomassa gerados na indústria de papel e celulose.

<b>Tipo de biomassa</b>	<b>Fonte de biomassa</b>
Licor negro	Manufatura de polpa química (processo Kraft)
Cascas e resíduos de madeira	Processos de polpa química e semi-química e manufatura de polpa mecânica
Rejeitos de depuração e processos de limpeza da polpa	Produção de polpa química, mecânica e preparo de massa de fábricas de papel
Lodo mecânico e químico	Tratamento de água branca e de efluentes
Lodo biológico	Tratamento biológico de efluentes
Lodo de destintamento	Destintamento de papel reciclado
Lodo misto	Fontes diversas

Fonte: GAVRILESCU (2008), p. 358.

O licor negro tem origem no processo de fabricação de celulose, é composto por materiais orgânicos solubilizados da madeira e materiais inorgânicos como sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) e carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Resulta do cozimento de cavacos de madeira sob temperatura e pressão e solução de licor branco, para dissolver a lignina e liberar as fibras de celulose na forma de polpa, que posteriormente passa pelos processos de depuração, lavagem e branqueamento. O licor negro, removido pela lavagem da polpa em filtros ou prensas, com concentração média de 16%, é enviado para a evaporação em múltiplo efeito para concentração até 85% de teor de sólidos, estando adequado para queima na caldeira de recuperação química. Na caldeira de recuperação química, a parte orgânica do licor negro concentrado ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  e  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) queima, gerando vapor e energia elétrica nos turbo-geradores e uma parte dos inorgânicos, o sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), é reduzido a sulfeto de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}$ )

sob condições de alta temperatura e ausência de oxigênio no interior do leito de inorgânicos fundidos, denominados de “*smelt*” ( $\text{Na}_2\text{S}$  e  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). O “*smelt*” sai da fornalha da caldeira por escoamento nas bicas de “*smelt*” para o tanque de dissolução, se transformando no licor verde. Devido à redução do sulfato de sódio a sulfeto de sódio, a caldeira de recuperação química também é chamada caldeira de redução. O licor verde é bombeado para a área de caustificação, onde reage com cal hidratada para converter o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  em hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) e carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), pela reação do licor verde com cal hidratada  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . O licor branco, resultante desta reação é uma mistura de soda e sulfeto de sódio ( $\text{NaOH}$  e  $\text{Na}_2\text{S}$ ), que retorna para o cozimento no digestor.

As cascas e resíduos de madeira, são resíduos do descascamento de toras antes da picagem da madeira para transformar em cavacos, para produção de celulose ou pasta mecânica de madeira. A madeira também pode ser utilizada na forma de toras, para produção de pasta mecânica de alto rendimento, por desfibramento, em desfibradores de pedra.

O rejeito da depuração, compreende a quantidade de fibras que não passou pelas peneiras centrífugas dos depuradores e sai na corrente de efluentes líquidos, sendo removido na estação de tratamento de efluentes.

O lodo mecânico e químico compreende a parte fibrosa removida da corrente de efluentes por peneiras, decantadores ou flotadores, seguido de adensamento por prensas desaguadoras ou centrífugas.

O lodo biológico pode ser de estação de tratamento de efluentes aeróbicos ou anaeróbicos. O tratamento aeróbico, por processo de lodo ativado, produz mais lodo decorrente da alta taxa de crescimento de bactérias aeróbicas, enquanto que no tratamento anaeróbico há menor crescimento de bactérias anaeróbicas, que produzem biogás na sua atividade microbiológica.

O lodo de destintamento é removido por flotação nas fábricas que utilizam aparas de papel reciclado e contém grande quantidade de tinta de impressão (pigmentos inorgânicos). A tinta é dispersa durante o repolpeamento das aparas e dissolvidas por meio de dispersantes químicos, sendo a flotação a melhor forma de remover as partículas muito finas e material coloidal.

O licor negro liberado das fábricas de celulose são utilizados na geração de energia térmica e elétrica, e a parte inorgânica do licor é reciclada no processo de cozimento. Cascas de madeira, geralmente são utilizadas na combustão em mistura com cavacos nas fábricas de

celulose e papel, entretanto, os resíduos florestais como galhos e lodo celulósico removido de estações de tratamento de efluentes ainda não são totalmente aproveitados.

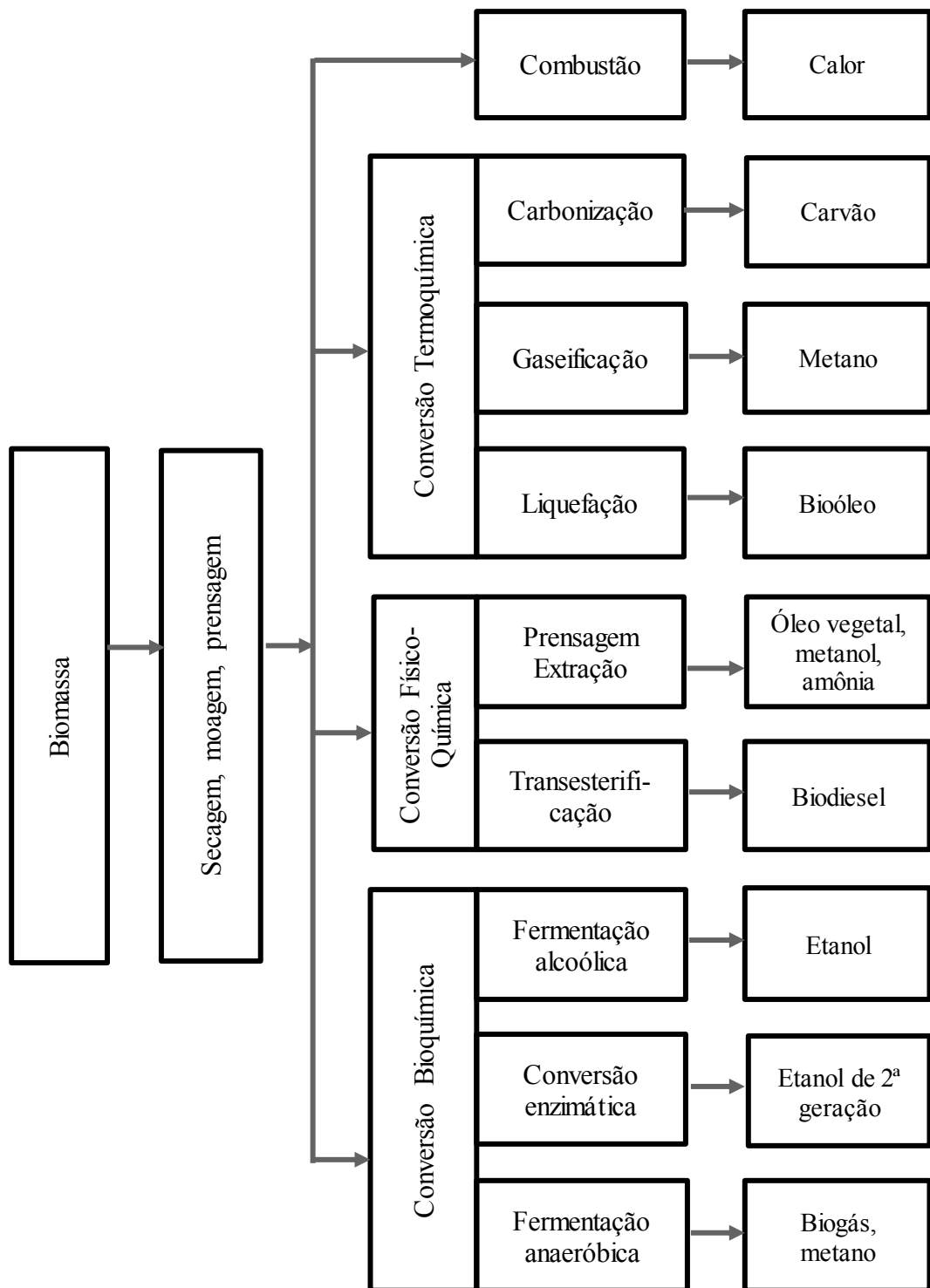
### **3.3. Aproveitamento de energia de biomassa**

A energia de biomassa é aproveitada de duas formas principais: a tradicional, pela combustão direta de lenha, cavacos, resíduos florestais e resíduos agroindustriais, e a moderna, por conversão em rotas térmicas ou bioquímicas, para geração de gás ou biocombustíveis sólidos ou líquidos.

Os processos de conversão de biomassa são classificados em quatro rotas:

- combustão direta, ou queima da biomassa para produzir gases quentes para geração de vapor, aquecimento direto, ou cogeração de energia elétrica,
- rotas de conversão termoquímica, que inclui a carbonização (torrefação) para produção de carvão, a gaseificação para produção do “syngas” (mistura de CO e H<sub>2</sub>) e liquefação para produção de bioóleo,
- rotas de conversão físico-química, que inclui a prensagem e extração, para produção de óleo vegetal, metanol e amônia e a transesterificação, para produção do biodiesel,
- rotas de conversão bioquímica, que inclui fermentação alcoólica para produção do bioetanol e fermentação anaeróbica para produção de biogás (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008, p. 09).

A Figura 1 apresenta as tecnologias de conversão de biomassa em fontes de energia secundária.



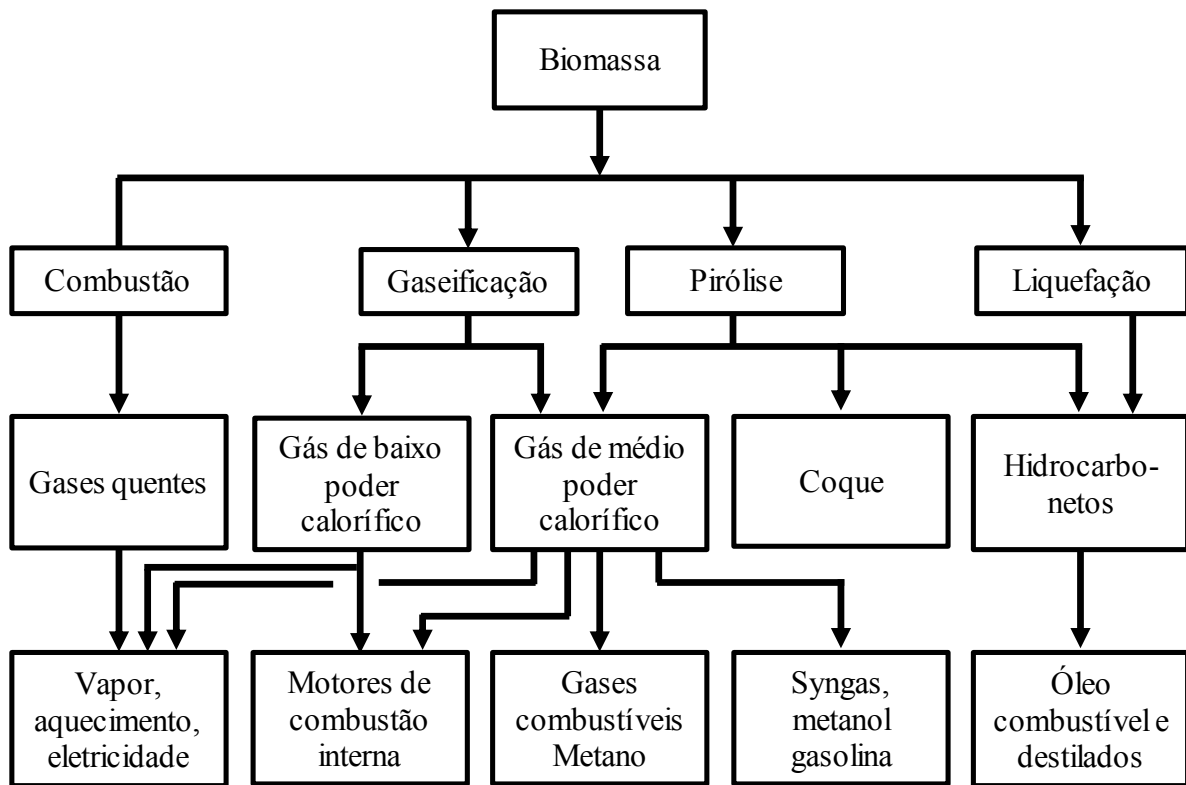
**Figura 1** - Tecnologias de conversão de biomassa em fontes de energia secundária (adaptado de DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008, p. 09).

Os fatores que influenciam na escolha do processo de conversão da biomassa são tipo

e quantidade de biomassa, a forma de energia desejada, os requisitos do produto final como exigências ambientais, fatores econômicos e fatores específicos de projeto (McKENDRY, 2002, p. 47).

Os processos de conversão termoquímica de biomassa usualmente são pressurizados, sob atmosfera ausente ou reduzida em oxigênio, onde os compostos de cadeia longa da biomassa são quebrados a hidrocarbonetos de cadeia mais curtas, tais como “syngas” ou bioóleo (BLASHEK; EZEJI; SCHEFFRAM, 2010).

A Figura 2 ilustra os principais processos de conversão termoquímica da biomassa: combustão, gaseificação, pirólise e liquefação, o insumo energético intermediário liberado e os produtos finais de cada processo.



**Figura 2** – Principais processos de conversão termoquímica de biomassa, produtos intermediários e produtos finais (McKENDRY, 2002, p. 49).

### 3.3.1. Gaseificação

A gaseificação é definida como processo de conversão térmica cujos produtos gerados

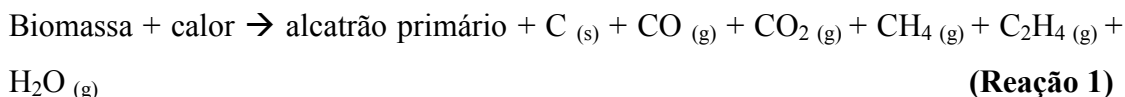
são calor e gases combustíveis. A gaseificação é similar à combustão, exceto que a oxidação é parcial, ou seja, ocorre com insuficiência de oxigênio para evitar a combustão completa (ROOS, 2008, p.09).

O processo de gaseificação ocorre à alta temperatura (700 – 1500 °C), em que um combustível sólido é convertido a gás combustível, “*producer gas*”, composto pela mistura de CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e N<sub>2</sub> ou “*syngas*”, que é uma mistura de CO e H<sub>2</sub> (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015b).

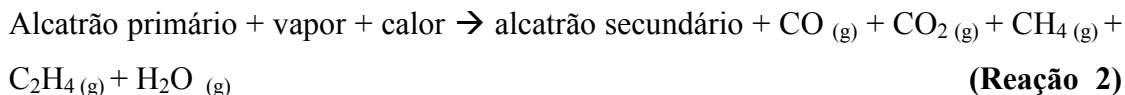
O “*syngas*” pode ser posteriormente convertido a bioóleo, sob presença de catalisador (BLASHEK; EZEJI; SCHEFFRAM, 2010).

As Reações 1 a 9 ilustram as principais reações que ocorrem na gaseificação (SANCHEZ, 1994).

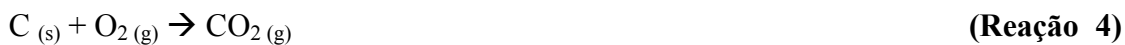
- a) Volatilização primária da biomassa (pirólise, ocorre em temperaturas entre 280 e 450°C),



- b) Craqueamento e reforma do alcatrão,



- c) Reações heterogêneas gás-sólido,



- d) Reação de Boudard,



- e) Reação de gás-água,



- f) Formação do metano,



g) Reações homogêneas na fase gasosa,



Os gaseificadores podem ser classificados em:

- quanto ao poder calorífico do gás produzido: gás de baixo poder calorífico, até 5 MJ/Nm<sup>3</sup>, gás de médio poder calorífico, de 5 a 10 MJ/Nm<sup>3</sup>, e gás de alto poder calorífico, de 10 a 14 MJ/Nm<sup>3</sup>,

- quanto ao tipo de agente gaseificador: ar, vapor de água, oxigênio e hidrogênio (hidro gaseificação),

- quanto à direção do movimento relativo da biomassa e do agente gaseificador: contracorrente, concorrente, de fluxo cruzado e leito fluidizado,

- quanto à pressão de trabalho: baixa pressão (atmosférica) e pressurizado (até 2000 kPa),

- quanto ao tipo e forma da biomassa: de resíduos agrícolas, resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos, biomassa natural, biomassa peletizada, biomassa pulverizada. (SANCHEZ, 1994, p. 08).

*- Gaseificador do tipo concorrente*

No gaseificador concorrente, a biomassa é alimentada na parte superior do gaseificador e o agente gaseificador; ar ou oxigênio é alimentado na parte intermediária do corpo do gaseificador, tendo a mesma direção de fluxo que a biomassa, de cima para baixo. A biomassa passa pelas zonas de secagem, pirólise, combustão, onde tem maior contato com o agente gaseificador, e finalmente pela zona de redução, suportada pela grelha para remoção das cinzas. Na zona de combustão há uma restrição para forçar a passagem dos gases e permitir o craqueamento do alcatrão e voláteis. O alcatrão é convertido em frações mais leves e coque, favorecendo a saída dos gases praticamente livres de alcatrão (SANCHEZ, 1994, p. 11). O gaseificador do tipo concorrente é mais indicado para aplicações que vão de 10 a 1000

kW (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015b).

*- Gaseificador do tipo contracorrente*

No gaseificador do tipo contracorrente, a biomassa é alimentada por cima do gaseificador, enquanto que o agente gaseificador é alimentado por baixo, percorrendo todo o leito de biomassa até o topo do gaseificador, onde os gases são extraídos. A biomassa desce por gravidade, pelas zonas de secagem, de pirólise, de redução e de combustão. Os gaseificadores do tipo contracorrente apresentam maior eficiência térmica, pois os gases quentes da combustão pré-aquecem a biomassa, mas tem desvantagem de conter maior teor de alcatrão, o que impede sua utilização em motores de combustão direta (SANCHEZ, 1994, p. 10). Os gaseificadores do tipo contracorrente são mais indicados para aplicações de 1 a 12 MW (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015b).

*- Gaseificador do tipo fluxo cruzado*

No gaseificador do tipo fluxo cruzado, o agente gaseificador é injetado perpendicularmente ao fluxo de biomassa e os gases são retirados na mesma altura do ponto de entrada do agente gaseificador. A zona de secagem ocorre na parte mais externa da biomassa, a zona de pirólise ocorre na região intermediária e a zona de combustão é a região mais interna da biomassa. A zona de redução está na parte inferior sobre a grelha, que suporta toda a biomassa dentro do gaseificador. No gaseificador de fluxo cruzado, o gás apresenta características intermediárias entre o de fluxo concorrente e o de fluxo contracorrente. A quantidade de agente gaseificador fornecida é maior, aumentando a temperatura da zona de combustão (SANCHEZ, 1994, p. 10).

*- Gaseificador de leito fluidizado atmosférico e pressurizado*

No gaseificador do tipo de leito fluidizado atmosférico, a biomassa é alimentada na lateral e o agente gaseificador (ar) por baixo da grelha, de forma que a biomassa é mantida em suspensão dentro do gaseificador e os gases são extraídos na parte de cima do gaseificador. Junto com a biomassa, há um leito de material inerte, que não entra em combustão na temperatura interna do gaseificador, para manter a biomassa em suspensão (SANCHEZ, 1994, p. 10). O gaseificador de leito fluidizado atmosférico pode ser dimensionado para capacidades de 2 a 140 MW, enquanto que o gaseificador de leito fluidizado pressurizado



(sob pressão de até 2000 kPa) pode ser dimensionado para capacidades de 12 a 980 MW (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015b).

A gaseificação apresenta pontos positivos e negativos em relação à geração de energia com utilização de combustíveis fósseis. Os pontos positivos são menor emissão de CO<sub>2</sub> e os baixos níveis de emissão de SO<sub>x</sub>, devido ao baixo conteúdo de enxofre da biomassa. Além disso, a energia gerada pela biomassa é renovável. Os pontos negativos são altas emissões de NO<sub>x</sub>, em parte devido ao grande teor de compostos nitrogenados de tecidos vegetais. A gaseificação de biomassa proveniente de resíduos sólidos urbanos não tem impactos sobre o uso do solo, mas gera cinzas ricas em metais pesados, que podem ser volatilizados pelas altas temperaturas do gaseificador. Os riscos operacionais são relacionados a vazamentos de gás e risco de incêndios, sobretudo quando o sistema é manual. Sistemas automatizados diminuem bastante esses riscos (COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2012, p. 184).

### 3.3.2. Pirólise

A pirólise é um processo de aquecimento da biomassa seca para sua decomposição direta em syngas e óleo. Tanto o processo de gaseificação, quanto a pirólise, requer biomassa seca e o processo ocorre em temperaturas acima de 600 °C (BLASHEK; EZEJI; SCHEFFRAM, 2010).

A pirólise é a decomposição térmica da biomassa na ausência de oxigênio. A pirólise rápida ocorre aproximadamente a 500 °C, sob aquecimento por cerca de 1 segundo para obter 75% de bioóleo, 12% de carvão e 13% de gases. Na pirólise intermediária, sob temperatura de 500 °C e tempo de residência de 10 a 30 segundos, obtêm-se cerca de 50% de bioóleo, 25% de carvão e 25% de gases. Já a pirólise lenta, ou torrefação, com temperatura aproximada de 290 °C e tempo de residência de 30 minutos obtêm-se 82% de carvão e 18% de gases. Na pirólise lenta a 400 °C e tempo de retenção de alguns dias ocorre a carbonização, obtendo-se 30% de bioóleo, 35% de carvão e 35% de gases. Complementarmente, a gaseificação ocorre a 800 °C, obtendo-se 5% de bioóleo, 10% de carvão e 85% de gases (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015c).

A pirólise rápida requer condições específicas para obtenção do bioóleo; temperatura da ordem de 500 °C, por cerca de 2 segundos e partículas de biomassa finamente divididas (com cerca de dois mm no caso de reatores de leito fluidizado), para promover alta taxa de

transferência de calor entre a biomassa e o vapor, seguido de rápido resfriamento do vapor da pirólise para liquefação em bioóleo. A pirólise rápida inclui os processos de secagem da biomassa para 10% de umidade ou menos, moagem da biomassa para redução do tamanho das partículas, a reação de pirólise propriamente dita, separação de sólidos (carvão), resfriamento e coleta do líquido, o bioóleo (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2015c). O líquido pirolenhoso é constituído de ácidos pirolenhosos solúveis em água, como também de produtos fenólicos, que constituem os alcatrões (COUTO et al., 2004, p. 76).

Uma variação da pirólise é a carbonização ou torrefação para produção de carvão vegetal.

O carvão vegetal é um dos redutores energéticos mais importantes da indústria siderúrgica nacional, para produção de ferro gusa. Em 2013, o consumo de carvão vegetal atingiu 5,9 milhões de toneladas, utilizados na produção de 31,6 milhões de toneladas de ferro gusa, sendo 76% de madeira de árvores plantadas (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2014).

### 3.3.3. *Carbonização ou Torrefação*

A torrefação é um processo de pré-tratamento térmico da biomassa, onde esta é aquecida a temperaturas entre 200 e 300 °C, sob atmosfera de nitrogênio ou isenta de oxigênio por 5 a 30 minutos de tempo de retenção. Além disso, as propriedades da biomassa após torrefação são melhoradas pela redução da umidade, redução da relação oxigênio/carbono (O/C), que aumenta o poder calorífico da biomassa e promove mudança do comportamento da biomassa de higroscópico para hidrofóbico, trazendo benefícios logísticos de manuseio, estocagem e transporte da biomassa torrificada devido sua umidade reduzida. O processo gera dois produtos; a biomassa sólida torrificada contendo a maior parte da energia e os gases voláteis liberados durante a torrefação, contendo um variedade de compostos orgânicos que normalmente são utilizados como combustível como fonte de calor no processo de torrefação (CHEN; KUO, 2011, p. 01).

Os resíduos de madeira submetidos a tratamentos térmicos na temperatura de 200 °C resultaram em aumento do poder calorífico de 45% em relação à madeira convencional (MELO et al., 2005, p. 137).

A carbonização é uma pirólise lenta e consiste em promover a decomposição térmica

da biomassa sob ação do calor na presença de quantidades controladas de ar, gerando carvão vegetal, diferentes produtos químicos e combustíveis líquidos e gasosos. Carbonização é o nome que recebe a pirólise quando o objetivo é a produção de carvão vegetal, ou destilação seca, quando o objetivo é a recuperação fracionada de ácidos pirolenhosos líquido (COUTO et al., 2004, p.77).

#### 3.3.4. *Liquefação*

A hidropirólise, ou liquefação hidrotérmica, é um processo de conversão termoquímico sob alta pressão e temperatura para decomposição de biomassa úmida, usando a água como reagente crítico no processo de decomposição. A água contida na biomassa decompõe sua estrutura polimérica, onde as ligações polares da biomassa são atacadas por ligações polares da água. No processo de liquefação desenvolvido pela Shell, biomassa à temperatura de 300 a 350 °C, sob pressão de 15 a 20 MPa e tempo entre 5 e 15 minutos é convertida em produtos gasosos e óleo. Cavacos de madeira, matéria orgânica e lodo de efluente foram convertidos em 50% de óleo, 30% de gás, 15% de água e 5% de substâncias orgânicas dissolvidas. No processo de liquefação, o óleo contém de 10 a 15% de oxigênio, enquanto que a biomassa contém de 40 a 50% de oxigênio, o que resulta no alto poder calorífico do óleo obtido, entre 30 a 35 MJ/kg (VERTÈS et al., 2010).

O bio-óleo apresenta propriedades físicas e químicas completamente diferentes dos combustíveis derivados de petróleo. O bio-óleo tem maior conteúdo de água e de sólidos suspensos, maior densidade, é mais ácido e tem poder calorífico menor que a metade do poder calorífico dos combustíveis fósseis convencionais. Tem 35 a 40% em peso de oxigênio na sua composição, enquanto que o óleo mineral contém apenas alguns ppm de oxigênio. Essas propriedades distintas do bio-óleo em relação aos combustíveis fósseis devem ser consideradas na sua utilização (OASMAA et al., 2010, p. 08).

#### 3.3.5. *Biodigestão*

Um biodigestor compõe-se de uma câmara fechada na qual uma biomassa é fermentada anaerobicamente, isto é, sem a presença de ar. Na fermentação ocorre liberação de biogás e produção de biofertilizante. É possível, portanto, conceituar biodigestor como um

aparelho destinado a conter a biomassa e seu produto: o biogás (ANDRADE et al., 2012, p. 02).

Os digestores do tipo indiano, chinês e de batelada são mais indicados para propriedades rurais, independente de suas proporções. A produção de biogás nas propriedades rurais contribui para proporcionar conforto ao rurícola com utilização de gás prático e barato, reduz o consumo de petróleo, produz biofertilizante a partir do resíduo e contribui para a preservação do meio ambiente (DEGANUTTI et al., 2002).

*- Digestor do tipo indiano*

O digestor do tipo indiano tem como característica principal uma campânula móvel que mantém a pressão do digestor constante pelo deslocamento vertical da campânula, conforme o biogás vai sendo produzido e consumido. O gás é mantido no digestor pela selagem hidráulica entre o substrato líquido e a campânula. A concentração do substrato deve ser mantida em torno de 8% para facilitar a circulação entre os dois compartimentos divididos pela parede interna, desde o tanque de entrada até o tanque de saída. Há um pequeno desnível entre o tanque de entrada e o tanque de saída de resíduo, onde à medida que a biomassa é introduzida e extração do resíduo pelo tanque de saída (DEGANUTTI et al., 2002).

*- Digestor do tipo chinês*

O digestor do tipo chinês caracteriza-se por ter uma campânula fixa em alvenaria e neste caso a pressão do biogás é variável, a depender da geração e do consumo de biogás. A extração do substrato ocorre pela pressão interna do biodigestor, que expulsa o material em direção à caixa de saída, que tem nível mais baixo que a caixa de entrada. Da mesma forma, a concentração do substrato deve ser em torno de 8% de sólidos. Como não há selo hidráulico entre o gás e o líquido, há uma pequena perda de gás para a atmosfera e o digestor não é recomendado para grandes produções (DEGANUTTI et al., 2002).

*- Digestor do tipo batelada*

No digestor do tipo batelada, a alimentação do substrato é efetuada de forma intermitente e a produção do biogás ocorre até o término da fermentação, depois é descarregado e alimentado novamente, sendo mais indicado para propriedades onde não há disponibilidade de substrato para operar continuamente (DEGANUTTI et al., 2002).

Outros tipos de biodigestores são utilizados para altas capacidades de geração de biogás como o biodigestor contínuo de tanque com agitador, que opera na cidade de Karlshure, Alemanha, com volume de 1350 m<sup>3</sup> e capacidade de produção de 7000 Nm<sup>3</sup> de biogás por dia, com cerca de 62 a 70% de metano (GALLERT; WINTER, 2008).

### 3.3.6. Secagem e Combustão Direta

A combustão direta consiste na queima do combustível (biomassa), na presença de oxigênio (comburente) e um iniciador da combustão (fogo ou chama), para liberar energia na forma de calor.

O poder calorífico indica a quantidade de energia liberada por quilograma de combustível e é fortemente influenciado por sua umidade, quanto mais seca estiver a biomassa, mais energia para o meio será liberada na forma de calor. Na combustão a energia química armazenada na biomassa é convertida em calor, trabalho mecânico ou eletricidade através de fornos, caldeiras, turbinas a vapor e turbo-geradores, etc. Durante a combustão da biomassa, a temperatura dos gases é de 800 a 1000 °C, sendo viável para biomassa com teor de umidade até 50%, a não ser que a biomassa seja previamente seca. Biomassas com umidades mais altas são mais indicadas para processos de conversão bioquímica (McKENDRY, 2002, p. 48).

Diferentemente da gaseificação e pirólise, cujos produtos gasosos têm poder calorífico, na combustão, os gases liberados não tem poder calorífico útil (BASU, 2010, p. 01).

Na biomassa sólida (florestal, resíduos agrícolas, resíduos urbanos, etc.), as propriedades físicas mais importantes relacionadas a sua utilização para fins energéticos são o conteúdo de umidade residual (em base seca) e sua densidade energética (COUTO et al., 2004, p. 85).

Há vários tipos de secadores utilizados para secagem de biomassa: os secadores de aquecimento direto e indireto, secadores rotativos, secadores de correia, do tipo cascata, do tipo “*flash-drier*”, de vapor superaquecido e de micro-ondas. A seleção do tipo de secador depende de muitos fatores, como custo de capital, tipo de biomassa a ser seca, espaço disponível, eficiência energética, emissões ambientais e propensão a incêndio (ROOS, 2008).

O Quadro 2 ilustra a classificação dos secadores de biomassa.

**Quadro 2** - Classificação de secadores de biomassa.

<b>Classificação</b>	<b>Alternativas</b>
Meio de secagem (corrente térmica sobre o material a ser seco)	Gases de exaustão, ar quente ou vapor superaquecido.
Suprimento de calor	combustão direta ou indireta.
Pressão	Atmosférica, vácuo ou alta pressão.
Fonte de calor	Gases de exaustão de fornos, caldeira, outras fontes de calor de exaustão.

Fonte: (ROOS, 2008).

### 3.3.7. Cogeração

A transformação de energia térmica disponibilizada pelos combustíveis em energia mecânica, processo fundamental de uma termoelétrica, é realizada por equipamentos baseados em ciclos termodinâmicos, entre eles o ciclo Brayton e o ciclo de Rankine. Na cogeração realizada com o ciclo combinado, a turbina a vapor gera energia elétrica no gerador acoplado à turbina e fornece vapor para energia térmica aos processos, seja de contrapressão, extração ou condensação (CORREA NETO et al., 2001, p. 02, 03).

A cogeração caracteriza-se pela produção de energia elétrica e calor útil, é uma forma racional de utilização de combustíveis, sendo bem difundida na indústria sucroalcooleira e de papel e celulose, pela demanda de energia destas indústrias e pela quantidade de biomassa residual geradas (GABIALTI et al. 2010, p. 128, 129, apud SZMERCSÁNYI, 1979).

Na indústria de celulose e papel, os resíduos florestais, podem ser utilizados para geração de energia.

O resíduo florestal que apresenta melhor qualidade para geração de energia é o galho, devido menor teor de umidade e, conseqüentemente, maior poder calorífico líquido. A idade é um dos fatores de maior influência na qualidade energética da biomassa e a madeira recém-colhida, tem menor poder calorífico devido umidade mais altas (BRAND et al., 2014, p. 359).

Na indústria sucroalcooleira, o bagaço de cana-de-açúcar tem papel importante.

A eletricidade gerada por meio do bagaço da cana é um dos produtos que contribuíram para que os derivados da cana-de-açúcar ocupassem a quarta posição no ano de 2000, na matriz de oferta energética brasileira, perdendo apenas para a lenha, a energia hidráulica e

derivados de petróleo. De acordo com o autor, a energia gerada nas usinas sucroalcooleiras é capaz de suprir não somente o consumo de eletricidade no processo industrial, como seu excedente é comercializado junto às distribuidoras locais de energia elétrica (SOUZA, 2002, p. 01, 02).

Uma das formas de utilização do bagaço para cogeração é a combustão em mistura com gás natural, visando maximizar a produção de eletricidade de forma a injetada na rede elétrica local. O sistema consta de gaseificador de biomassa, turbina a gás para queima do gás produzido a partir do bagaço de cana e queima adicional de gás natural. Acoplado à turbina, uma caldeira de recuperação gera vapor para operar o sistema com turbinas a vapor. Há diferentes estratégias de operação da planta: operação utilizando todo o bagaço na gaseificação e complementação de gás natural na turbina a gás, de forma a atender a demanda de vapor da usina; operação enviando uma determinada quantidade de bagaço ao gaseificador, de forma a operar a turbina (geração de energia elétrica) e; o excedente de bagaço sendo queimado na caldeira de recuperação, de forma a maximizar a quantidade de vapor produzida e atender à demanda da usina (ZANETTI et al., 2006, p. 01, 04).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. O Processo de fabricação de papel-cartão

O papel-cartão é utilizado para embalagens de produtos alimentícios, bebidas, farmacêuticos, cosméticos, editorial, brinquedos, calçados, vestuário e vários outros bens de consumo. O detalhamento do processo, na Figura 3, permite identificar a origem dos resíduos considerados no estudo.

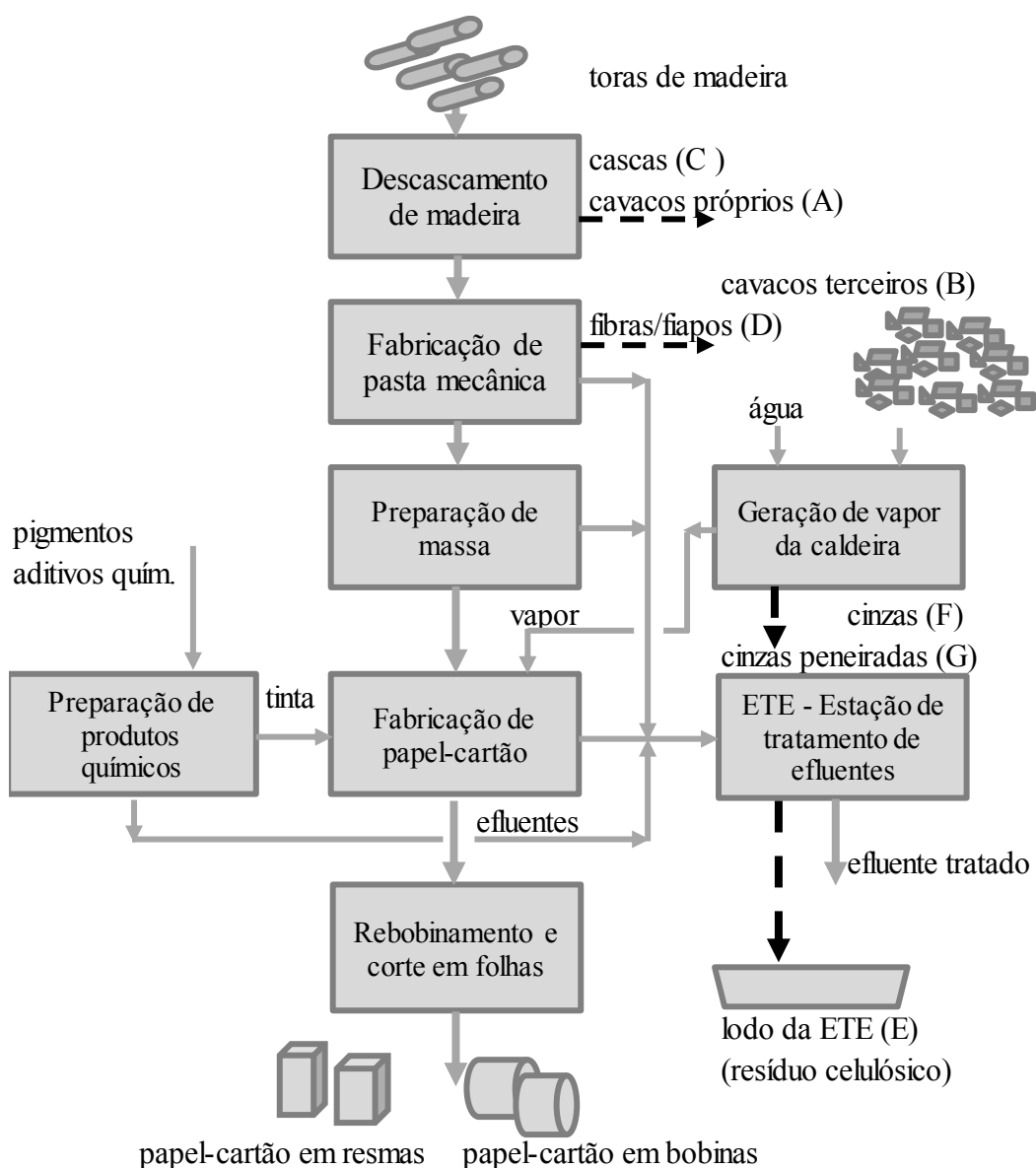


Figura 3 – Fabricação de papel-cartão e origem dos resíduos do estudo.



#### *- O descascamento de madeira*

As toras de pinus com diâmetro de 8 a 20 cm e comprimento de 0,90 a 0,94 m são colocadas numa mesa de recepção de toras por meio de guias, para transporte por esteira de borracha ao descascador de toras, que consiste num tambor cilíndrico de 2 m de diâmetro e 5 m de comprimento. O tambor descascador tem aletas internas horizontais para elevar as toras enquanto gira e promover impacto entre as mesmas dentro do tambor, soltando as cascas. A casca é extraída por meio de fendas no tambor descascador e enviadas para uma caçamba, para posterior queima na caldeira em mistura com cavacos para geração de vapor. As toras descascadas são transportadas para a fábrica de pasta mecânica, para fabricação de pasta de madeira nos desfibradores de pedra.

#### *- Fabricação de pasta mecânica de madeira*

A fabricação de pasta mecânica de madeira ocorre por desfibramento das toras de madeira em desfibradores de pedra, que promovem o atrito da pedra cilíndrica com 1,0 m de diâmetro e 0,94 m de largura, com as toras sob pressão, para separar as fibras. As toras são alimentadas nas três câmaras dos desfibradores, que dispõem de pistões pneumáticos para comprimir as toras contra a pedra, que é acionada por meio de motor elétrico ou turbina hidráulica. A superfície da pedra é ranhurada, com sulcos longitudinais de 1 mm de profundidade, para gerar atrito entre a pedra e a madeira, para promover a separação das fibras e produzir a pasta mecânica. Há chuveiros de água a cerca de 20 cm da superfície da pedra para remover a pasta, controlar a concentração da pasta e manter a temperatura da pedra estável, evitando-se o superaquecimento devido ao atrito. A pasta em suspensão é bombeada para peneiras classificatórias para separar fibras e fiapos, lascas e pequenos pedaços de madeira, que não servem para fabricação do papel-cartão, sendo separados e são enviados para queima na caldeira de biomassa com 80% de umidade. Em seguida a pasta é depurada em depuradores centrífugos que rejeitam parte das fibras não totalmente desfibradas e outros contaminantes, como pequenos pedaços de casca e areia, que são descartadas na canaleta de efluente, constituindo o efluente líquido da área da pasta mecânica. Os rejeitos de tanques de água também vão para a canaleta e contêm fibras e finos de madeira que não ficaram retidos no papel. Estas fibras são removidas da corrente de efluentes por meio de processos de

flotação e centrifugação, dando origem ao resíduo celulósico denominado lodo da ETE.

#### *- Preparação de massa para máquina de papel*

Durante a preparação de massa, a mistura de fibras e produtos químicos passa por tanques com misturadores mecânicos para desagregar a celulose e pasta de madeira, e por depuradores para promover a limpeza da polpa, para bombeamento para a máquina de papel. Os depuradores utilizam força centrífuga para remover partículas pesadas, fibras não totalmente separadas e outros materiais contaminantes da massa, por meio de descargas temporizadas dos rejeitos para as canaletas de efluentes. Estas descargas constituem a maior parte de fibras rejeitadas no processo de fabricação do papel-cartão, são bombeadas para a estação de tratamento de efluentes (ETE) e removidas por flotação e centrifugação.

#### *- Preparação de tintas e aditivos*

A preparação de tintas e aditivos (PTA) consiste na mistura de pigmentos (carbonato de cálcio e caulim), com produtos químicos, para produzir a tinta para revestimento “*coating*” do papel-cartão na máquina de papel. Também nesta área amido é cozido a 80 °C para ser utilizado na colagem das fibras, dando resistência física ao papel-cartão.

#### *- Fabricação de papel-cartão*

A mistura de fibras e aditivos químicos, da área do preparo de massa, é bombeada para a máquina de papel onde ocorre a formação e desaguamento da massa nas mesas planas da máquina para formar a folha de papel. A folha úmida, na concentração de 18%, passa por três estágios de prensagem para retirar água e aumentar o teor seco para 45%. Em seguida, a folha de papel passa por cilindros secadores, onde é injetado vapor a 4,5 kg/cm<sup>2</sup> de pressão dentro dos cilindros e secar o papel em contato com a superfície. A troca térmica para evaporação da água folha é por contato direto do papel-cartão com a superfície aquecida dos cilindros secadores. Após secagem da folha, a tinta de revestimento é aplicada sobre a superfície do papel-cartão em dois estágios, sendo seca por convecção e radiação por meio de aquecedores a gás.

#### *- Rebobinamento e corte em folhas*

O rebobinamento compreende o corte do rolo de papel-cartão, que sai da máquina (rolo jumbo), em bobinas menores para impressão em impressoras rotativas, ou para corte em folhas nas cortadeiras, para impressão em impressoras planas. O cliente recebe o papel-cartão em bobinas, com diâmetro de 120 cm e largura de acordo com a largura da impressora rotativa, ou em folhas, embaladas em paletes ou em resmas, com tamanhos de acordo com a impressora plana.

#### *- Tratamento de efluentes na estação de tratamento de efluentes - ETE*

A estação de tratamento de efluentes (ETE) recebe todos os efluentes líquidos da fábrica por várias canaletas; da área de fabricação de pasta mecânica, do preparo de massa, da preparação de tinta e da máquina de papel. A ETE é constituída por uma lagoa de estabilização de vazão do efluente, um flotador, uma centrífuga para separar as fibras do lodo flotado, duas lagoas de aeração e uma lagoa de polimento. No flotador, as fibras são separadas da corrente líquida por flotação, reação das fibras com polímero coagulante e ar para flotar e separar as fibras sobrenadantes para um tanque. A consistência da fibra na entrada da centrífuga é em torno de 4% e após centrifugação é de 40 a 45%. O resíduo celulósico é descarregado numa caçamba e enviado para aterro industrial. Aproximadamente 25 toneladas de fibras a 55% de umidade são removidas por dia. A característica da fibra removida na centrífuga é de 80 a 90% de fibras lignocelulósicas e o restante é constituído por cargas minerais, tais como caulim e carbonato de cálcio.

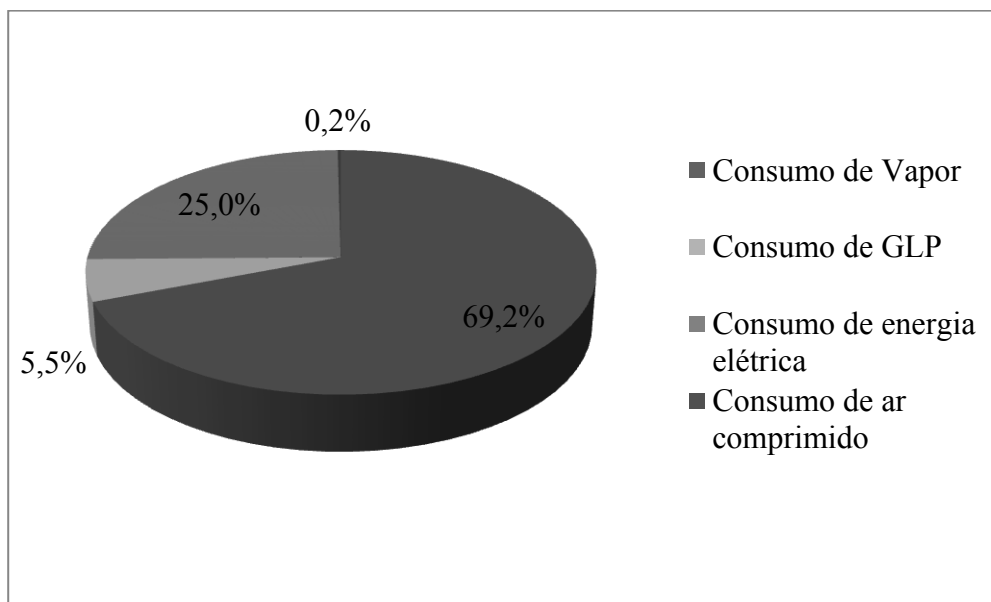
#### *- Geração de vapor na caldeira de biomassa*

A caldeira de biomassa é de fabricação da BREMER, modelo HBFS-25, com bancada de tubos geradores do tipo flamotubular horizontal; os gases quentes circulam dentro dos tubos e a água no lado externo dos tubos. A fornalha da caldeira com dimensões 3,21 m de largura, 4,15 m de comprimento e 3,44 m de altura é do tipo aquatubular; a água circula dentro dos tubos e os gases quentes da combustão no lado externo dos tubos. A capacidade de produção de vapor é de 25 toneladas de vapor por hora a 12 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão e temperatura

de vapor saturado de 183,2 °C. O consumo médio de biomassa (cavacos, cascas e fibras e fiapos) na combustão é 143 toneladas de cavacos por dia, para produção de 497 toneladas de vapor, utilizado para secar o papel-cartão por meio dos cilindros secadores na máquina de papel. O ventilador de ar primário da caldeira insufla 500 m<sup>3</sup>/h de ar à temperatura de 120 °C, com pressão de 1200 milímetros de coluna de água (mmca). O ventilador de ar secundário insufla 14500 m<sup>3</sup>/h de ar a 350 mmca e temperatura de 30 °C. Os gases de combustão são removidos pelo ventilador de exaustão, com capacidade para 8800 m<sup>3</sup>/h a 180 °C e pressão de 240 mmca e temperatura de 180 °C.

- *Consumo de energia na fabricação de papel-cartão*

Em 2014, o consumo médio por hora de vapor foi 15.749 kW, o consumo de energia elétrica foi 5.694,4 kW, o consumo de gás GLP foi 1.272,2 kW e o consumo de energia elétrica na geração de ar comprimido foi 46,8 kW. A Figura 4 ilustra a participação dos principais insumos energéticos utilizados na fabricação de papel-cartão: consumo de vapor 69,2%, consumo de energia elétrica total 25%, consumo de gás GLP 5,5% e consumo de ar comprimido 0,2%.



**Figura 4** – Consumo de energia para fabricação de papel-cartão.

#### **4.2. Biomassa e resíduos celulósicos gerados no processo de fabricação de papel-cartão**

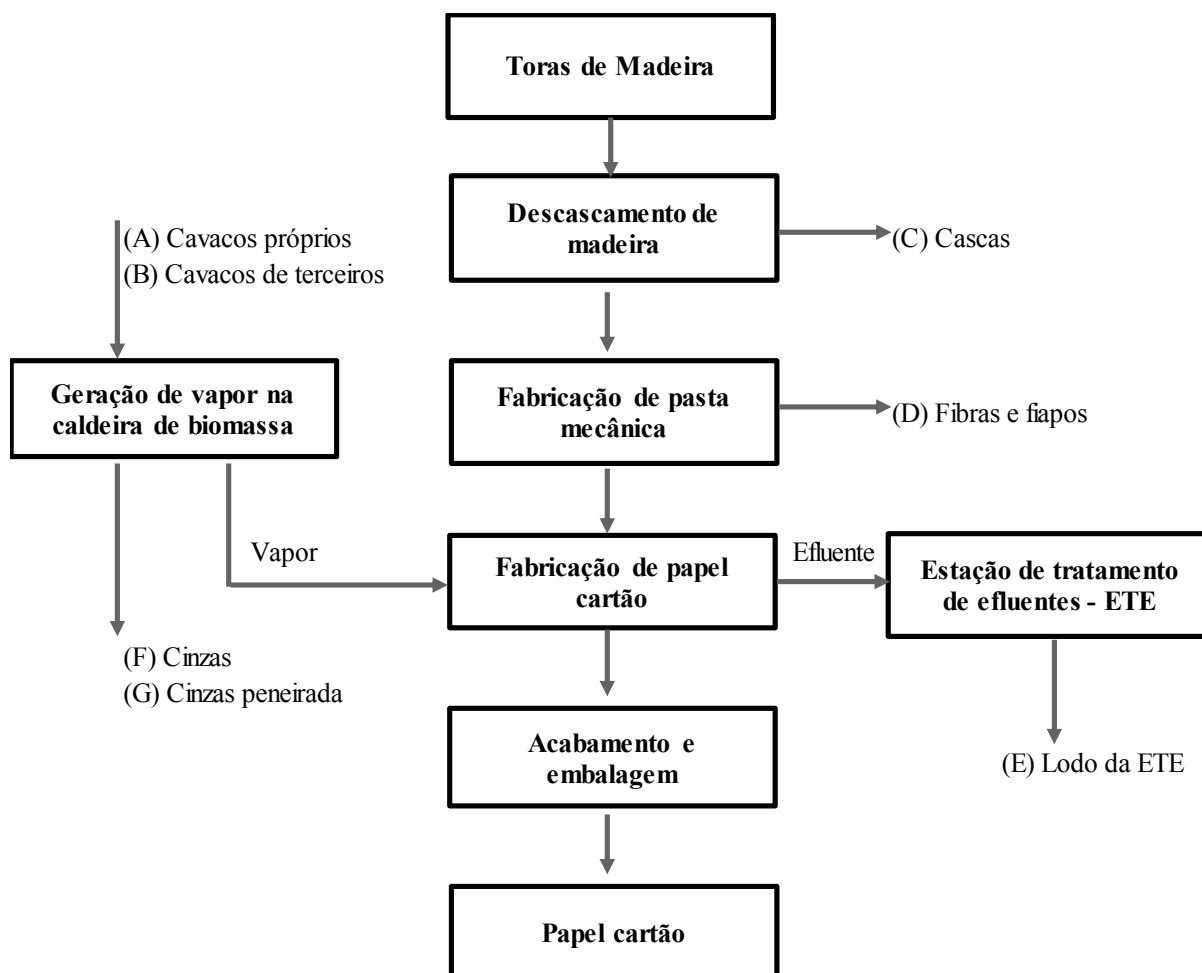
Na fábrica de papel-cartão do estudo, atualmente são utilizados dois tipos de combustíveis para queima e geração de cerca de 20 t/h de vapor na caldeira:

- cascas de madeira, provenientes do descascamento de toras para obtenção da pasta mecânica, e;

- cavacos de madeira, que podem ser de origem interna (da própria fábrica), obtidos pelo corte da madeira para fabricação de pasta mecânica, e de origem externa (cavaco de terceiros), provenientes de outras empresas da região.

O presente estudo avalia a possibilidade de utilização de resíduos celulósicos (lodo da ETE e fibras e fiapos) após secagem, em mistura com cavacos e cascas, para aumentar o poder calorífico da mistura, de modo a possibilitar a redução do consumo de cavacos, trazendo redução de custo de geração de vapor e, conseqüentemente, justificando um possível investimento num equipamento secador de resíduos.

A Figura 5 indica os pontos de amostragem dos combustíveis e resíduos, de acordo com o fluxograma de fabricação de papel-cartão. Cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B) e cascas de madeira (C) foram coletados nas pilhas de cavacos e cascas, que alimentam a caldeira de biomassa; as fibras e fiapos (D) foram coletadas na caçamba de resíduos da fábrica de pasta mecânica; o lodo da ETE (E) foi coletado na saída da centrífuga localizada na estação de tratamento de efluentes; as cinzas (F) e cinzas peneiradas (G) foram coletadas na saída da grelha rotativa da caldeira de biomassa.



**Figura 5** - Fluxograma simplificado da fabricação de papel-cartão indicando a origem dos materiais do estudo.

A Figura 6 ilustra os combustíveis normalmente utilizados e os resíduos do estudo: cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas de madeira (C), fibras e fiapos (D), lodo da ETE (E), cinzas (F) e cinzas peneiradas (G).



(A) Cavacos próprios



(B) Cavacos de terceiros



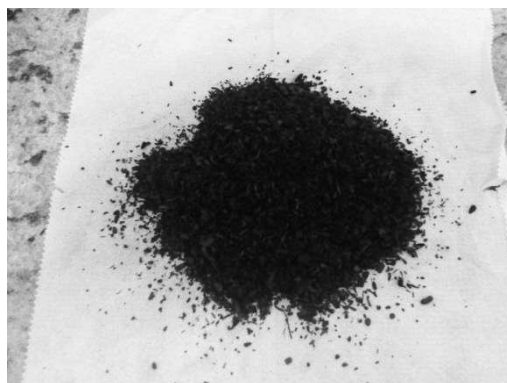
(C) Casca de pinus



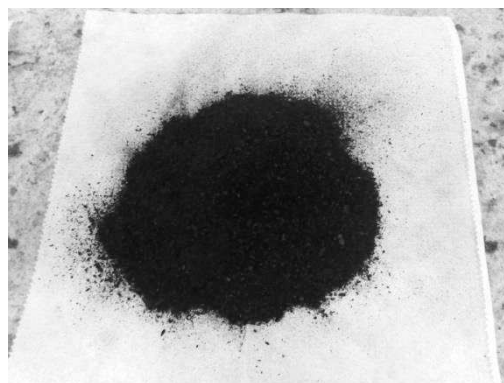
(D) Fibras e fiapos de madeira



(E) Lodo da ETE



(F) Cinzas da caldeira



(G) Cinzas peneiradas da caldeira

**Figura 6** – Combustíveis utilizados na produção de vapor e resíduos gerados no processo de fabricação de papel-cartão.

As amostras de combustíveis e resíduos foram caracterizadas por análise imediata (determinação do teor de carbono fixo, voláteis e cinzas em base seca), e por análise elementar (determinação dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio, por meio de espectrofotometria de ressonância magnética), para estimativa do poder calorífico, com o objetivo de elaborar o balanço da caldeira.

#### 4.2.1. Caracterização das amostras por análise imediata

As amostras de resíduos (de A a G) mencionadas na Figura 6 foram analisadas no laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais da Unicentro, para determinação da análise imediata, ou seja, determinação dos teores de voláteis (%V), cinzas (%A) e de carbono fixo (%CF), conforme metodologia para análise imediata de carvão vegetal regulamentado na NBR 8112 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986).

A partir dos resultados de análise imediata, foi estimado o poder calorífico superior (PCS) de cada amostra por correlação (PARIKH et al., 2005).

##### - Determinação do teor de umidade em base seca para cálculos da análise imediata

A determinação da umidade se fez necessária para que os teores de %V, %A e %CF, fossem determinados em base seca. Uma amostra de massa aproximada de 1 g, com granulometria de 42 a 60 *mesh*, foi seca à temperatura de  $100 \pm 3$  °C, até obtenção de massa constante. Todas as análises foram realizadas em triplicata, utilizando-se da Equação 1, para cálculo da umidade percentual.

$$\%U = \left( \frac{mi - ms}{mi} \right) \cdot 100 \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

*%U*: umidade da amostra, %

*mi*: massa inicial da amostra, g

*ms*: massa da amostra seca, g



*- Determinação do teor de voláteis, cinzas e carbono fixo*

A análise imediata de um combustível, em base seca, fornece a porcentagem de material volátil, de cinzas e de carbono fixo. O teor de voláteis (%V), foi obtido após pirólise em forno mufla a 600 °C por 10 minutos e calculado conforme Equação 2.

$$\%V = \frac{(mm - mc)}{mm} \cdot 100 \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde:

*%V: teor de voláteis, %*

*mm: massa aproximada de 4,0 g da amostra antes da pirólise na mufla, g*

*mc: massa da amostra após pirólise, g*

O teor de cinzas (%A) foi determinado pela quantificação do resíduo após pirólise a 700 °C por 6 horas, em forno mufla e calculado pela Equação 3.

$$\%A = 100 \cdot \left( \frac{mr}{ms} \right) \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde:

*%A: teor de cinzas, %*

*ms: massa aproximada de 4,0 g de amostra seca antes da pirólise, g*

*mr: massa da amostra após pirólise, g*

Já o teor de carbono fixo (%CF) é uma medida indireta, obtido a partir dos teores de voláteis e de cinzas, pela Equação 4.

$$\%CF = 100 - (\%A + \%V) \quad \text{(Equação 4)}$$

Utilizou-se o Minitab<sup>®</sup> para analisar os resultados através de ANOVA – Análise de Variância, pelo teste de Tukey com nível de significância de 5% e verificar se há diferença estatística entre as médias dos teores de carbono fixo, voláteis e cinzas das amostras.

#### 4.2.2. Estimativa do poder calorífico a partir da análise imediata

O poder calorífico superior (PCS) de um combustível, é a quantidade de energia total liberada na combustão completa por unidade de massa, a volume constante, considerando que a água de formação (água formada pela oxidação do hidrogênio molecular) e da umidade da biomassa são condensadas. O poder calorífico inferior (PCI), é a quantidade de calor liberado na combustão por unidade de massa de combustível, considerando que a água formada na combustão do hidrogênio não é condensada (DOAT, 1977, p. 34).

O PCS de combustíveis sólidos pode ser estimado por meio de análise imediata utilizando-se a Equação 5, sendo, %V o teor de voláteis, %A o teor de cinzas e %CF o teor de carbono fixo (PARIKH et al., 2005).

$$PCS\left(\frac{kcal}{kg}\right) = 84,5104 \cdot \%CF + 37,2601 \cdot \%V - 1,8642 \cdot \%A \quad \text{(Equação 5)}$$

O PCI considera que a energia consumida na evaporação da água de formação é diminuída do PCS. O poder calorífico útil (PCU), é a quantidade líquida de calor liberado (PCS), descontada a quantidade de calor para evaporação da água de formação e da água da umidade do combustível (BRITO, 1993, apud GONÇALVES et al., 2009, p. 659). Desta forma, o PCU é a quantidade de calor útil liberado na combustão, utilizado para troca térmica e geração de vapor na caldeira.

O PCI e PCU foram calculados utilizando-se as Equações 6 e 7 (BRITO, 1993, apud GONÇALVES et al., 2009, p. 659).

$$PCI\left(\frac{kcal}{kg}\right) = PCS - \left[ 600 \cdot \left( \frac{9 \cdot \%H}{100} \right) \right] \quad \text{(Equação 6)}$$

$$PCU\left(\frac{kcal}{kg}\right) = PCI \cdot \left[ \frac{(100 - \%U)}{100} \right] - (6 \cdot \%U) \quad \text{(Equação 7)}$$

Onde:

*PCS: poder calorífico superior, base seca, kcal/kg*

*PCI: poder calorífico inferior, base seca, kcal/kg*

*PCU: poder calorífico útil, base úmida, kcal/kg*

*%H: teor de hidrogênio determinado pela análise elementar, %*

*%U: teor de umidade, %*

#### 4.2.3. Caracterização das amostras por análise elementar

A análise elementar fornece a composição de um combustível em termos percentuais de seus elementos básicos, C, H, N, S e O, sem o teor de umidade e de cinzas incluídos, de forma que é necessário fazer a conversão para a base úmida para que a soma dos termos da análise elementar, mais a umidade e cinzas seja igual a 100% (BASU, 2010).

Neste trabalho, os resultados da análise elementar foram utilizadas para estimar o PCS das amostras, valores estes utilizados para elaborar o balanço térmico da caldeira.

As amostras de combustíveis e resíduos mencionadas na Figura 6 (A a G), foram analisadas no laboratório de Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus de Campo Mourão, no analisador EuroVector CHNS-O, EA3000 *Elemental Analyzer*. Foram determinados os percentuais de carbono (%C), hidrogênio (%H), nitrogênio (%N) e enxofre (%S). O teor de oxigênio (%O) foi determinado por diferença, considerando-se que esses elementos compõem 100% da amostra.

A composição de um combustível sólido pode ser expressa na base úmida (tal qual recebido), na base seca, ou na base combustível. A Equação 8 resume a composição de um combustível na base úmida, em função da análise elementar (LORA et al., 2012).

$$\%C^u + \%H^u + \%N^u + \%S^u + \%O^u + \%U^u + \%A^u = 100\% \quad \text{(Equação 8)}$$

A Equação 9 apresenta a composição de um combustível na base seca,

$$\%C^s + \%H^s + \%N^s + \%S^s + \%O^s + \%A^s = 100\% \quad \text{(Equação 9)}$$

A composição do combustível, na base combustível, é expressa sem umidade e cinzas, conforme Equação 10.

$$\%C^c + \%H^c + \%N^c + \%S^c + \%O^c = 100\% \quad \text{(Equação 10)}$$

A partir dos resultados de análise elementar na base combustível (obtidos pelo EuroVector CHNS-O), utilizaram-se os resultados de teor de cinzas da análise imediata, para converter os resultados de base combustível para base seca, por meio da Equação 11 (SOLER; LORA, 1991).

$$\%C_s = \%C_c \cdot \left( \frac{100 - \%A}{100} \right) \quad \text{(Equação 11)}$$

Onde,

$\%C_c$ : teor de carbono na base combustível, %

$\%C_s$ : teor de carbono na base seca, %

$\%A$ : teor de cinzas, %

Da mesma forma, os teores de  $\%N^c$ ,  $\%H^c$ ,  $\%S^c$  e  $\%O^c$  (todos na base combustível), foram convertidos de base combustível para base seca.

#### 4.2.4. Estimativa do poder calorífico superior (PCS) das amostras a partir da análise elementar

Existem várias equações que permitem calcular o poder calorífico superior (PCS), a partir de dados da composição elementar do combustível. A Equação 12, desenvolvida pela Agência Internacional de Energia, fornece uma boa estimativa do poder calorífico superior do combustível na base seca, com erro médio de 1,8%, menor que o valor obtido em calorímetro (CORTEZ et al., 2009; LORA; VENTURINI, 2012).

$$PCS \left( \frac{MJ}{kg} \right) = 0,3491 \cdot \%C^S + 1,1783 \cdot \%H^S + 0,1005 \cdot \%S^S - 0,0151 \cdot \%N^S - 0,1034 \cdot \%O^S - 0,0211 \cdot \%A^S \quad \text{(Equação 12)}$$

Onde:

*PCS: poder calorífico superior na base seca, MJ/kg,*

*%C<sup>s</sup>: teor de carbono na base seca, %*

*%H<sup>s</sup>: teor de hidrogênio na base seca, %*

*%S<sup>s</sup>: teor de enxofre na base seca, %*

*%N<sup>s</sup>: teor de nitrogênio na base seca, %*

*%O<sup>s</sup>: teor de oxigênio na base seca, %*

*%A<sup>s</sup>: teor de cinzas na base seca, %*

A partir de resultados de análise elementar, calculou-se o PCS das amostras (A a G), utilizando-se a Equação 12. Os valores de PCI e PCU das amostras foram obtidos a partir do PCS, calculados por meio das Equações 6 e 7, utilizando-se o teor de hidrogênio (%H) da análise elementar e o teor de umidade médio das amostras, tal como recebidas na fábrica e após a secagem.

Para avaliação do potencial de aproveitamento energético dos resíduos; lodo da ETE e fibras e fiapos após secagem, é elaborado o balanço de massa e térmico da caldeira considerando-se os combustíveis atualmente utilizados; cavacos próprios, de terceiros, cascas e fibras e fiapos úmido, para se obter a quantidade de energia gerada na combustão, as perdas de calor pela chaminé e perdas de calor na remoção de cinzas da fornalha. A quantidade de energia perdida na chaminé indica se a quantidade de calor emitida pela chaminé é suficiente para secar os resíduos até a umidade pretendida. A segunda parte do balanço, simulando o uso do calor residual da chaminé da fornalha da caldeira no processo de secagem, considera a introdução dos resíduos com menor teor de umidade na mistura de combustíveis utilizados, para calcular a redução do consumo de cavacos e cascas, mantendo-se a mesma produção de vapor com os combustíveis normalmente utilizados.

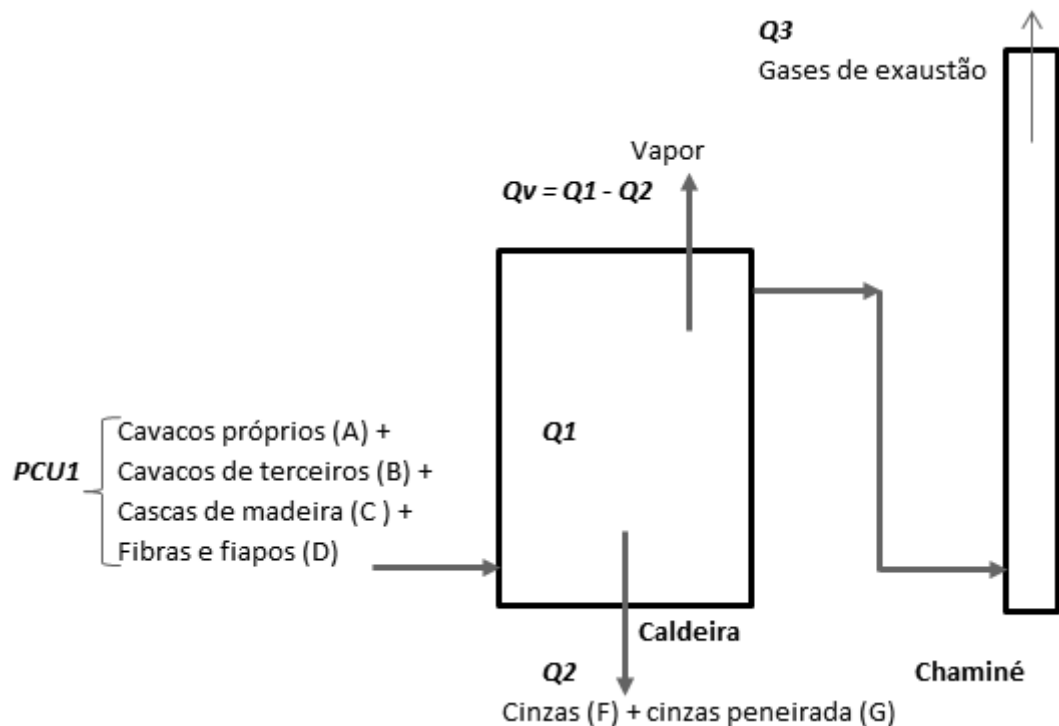
#### **4.3. Elaboração do balanço de massa e térmico da caldeira**

A elaboração do balanço de massa e térmico da caldeira se faz necessário para calcular a quantidade de energia emitida pelos gases de exaustão da chaminé, uma vez que parte destes gases pode ser aproveitado para secagem dos resíduos celulósicos em secador de biomassa, para aumentar o poder calorífico dos resíduos e permitir sua combustão em mistura com os combustíveis normalmente utilizados (cavacos e cascas de madeira). O balanço também

indicará o aumento de energia inserida na caldeira e a correspondente redução de cavacos e cascas, mantendo-se a mesma geração de vapor. Esta redução de combustível é a base para análise de viabilidade de investimento com instalação de um secador de biomassa.

4.3.1. *Cálculo do PCI, PCU e da quantidade de energia liberada na combustão ( $Q$ ), de cada componente combustível introduzido na caldeira*

O balanço de massa e calor da caldeira consiste no cálculo da quantidade de calor disponível para produzir vapor a partir dos combustíveis normalmente utilizados. Conforme demonstrado na Figura 7, a quantidade total de energia liberada ( $Q_1$ ) na combustão, é a soma das energias liberadas na queima de cada combustível introduzido na caldeira: cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas de madeira (C) e fibras e fiapos (D), sendo  $Q_2$  a quantidade de energia removida com as cinzas,  $Q_v$  a quantidade de energia líquida disponível para geração de vapor e  $Q_3$  a quantidade de energia liberada na chaminé.



**Figura 7** – Combustíveis atualmente introduzidos na caldeira na base úmida: cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas de madeira (C) e fibras e fiapos (D).

A partir do  $PCSi$  do combustível  $i$ , calculou-se o  $PCI_i$ , considerando-se o teor de hidrogênio  $\%Hi$  obtido da análise elementar e o  $PCUi$ , considerando-se a umidade do mesmo combustível, por meio das Equações 6 e 7.

A quantidade de energia liberada  $Qi$  (Mcal/d), pelo combustível  $i$ , é obtida pela multiplicação do  $PCUi$  (kcal/kg) do combustível  $i$ , pela quantidade do mesmo combustível inserido na caldeira em toneladas por dia,  $Mi$  (t/d), conforme Equação 13.

$$Qi \left( \frac{Mcal}{d} \right) = Mi \left( \frac{t}{d} \right) \cdot PCUi \left( \frac{kcal}{kg} \right) \quad \text{(Equação 13)}$$

Desta forma foram calculados o PCI, PCU e as quantidades de energia liberadas para os combustíveis A a G, obtendo-se  $QA$  a  $QG$ . A quantidade total de energia inserida na caldeira ( $Q_1$ ), foi obtida pela soma das energias liberadas de cada combustível queimado: cavacos próprios ( $QA$ ), cavacos de terceiros ( $QB$ ), cascas de madeira ( $QC$ ) e fibras e fiapos ( $QD$ ), conforme Equação 14.

$$Q_1 \left( \frac{Mcal}{d} \right) = QA + QB + QC + QD \quad \text{(Equação 14)}$$

A quantidade de energia de cinzas ( $QF$ ) e cinzas peneiradas ( $QG$ ), removidas no fundo da fornalha da caldeira constituem perda de energia ( $Q_2$ ) e foi deduzida da quantidade total de energia inserida ( $Q_1$ ). Uma vez que não foram totalmente queimadas, não contribuindo para geração de vapor, o cálculo da perda de energia foi realizado pela Equação 15.

$$Q_2 \left( \frac{Mcal}{d} \right) = QF + QG \quad \text{(Equação 15)}$$

Em seguida, calculou-se a quantidade de energia disponível para geração de vapor ( $Qv$ ), que é a quantidade total de energia inserida na caldeira ( $Q_1$ ), menos a quantidade de energia removida com as cinzas ( $Q_2$ ), de acordo com a Equação 16.

$$Qv \left( \frac{Mcal}{d} \right) = Q_1 - Q_2 \quad \text{(Equação 16)}$$

Os gases quentes emitidos pela chaminé contém calor ( $Q_3$ ), que é perdido para a atmosfera. A perda de calor nas caldeiras de biomassa modernas, que utilizam bagaço de cana como combustível, é de 15% da energia inserida na caldeira (LORA; ZAMPIERI, 2008, p. 174).

No balanço, adotou-se a perda de calor de 12% do total de energia inserida, por ser mais conservador com relação à quantidade de energia perdida, disponibilizando menor quantidade de energia para secagem dos resíduos, conforme Equação 17.

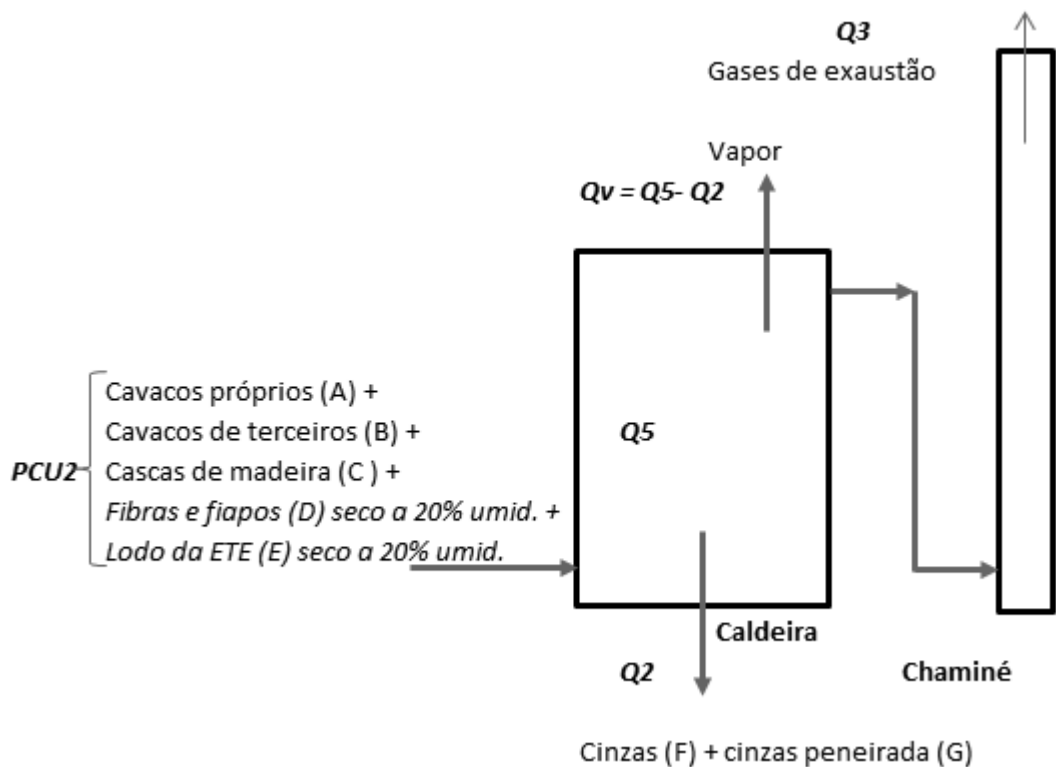
$$Q_3 \left( \frac{Mcal}{d} \right) = \frac{12 \cdot Q_1}{100} \quad \text{(Equação 17)}$$

Parte dessa energia liberada pela chaminé para atmosfera, pode ser utilizada para secagem de fibras e fiapos de madeira (D) e do lodo da ETE (E), para aumentar o poder calorífico destes resíduos.

O teor de umidade sugerido para a queima dos resíduos é de 20%, pois valores de umidade superiores reduzem o calor liberado na combustão, a temperatura da fornalha da caldeira e a temperatura dos gases de exaustão (FARINHAQUE, 1981 apud, GONÇALVES et al., 2009). Sendo assim, a umidade final adotada para os resíduos após secagem foi de 20%, considerando-se possível secagem em secador do tipo tambor rotativo ou de leito fluidizado.

Na Figura 8 é apresentada a caldeira para o balanço, com introdução de 1,5% de fibras e fiapos e 6,5% de lodo da ETE após secagem a 20% de umidade, para combustão em mistura com 89,8% de cavacos e 2,4% de cascas de madeira, com o objetivo de calcular a nova quantidade de calor liberada na combustão ( $Q_5$ ). Para se manter a mesma produção de vapor  $Q_v$ , há redução da quantidade de cavacos na alimentação da caldeira, devido ao aumento do PCU médio com a introdução dos resíduos a 20% de umidade.





**Figura 8** – Introdução de fibras e fiapos (D) e de lodo da ETE (E) após secagem, para combustão em mistura com cavacos (A), cavacos de terceiros (B) e cascas de madeira(C).

A Equação 13 permitiu calcular a quantidade de energia liberada na combustão com a introdução de fibras e fiapos ( $Q_{DS}$ ) e lodo da ETE ( $Q_{ES}$ ), ambos a 20% de teor de umidade.

Em seguida, calculou-se a quantidade de energia inserida na caldeira, com a introdução de fibras e fiapos (D) e lodo da ETE (E) secos, por meio da Equação 18.

$$Q_5 \left( \frac{Mcal}{d} \right) = Q_A + Q_B + Q_C + Q_{DS} + Q_{ES} \quad \text{(Equação 18)}$$

A quantidade de energia disponível ( $Q_6$ ) para geração de vapor, devido ao aumento do poder calorífico útil (PCU) de fibras e fiapos e do lodo da ETE, ambos na umidade de 20%, é calculado pela Equação 19.

$$Q_6 \left( \frac{Mcal}{d} \right) = Q_5 - Q_1 = Q_{DS} + Q_{ES} - Q_D \quad \text{(Equação 19)}$$

Pela Equação 20 é calculado o percentual de aumento de energia liberada na combustão dos resíduos secos, %Q, em relação à quantidade de energia liberada na combustão de cavacos e cascas (Q<sub>1</sub>).

$$\%Q = \left( \frac{Q_6}{Q_1} \right) \cdot 100 \quad \text{(Equação 20)}$$

#### 4.3.2. Cálculo da energia calorífica para evaporar água para secagem dos resíduos

A massa de água a ser evaporada (M<sub>4</sub>), para secar a quantidade de fibras e fiapos de madeira (M<sub>D</sub>), de 80% para 20% e para secar a quantidade de lodo de ETE (M<sub>E</sub>), de 55% para 20%, é calculada pela Equação 21.

$$M_4 \left( \frac{kg}{d} \right) = 1000 \cdot [M_D \cdot (0,80 - 0,20) + M_E \cdot (0,55 - 0,20)] \quad \text{(Equação 21)}$$

O cálculo da quantidade de energia (Q<sub>4</sub>), necessária para evaporar a água (M<sub>4</sub>), corresponde à quantidade de calor para aquecer a água de umidade dos resíduos, da temperatura ambiente (25°C) à 100°C, mais a quantidade de calor latente para evaporar a água durante a secagem. A entalpia de vaporização da água (L), considerada na pressão de vapor de 10 kgf/cm<sup>2</sup>, é 615 kcal/kg. O calor necessário é calculado conforme a Equação 22.

$$Q_4 \left( \frac{Mcal}{d} \right) = M_4 \cdot c \cdot (100 - 25) + M_4 \cdot L \quad \text{(Equação 22)}$$

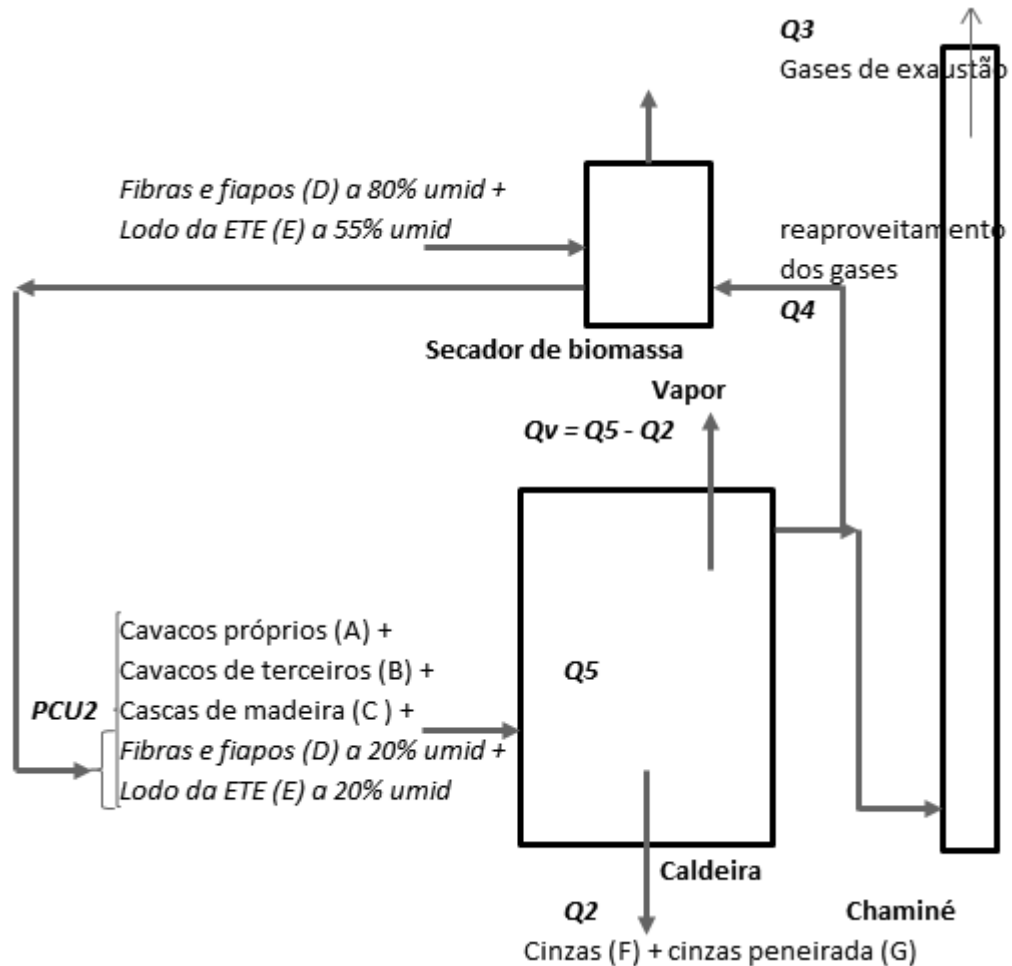
Onde,

*C*, calor específico da água, considerado 1 kcal/kg. °C.

Então, obtém-se o percentual de energia a ser utilizada (%Q<sub>s</sub>) para secagem de fibras e fiapos e lodo da ETE do total de energia liberada pela chaminé (Q<sub>3</sub>), conforme Equação 23.

$$\%Q_s = \frac{Q_4}{Q_3} \cdot 100 \quad \text{(Equação 23)}$$

A Figura 9 apresenta o fluxograma simplificado da recirculação de gases da chaminé da caldeira para secar os resíduos, para posterior queima em mistura com os combustíveis normalmente utilizados.



**Figura 9** – Secagem dos resíduos com aproveitamento dos gases da chaminé, para queima em mistura com combustíveis normalmente utilizados.

#### 4.3.3. Cálculo do consumo de combustível, em função da geração de vapor e do rendimento da caldeira

O consumo de combustível de uma caldeira, para uma determinada produção de vapor, é função da diferença de entalpia para evaporação da água na pressão de vapor considerado, do rendimento térmico da caldeira e do poder calorífico útil do combustível, conforme Equação 24 (PERA, 1990).

(Equação 24)

$$Q_c = Q_v \cdot \left( \frac{h_v - h_a}{\eta \cdot PCU_t} \right)$$

Onde,

$Q_c$ : quantidade de combustível alimentada na caldeira, kg/h

$Q_v$ : quantidade de vapor gerado com a queima do combustível, kg/h

$h_v$ : entalpia do vapor na pressão de vapor de 10 kgf/cm<sup>2</sup>, 663,8 kcal/kg

$h_a$ : entalpia da água a 25° C, 23,81 kcal/kg

$\eta$ : rendimento térmico médio da caldeira considerado

$PCU_t$ : poder calorífico útil da mistura de combustíveis na umidade que são alimentados à caldeira, kcal/kg.

#### 4.3.4. Cálculo do consumo de combustível com a queima de combustíveis normalmente utilizados

O poder calorífico útil  $PCU_1$ , da mistura de combustíveis normalmente utilizados; cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas de madeira (C) e fibras e fiapos (D), são dado pela média ponderada da fração percentual de combustíveis que entram na caldeira e dos PCU de cada combustível, conforme Equação 25.

$$PCU_1 = (PCU_A \cdot M_A + PCU_B \cdot M_B + PCU_C \cdot M_C + PCU_D \cdot M_D) \cdot 1/100 \quad \text{(Equação 25)}$$

Onde,

$PCU_A$ : poder calorífico útil de cavacos próprios (A),

$M_A$ : quantidade de cavacos próprios inseridos na caldeira...

... $PCU_D$ : poder calorífico útil de fibras e fiapos úmidos (D),

$M_D$ : quantidade de fibras e fiapos inseridos na caldeira

O consumo de combustível foi calculado para geração de 20,7 t/h de vapor na pressão de 10 kgf/cm<sup>2</sup> (produção média de vapor no período do estudo) e o rendimento térmico da caldeira considerado foram de 90,9%, resultado da média de seis medições por amostragem isocinética dos gases na chaminé da caldeira (laudos de análise da empresa).

O consumo de combustível ( $Q_{C1}$ ), antes da secagem, foi calculado utilizando-se o valor de  $PCU_1$ , por meio da Equação 24.

#### 4.3.5. Cálculo do consumo de combustível com a queima de combustíveis após secagem

O consumo de combustível com  $PCU_2$ , resultado da inserção de fibras e fiapos (D) e lodo da ETE (E) em mistura com cavacos e cascas, após secagem a 20% de umidade, foi calculado conforme a Equação 26.

$$PCU_2 = (PCU_A \cdot M_A + PCU_B \cdot M_B + PCU_C \cdot M_C + PCU_D \cdot M_D + PCU_E \cdot M_E) \cdot 1/100$$

**(Equação 26)**

E o consumo de combustível ( $Q_{C2}$ ), após secagem de fibras e fiapos (D) e do lodo da ETE (E), também foi calculado pela Equação 24.

Como  $PCU_2$  é maior que  $PCU_1$ , o consumo de cavacos com resíduos secos ( $Q_{C2}$ ) é menor do que o consumo de cavacos normalmente utilizados ( $Q_{C1}$ ), o que pode viabilizar a instalação de um secador de biomassa para secar os resíduos celulósicos. A redução do consumo de cavacos devido à introdução de fibras e fiapos e lodo da ETE secos a 20% de umidade é dado pela Equação 27.

$$Q_C = Q_{C1} - Q_{C2}$$

**(Equação 27)**

E a percentagem de redução de consumo de cavacos é obtida pela Equação 28.

$$\%Q_C = \left( \frac{Q_{C2}}{Q_{C1}} \right) \cdot 100$$

**(Equação 28)**

A partir da redução no consumo de cavacos, é analisada a viabilidade de investimento em equipamento de secagem, bem como elaborada comparação com investimentos em outras formas de aproveitamento dos resíduos, como produção de biogás ou bioetanol.

#### 4.4. Alternativas de aproveitamento energético de resíduo celulósico de fábrica de papel-cartão

Neste item é descrito o método de análise de retorno de investimento de alternativas de aproveitamento energético de resíduo celulósico de fábrica de papel-cartão e a descrição das alternativas consideradas: instalação de secador de biomassa, instalação de cobertura de área de estocagem de cavacos e cascas, geração de biogás a partir de fermentação de glicerina e resíduo (lodo da ETE) com inoculação de *Escherichia coli* e fermentação de glicerina com resíduo (lodo da ETE) com inoculação de *Escherichia coli* para obtenção de etanol.

##### 4.4.1. Cálculo do retorno do investimento para instalação de secador de biomassa

Para análise de retorno do investimento foram considerados, o valor do investimento para instalação de um secador de biomassa do tipo leito fluidizado, as despesas operacionais com energia elétrica, o custo estimado de manutenção do secador e a economia líquida com a queima de resíduos secos. As despesas operacionais e custo de manutenção, devem ser deduzidas do valor de redução de custo para obtenção da economia líquida anual.

O retorno do investimento em anos, é o tempo necessário para que o equipamento retorne com a receita, o valor investido, calculado pela divisão do valor do investimento pela redução de custo anual, conforme apresentado no Quadro 3.

**Quadro 3** - Modelo de cálculo do retorno de investimento, como exemplo a instalação de secador de biomassa.

Descrição	Unidade	Valor
1. Valor do investimento com secador de biomassa	R\$	(I)
2. Redução de custo com menor consumo de cavacos	R\$/a	(II)
3. Custos operacionais e de manutenção	R\$/a	(III)
4. Economia líquida anual com a queima de resíduos secos	R\$/ano	(IV) = (II) – (III)
5. Retorno do investimento	anos	(I) / (IV)

O cálculo do retorno de investimento é um indicador para decisão de investimento em ativo, em função dos ganhos esperados.

Outras formas de aproveitamento também são discutidas, como instalação de cobertura na área de estocagem de cavacos e cascas, para evitar aumento de umidade com as chuvas e, conseqüentemente, redução do poder calorífico útil, bem como a possibilidade de geração de biogás ou bioetanol a partir da fermentação da glicerina por micro-organismos *Escherichia coli* em mistura do lodo da ETE.

#### 4.4.2. Viabilidade de cobertura da área de estocagem de cavacos e cascas de madeira para evitar redução do poder calorífico pela absorção de umidade devido às chuvas

A cobertura da área de estocagem de cavacos e cascas pode reduzir o consumo de cavacos, uma vez que se evita a redução do poder calorífico dos combustíveis com aumento de umidade com as chuvas. A análise considera o custo para construir o galpão para abrigar a biomassa e a redução do consumo de cavacos, para calcular o tempo de retorno do investimento.

#### 4.4.3. Geração de biogás pela fermentação de resíduo celulósico em mistura com glicerina

Uma alternativa para reduzir o impacto ambiental e comercial que envolve a glicerina bruta residual do biodiesel é sua utilização de forma direta. O aproveitamento de resíduos da indústria de celulose e papel também permite reduzir custos e problemas ambientais. O metano, produzido na conversão microbiológica destes resíduos, pode ser reaproveitado energeticamente. Hermmann et al., (2014), obtiveram metano (CH<sub>4</sub>) e hidrogênio (H<sub>2</sub>) a partir da fermentação anaeróbica da glicerina bruta em mistura com resíduos celulósicos (lodo da ETE) por micro-organismo específico, *Escherichia coli*. A partir de planejamento experimental, realizaram ensaios com uma quantidade fixa de glicerina, variando-se as concentrações do micro-organismo e do lodo da ETE. Após 72 horas de fermentação, registrou-se a melhor produção de metano (25% V/V), utilizando-se 5 mL do micro-organismo e 30% de lodo da ETE (HERRMANN et al, 2014). A viabilidade de utilização do metano foi analisada em função do poder calorífico do metano na proporção gerada no experimento, como possibilidade de aproveitamento energético do resíduo celulósico.

#### 4.4.4. Geração de etanol pela fermentação de resíduo celulósico em mistura com glicerina.

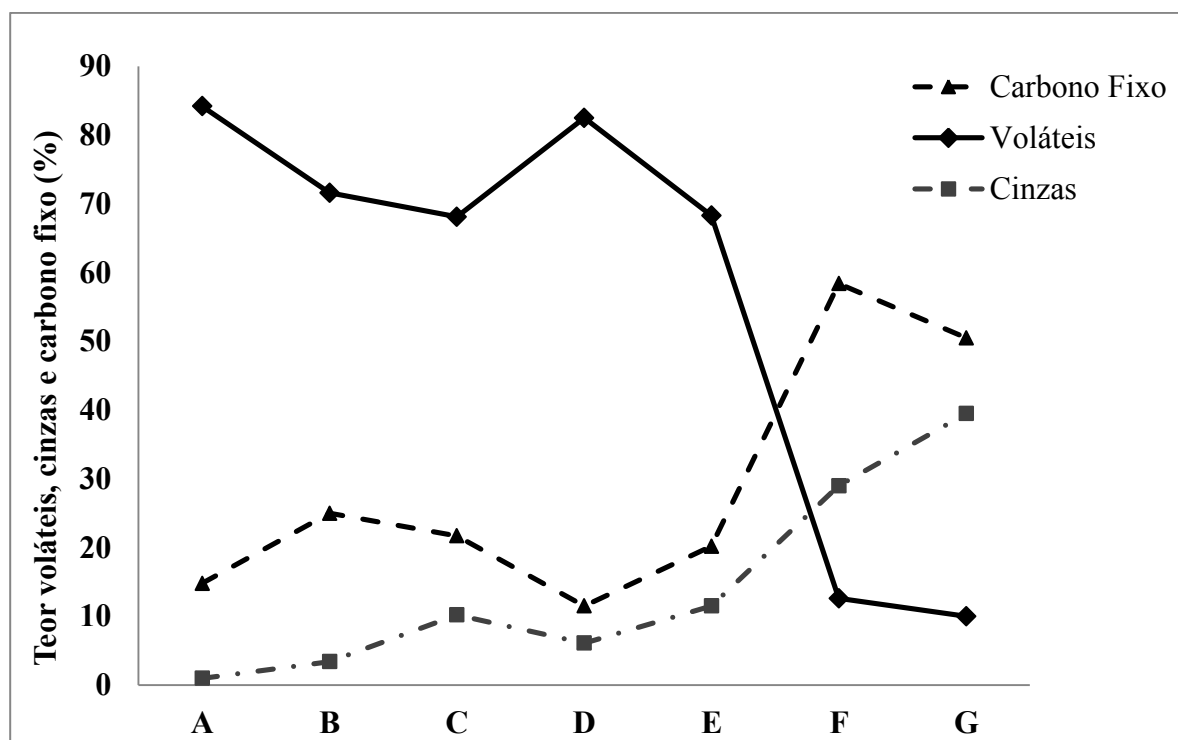
O etanol é um biocombustível produzido a partir de diversas matérias-primas, sendo a principal a cana-de-açúcar. O etanol também pode ser obtido a partir de resíduos industriais, como o glicerol do biodiesel e de resíduos da indústria de papel. Esses resíduos industriais apresentam em sua composição considerável concentração de carbono, podendo ser utilizados em processos de fermentação. Kovalski et al. (2014), obtiveram etanol por fermentação anaeróbica do glicerol e de resíduos da indústria de papel-cartão (lodo da ETE), utilizando-se um micro-organismo específico, a *Escherichia coli*. O planejamento experimental do processo de fermentação foi realizado por 72 horas a  $36\text{ °C} \pm 0,5$ . Os resultados mostraram tendência de maior produção de etanol nos ensaios com 2 g de resíduo celulósico (lodo da ETE) e 4 mL de micro-organismo. Os maiores teores de etanol obtidos foram de 81 e 83 °GL (KOVALSKI et al., 2014). A análise de investimento para esta alternativa contempla a instalação de uma microdestilaria de 650 L de álcool por dia.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Resultados da análise imediata

Os resultados da análise imediata: teor de voláteis (%V), teor de cinzas (%A) e de carbono fixo (%CF), são apresentados na Figura 10, determinados pelas Equações 1 a 4.



**Figura 10** - Análise imediata (teor de voláteis, cinzas e carbono fixo) de cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas de madeira (C), fibras e fiapos (D), lodo da ETE (E), cinzas (F) e cinzas peneiradas (G).

A observação da Figura 10 indica dois grupos distintos: as amostras de cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas (C), fibras e fiapos (D) e lodo da ETE (E), apresentaram alto teor de voláteis e baixo teor de cinzas e de carbono fixo. Já as amostras de cinzas (F) e cinzas peneiradas (G), apresentaram baixo teor de voláteis e alto teor de cinzas e de carbono fixo. Esse resultado se encontra dentro do esperado, uma vez que combustíveis à base de biomassa (amostras A a E), no processo de queima, convertem em média três quartos de sua massa em compostos voláteis, gerando chamas largas e grande produção de fumaça. A cinza é um produto residual da queima da biomassa na fornalha da caldeira (amostras F e G)

sendo uma fração rica em compostos inorgânicos e pobre em compostos orgânicos pirolisados (cinzas), apresentando desta forma baixo teor de voláteis, alto teor de cinzas e de carbono fixo, comparada à biomassa de partida.

## 5.2. Resultados da análise elementar

Neste item são utilizados os resultados das análises de amostras (análise imediata, análise elementar e análise por microscopia eletrônica) dos combustíveis e resíduos celulósicos, para determinação da composição completa dos materiais, necessária para estimar o poder calorífico superior (PCS).

A análise elementar fornece a composição de um combustível em termos percentuais de seus elementos básicos, C, H, N, S e O, sem o teor de umidade e de cinzas, de forma que a soma dos termos da análise elementar mais a umidade e cinzas é igual a 100% (BASU, 2010).

A Tabela 2 apresenta os resultados da composição elementar, na base combustível, das amostras analisadas, sendo o teor de oxigênio obtido por diferença, de acordo com a Equação 10.

**Tabela 2** - Análise elementar dos materiais na base combustível.

Ident	Material	Análise elementar na base combustível (% m/m)				
		C	H	N	S	O
A	Cavacos próprios	57,34	5,39	0,00	0,03	37,24
B	Cavacos terceiros	52,09	3,44	0,00	0,03	44,44
C	Cascas de madeira	52,25	7,63	0,00	0,03	40,09
D	Fibras/fiapos	46,01	7,57	0,00	0,02	46,40
E	Lodo da ETE	39,72	6,19	0,00	0,03	54,06
F	Cinzas	51,24	< 1,00	0,00	0,22	47,54
G	Cinzas peneirada	48,45	< 1,00	0,00	0,20	50,35

\* Teores de N e S obtidos por MEV no aparelho VEGA3 TESCAN.

Os teores de nitrogênio (N) e enxofre (S) deram menor que uma parte por milhão (1,0 ppm), não tendo sido detectados no espectrofotômetro com o padrão utilizado. Para confirmação destes resultados, as amostras foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando-se o equipamento VEGA3 TESCAN, no laboratório AMBIOTEC da Unicentro.

Na Tabela 3, são apresentados os resultados da análise elementar convertidos da base

combustível para a base seca, utilizando-se a Equação 11.

**Tabela 3** - Análise elementar dos materiais convertidos para base seca, com teores de cinzas obtidos da análise imediata.

Ident	Material	Análise elementar na base seca (% m/m)					
		C	H	N	S	O	%Cinzas
A	Cavacos próprios	56,77	5,34	0,00	0,03	36,87	1,00
B	Cavacos terceiros	50,32	3,32	0,00	0,03	42,93	3,40
C	Cascas de madeira	46,92	6,85	0,00	0,03	36,00	10,20
D	Fibras/fiapos	43,20	7,11	0,00	0,02	43,57	6,10
E	Lodo da ETE	35,15	5,48	0,00	0,03	47,84	11,50
F	Cinzas	36,38	0,71	0,00	0,16	33,75	29,00
G	Cinzas peneirada	29,31	0,61	0,00	0,12	30,46	39,50

Os elementos químicos constituintes da biomassa, que contribuem para a combustão gerando calor são carbono, hidrogênio e enxofre. Como o teor de enxofre na madeira geralmente é muito baixo, menor que 1,0%, os teores de carbono e hidrogênio definem a qualidade do combustível. Já a umidade, cinzas, oxigênio e nitrogênio constituem a fração incombustível e não fornecem calor durante a combustão (TILLMAN et al., 1981).

O lodo da ETE apresentou menor teor de carbono que cavacos próprios, cavacos de terceiros, cascas e fibras e fiapos, como consequência do maior teor de cinzas, uma vez que parte da carga mineral utilizada no papel-cartão não fica retida na folha, sendo coletada na estação de tratamento de efluentes. O teor de hidrogênio do material foi da mesma ordem de grandeza do teor de hidrogênio de cavacos, cascas e fibras e fiapos. Os resultados de C e H indicam que o lodo da ETE pode apresentar poder calorífico suficiente para geração de calor na combustão.

As cinzas e cinzas peneiradas, obtidas na descarga da grelha rotativa da caldeira, são resíduos da combustão completa da biomassa, uma vez que a caldeira trabalha com excesso de ar. Os baixos teores de carbono e de hidrogênio e maiores teores de cinzas, contribuíram para que cinzas e cinzas peneiradas apresentassem menor poder calorífico do que cavacos, cascas e fibras e fiapos, conforme observado na Tabela 4.

### 5.3. Resultados da estimativa do poder calorífico por correlação da análise imediata e análise elementar

O PCS corresponde à totalidade do calor liberado na combustão, sendo um valor teórico que varia com a composição química da madeira (CHANNIWALA, 2002). O PCS foi estimado a partir da análise imediata e a partir da análise elementar por meio das Equações 5 e 12, respectivamente.

De acordo com a Tabela 4, o PCS obtido pela análise elementar de fibras e fiapos é da mesma ordem de grandeza que o PCS de cavacos e cascas. O PCS do lodo da ETE é menor do que de cavacos e cascas e maior do que o PCS de cinzas, indicando que tanto fibras e fiapos, quanto lodo da ETE apresenta potencial como combustíveis para a caldeira.

**Tabela 4** - Comparação do poder calorífico superior (PCS), estimados a partir dos resultados de análise imediata e análise elementar.

Ident	Material	PCS (Análise imediata)		PCS (Análise elementar)	
		MJ/kg (*)	kcal/kg	MJ/kg (*)	kcal/kg
A	Cavacos próprios	18,35	4386,2	22,27	5323,6
B	Cavacos terceiros	19,98	4774,2	16,97	4056,8
C	Cascas de madeira	18,21	4352,3	20,52	4903,9
D	Fibras/fiapos	16,88	<b>4034,5</b>	18,83	<b>4499,4</b>
E	Lodo da ETE	17,70	<b>4230,5</b>	13,54	<b>3236,0</b>
F	Cinzas	22,39	5350,8	9,45	2258,7
G	Cinzas peneirada	19,11	4566,7	6,97	1667,0

\* Para converter de MJ/kg para kcal/kg, multiplicou-se o valor em MJ/kg por 239.

A análise elementar, por ser mais representativa da composição da biomassa do que a análise imediata, resulta na melhor estimativa do poder calorífico e foi a metodologia escolhida para determinação do PCS, para elaboração do balanço de massa e térmico da caldeira.

### 5.4. Elaboração do balanço de massa e térmico da caldeira

Neste item é calculada a energia liberada na combustão com a queima dos combustíveis atualmente utilizados na caldeira e a energia liberada na combustão com a introdução dos resíduos secos. O aumento da energia liberada reflete-se na redução do

consumo de cavacos, principal resultado para avaliação de viabilidade de secagem dos resíduos.

5.4.1. *Cálculo do PCI, PCU e da quantidade de energia liberada na combustão (Qi), de cada componente combustível introduzido na caldeira*

A partir dos consumos, umidade média mensais dos materiais e dos valores de PCS estimados na Tabela 4 calcularam-se o PCI e PCU médios por meio das Equações 6 e 7, respectivamente. A quantidade de energia inserida na caldeira (Qi) com a queima de cada combustível foi calculada utilizando-se a Equação 13, conforme mostrado na Tabela 5.

**Tabela 5** – Cálculo do PCI, PCU e energia liberada na combustão (Qi) de cada combustível considerado no estudo, a partir de consumos e umidades médias mensais.

<b>Ident</b>	<b>Material</b>	<b>Cons t/d</b>	<b>Umid %</b>	<b>PCS kcal/kg</b>	<b>PCI kcal/kg</b>	<b>PCUum kcal/kg</b>	<b>Qi Mcal/d</b>
<b>A</b>	Cavacos próprios	4,3	38,5	5323,6	5035,5	2868,2	12354,0
<b>B</b>	Cavacos terceiros	145,9	53,4	4056,8	3877,4	1484,9	215153,5
<b>C</b>	Cascas	4,5	57,4	4903,9	4533,9	1589,5	6996,2
<b>D</b>	Fibras/fiapos	12,8	80,0	<b>4499,4</b>	4115,6	<b>343,1</b>	4386,1
<b>E</b>	Lodo da ETE	22,7	55,0	<b>3236,0</b>	2940,1	<b>993,1</b>	-
<b>F</b>	Cinzas	0,9	10,3	2258,7	2220,4	1931,0	1540,5
<b>G</b>	Cinzas peneiradas	0,9	4,7	1667,0	1634,3	1528,6	

\* PCI calculados pela Equação 6, PCU calculados pela Equação 7, Qi calculados pela Equação 13.

Da Tabela 5, observa-se que o PCU médio de cavacos próprios deu 2868,2 kcal/kg, valor 93,1% maior do que o de cavacos de terceiros 1484,9 kcal/kg, sendo ambos provenientes do mesmo tipo de madeira. Isto se deve ao tempo de estocagem de toras de madeira (por períodos de dois a quatro meses), que não serviram para fabricação de pasta e foram destinadas à produção de cavacos próprios, contribuindo para a secagem das toras e aumento do PCU desses cavacos. As cascas apresentaram PCS de 4903,9 kcal/kg, no entanto, devido à umidade média de 57,4%, o PCU<sub>C</sub> das cascas foi de apenas 1589,5 kcal/kg.

As fibras e fiapos úmidos são queimados na caldeira a 80% de umidade, daí seu baixo poder calorífico útil PCU<sub>DI</sub>, 343,1 kcal/kg, conseqüentemente a quantidade de calor liberado na combustão é muito baixa, apenas 4386,1 Mcal/d. Já o lodo da ETE, com umidade

de 55%,  $PCU_{E1}$ , caso fosse queimado na caldeira nesta umidade, liberaria 23203,7 Mcal/d, sendo atualmente enviado para disposição em aterro industrial e para co-processamento em fábrica de terceiro.

Da Tabela 5, o PCS de cinzas é 2258,7 kcal/kg e de cinzas peneiradas 1667,0 kcal/kg. A remoção das cinzas do fundo da fornalha contribui para remoção de calor ( $Q_2$ ), que deve ser deduzido do total de energia inserida na caldeira.

A energia total ( $Q_1$ ) liberada na combustão de cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas (C) e fibras e fiapos (D) foram de 233.826,7 Mcal/d, já descontada a perda de energia com a remoção de cinzas e cinzas peneiradas ( $Q_2$ ), 1540,5 Mcal/d.

De acordo com a Tabela 5, o PCS de fibras e fiapos foi 4499,4 kcal/kg, o do lodo da ETE foi de 3236,0 kcal/kg, o de cavacos de terceiros foi 4056,8 kcal/kg e das cascas foi 4903,9 kcal/kg, todos na mesma ordem de grandeza, indicando que a redução da umidade de fibras e fiapos e do lodo da ETE, poderia aumentar o poder calorífico destes resíduos. Em função disto, o PCU de fibras e fiapos e do lodo da ETE foram calculados na umidade final de 20%, considerando que esses resíduos foram submetidos à secagem, utilizando o calor residual liberado na chaminé da fornalha da caldeira, conforme apresentado na Tabela 6.

**Tabela 6** - Cálculo do PCI, PCU e energia liberada na combustão com a queima de fibras e fiapos e de lodo da ETE secos a 20% de umidade, em mistura com os combustíveis normalmente utilizados a partir dos consumos e umidades médias mensais.

Ident	Material	Cons t/d	Umid %	PCS kcal/kg	PCI kcal/kg	PCUsec kcal/kg	$Q_5$ Mcal/d
A	Cavacos próprios	4,3	38,5	5323,6	5035,5	2865,8	12354,0
B	Cavacos terceiros	145,9	53,4	4056,8	3877,4	1414,8	215153,5
C	Cascas	4,5	57,4	4903,9	4533,9	1710,3	6996,2
D	Fibras/fiapos	3,2	20,0	<b>4499,4</b>	4115,6	<b>3172,5</b>	10138,6
E	Lodo da ETE	12,8	20,0	<b>3236,0</b>	2940,1	<b>2232,1</b>	28554,3
F	Cinzas		10,3	2258,7	2220,4	1931,0	
G	Cinzas peneiradas	0,9	4,7	1667,0	1634,3	1528,6	1540,5

Como pode ser observado nas Tabelas 5 e 6, o PCU de fibras e fiapos a 80% de umidade foi de 343,1 kcal/kg e a 20% de umidade aumentou para 3712,5 kcal/kg, ou seja, a secagem propiciou aumento de 1082% no poder calorífico. O PCU do lodo da ETE a 55% de umidade foi de 993,1 kcal/kg e a 20% de umidade aumentou para 2232,1 kcal/kg, equivalente a um aumento de 224,76%. Os resultados de PCU a 20% de umidade, tanto de fibras e fiapos,

quanto de lodo da ETE, indicam que estes resíduos podem contribuir com a geração de vapor na combustão da caldeira, em mistura com cavacos e cascas, gerando economia no consumo de cavacos.

Da Tabela 5, temos que a energia total ( $Q_1$ ) inserida na caldeira é 235.367,2 Mcal/d, correspondendo à soma das energias liberadas na combustão por cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas (C) e fibras e fiapos (D) a 80% de umidade. Da Tabela 7, temos que a energia total ( $Q_5$ ) inserida na caldeira é 269.674,0 Mcal/d, liberada na combustão de cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas (C), fibras e fiapos (D) a 20% de umidade e lodo da ETE (E) a 20% de umidade. O aumento percentual de energia (%Q) pela secagem dos resíduos corresponde a 14,8%.

Na Tabela 7, a quantidade de calor líquido utilizado na geração de vapor ( $Q_v$ ), é calculado pela diferença entre o total de energia calorífica inserido na caldeira ( $Q_1$ ) e a quantidade de calor removido com as cinzas ( $Q_2$ ), 1540,5 Mcal/d. A quantidade de energia perdida pela chaminé da caldeira ( $Q_3$ ) corresponde a 12% do total de energia liberada na combustão ( $Q_1$ ). A quantidade de água a ser evaporada para reduzir a umidade de fibras e fiapos de 80% para 20% e reduzir a umidade do lodo da ETE de 55% para 20% é calculada por  $M_4$  e a quantidade de energia necessária para evaporar água é dada por  $Q_4$ .

**Tabela 7** – Cálculo da energia líquida utilizada na geração de vapor, energia perdida na chaminé e percentual de energia perdida pela chaminé, a ser utilizada para secar fibras e fiapos (D) e lodo da ETE (E) a 20% de umidade.

	Energia consumida na caldeira na geração de vapor ( $Q_v$ )	Energia perdida pela chaminé, 12% da energia de combustão ( $Q_3$ )	Quant de água evaporada para secar fibras/fiapos de 80% para 20% e lodo de 55% para 20%. ( $M_4$ )	Energia para evaporar água na secagem (615 kcal/kg) ( $Q_4$ )	% de energia utilizada da energia perdida na chaminé (% $Q_s$ )
	Mcal/d	Mcal/d	kg/d	Mcal/d	%
MÉDIA	233826,7	28059,2	5115,9	3530,0	12,7

\* Cálculos de  $Q_v$ ,  $Q_3$ ,  $M_4$ ,  $Q_4$  e % $Q_s$  pelas Equações 16, 17, 21, 22 e 23, respectivamente.

#### 5.4.2. Cálculo do consumo de combustível, em função da geração de vapor e do rendimento da caldeira

Na Tabela 8 é calculado o PCU<sub>1</sub> médio (Equação 25), que é o poder calorífico útil médio de cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas (C) e fibras e fiapos (D), que são normalmente queimados na caldeira e a quantidade de combustível Q<sub>C1</sub> (Equação 24), necessária para produzir 20,7 t/h de vapor.

**Tabela 8** – Cálculo da quantidade de combustível para produzir 20,7 t/h de vapor a partir do PCU<sub>1</sub> médio de cavacos próprios, cavacos de terceiros, cascas e fibras e fiapos.

<b>CÁLCULO DO PCU<sub>1</sub> MÉDIO (antes da secagem)</b>						
	(A) % cav. próp.	(B) % cav. terc.	(C) % casc.	(D) % fib./fia	PCU <sub>1</sub> med.	Quant. de combustível p/20,7 t vap./h (kg/h) (Q <sub>C1</sub> )
	%	%	%	%	kcal/kg	kg/h
MÉDIA	1,9	93,9	2,6	1,6	1495,3	9889,1

\* PCU<sub>1</sub> e Q<sub>C1</sub>, calculados pelas Equações 25 e 24, respectivamente.

Da mesma forma, na Tabela 9 é calculado o PCU<sub>2</sub> médio (Equação 26) dos combustíveis, que é o poder calorífico útil médio de cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas (C), fibras e fiapos (D) a 20% de umidade e lodo da ETE (E), também a 20% de umidade. A quantidade de combustível consumido para produzir 20,7 t/h de vapor é dado Q<sub>C2</sub> (Equação 24).

**Tabela 9** – Cálculo do PCU<sub>2</sub> médio e da quantidade de combustível para produzir 20,7 t/h de vapor, com a introdução de fibras e fiapos e lodo da ETE a 20% de umidade na mistura de combustível.

<b>CÁLCULO DO PCU<sub>2</sub> MÉDIO (após s secagem)</b>							
	(A) %cav próp.	(B) % cav. terc.	(C) % casc.	(D) % fib./fia	(E) % lodo ETE	PCU <sub>2</sub>	Quant comb. p/20,7 t vap/h (kg/h) (Q <sub>C2</sub> )
	%	%	%	%	%	kcal/kg	kg/h
MÉDIA	1,8	88,0	2,4	1,5	6,2	1584,6	9305,6

\* PCU<sub>2</sub> e Q<sub>C2</sub>, calculados pelas Equações 26 e 24, respectivamente.

Das Tabelas 8 e 9, observa-se que, para produzir 20,7 t/h de vapor, houve redução do consumo médio de combustível (Q<sub>C</sub>) de 9889,1 kg/h para 9305,6 kg/h, (redução de 583,5 kg/h) equivalente a 5,9% do consumo normal de biomassa (%Q<sub>C</sub>). Essa redução foi possível



com a secagem de fibras e fiapos e lodo da ETE para 20% de umidade e o consequente aumento do poder calorífico útil, indicando que a secagem é uma boa alternativa para aumentar o poder calorífico dos resíduos, possibilitando sua combustão.

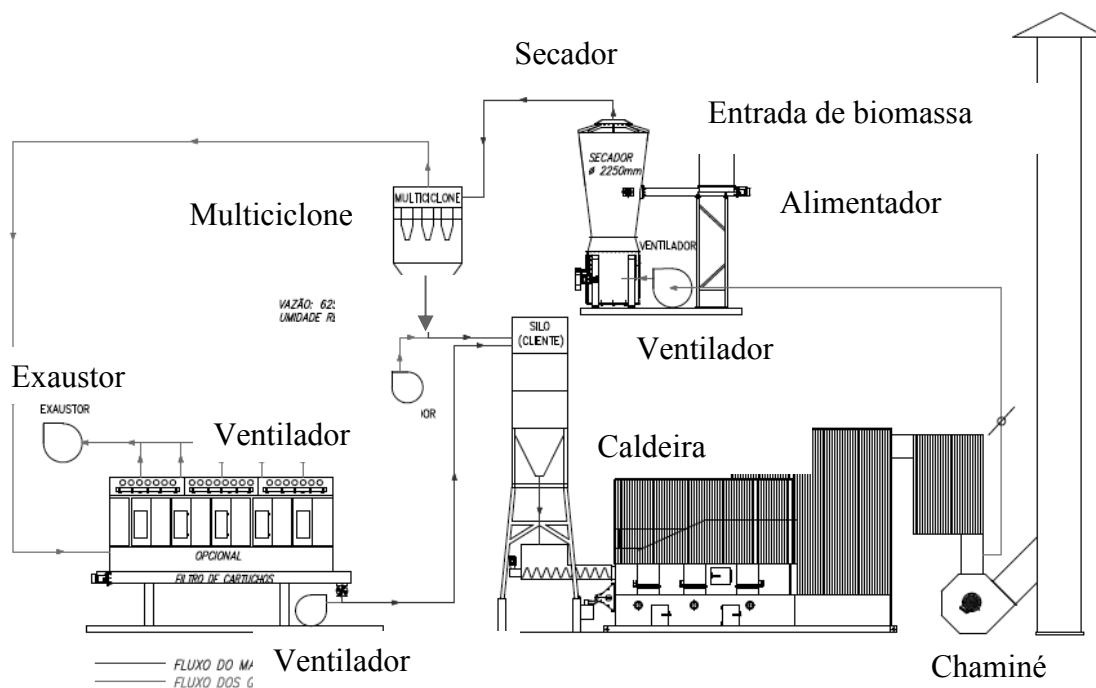
A redução de combustível 583,5 kg/h equivale a 420,1 toneladas de cavacos por mês. Este número serve como base para avaliação de alternativas técnicas de investimento em equipamentos e processos para aproveitamento energético dos resíduos celulósicos.

### **5.5. Alternativas de aproveitamento energético de resíduo celulósico de fábrica de papel-cartão**

Neste item são analisadas alternativas de aproveitamento energético do resíduo celulósico por meio de tecnologias consolidadas (secagem em secador de leito fluidizado e estocagem de cavacos em local coberto) e outras em desenvolvimento (produção de biogás e de bioálcool). Sendo assim, são analisadas viabilidade de secagem dos resíduos, viabilidade de instalação de cobertura para estocagem de cavacos e cascas, a produção de biogás e de álcool a partir da fermentação de glicerina em meio com resíduo celulósico.

#### *5.5.1. Secagem de resíduos em secador de leito fluidizado*

De acordo com o balanço de massa e térmico realizado, a secagem de fibras e fiapos e de lodo da ETE reduz o consumo de cavacos em 420,1 toneladas por mês. Esta redução pode justificar o investimento em equipamento para secagem de biomassa. Nesta pesquisa, o secador escolhido foi do tipo leito fluidizado, conforme ilustrado na Figura 11.



**Figura 11** - Secador de biomassa do tipo leito fluidizado (ALBRECHT, 2014).

No secador do tipo leito fluidizado, o processo de secagem inicia com alimentação da biomassa no topo do secador, que se mantém em suspensão devido ao fluxo em contracorrente de gases quentes extraídos da chaminé da caldeira, por meio do ventilador de exaustão. A secagem ocorre por troca de calor direta dos gases quentes em contracorrente com a biomassa. O secador é dito leito fluidizado porque a biomassa tende a manter-se em suspensão com o fluxo contrário dos gases. A biomassa seca vai para o silo para alimentar a caldeira em mistura com os cavacos. Os gases utilizados na secagem saem do secador e seguem para o multiciclone para remoção de poeira e partículas finas. Em seguida, os gases passam pelo filtro de mangas para remover particulados residuais, antes de liberados para atmosfera. A câmara fluidizada do secador oferece vantagem de operar tanto com energia térmica residual dos gases de chaminé da caldeira, quanto de combustão de cavacos, ou queimador a gás.

O investimento num secador de leito fluidizado, com capacidade para secar até 10 tss (toneladas de sólidos secos) de resíduos com 55% de umidade para 20% de umidade é de R\$ 1,438 milhões.

O custo operacional e de manutenção foi calculado em R\$ 31.938,00 por ano, sendo R\$ 21.750,00, referente ao custo de manutenção (1,5% do investimento) e R\$ 10.368,00, o

custo do consumo de energia elétrica na operação do secador de biomassa, calculado pela soma das cargas dos motores elétricos e tempo em operação.

**Tabela 10** – Redução de custo com menor consumo de cavacos, pelo aproveitamento de resíduo celulósico seco (fibras e fiapos e lodo da ETE) em secador de leite fluidizado.

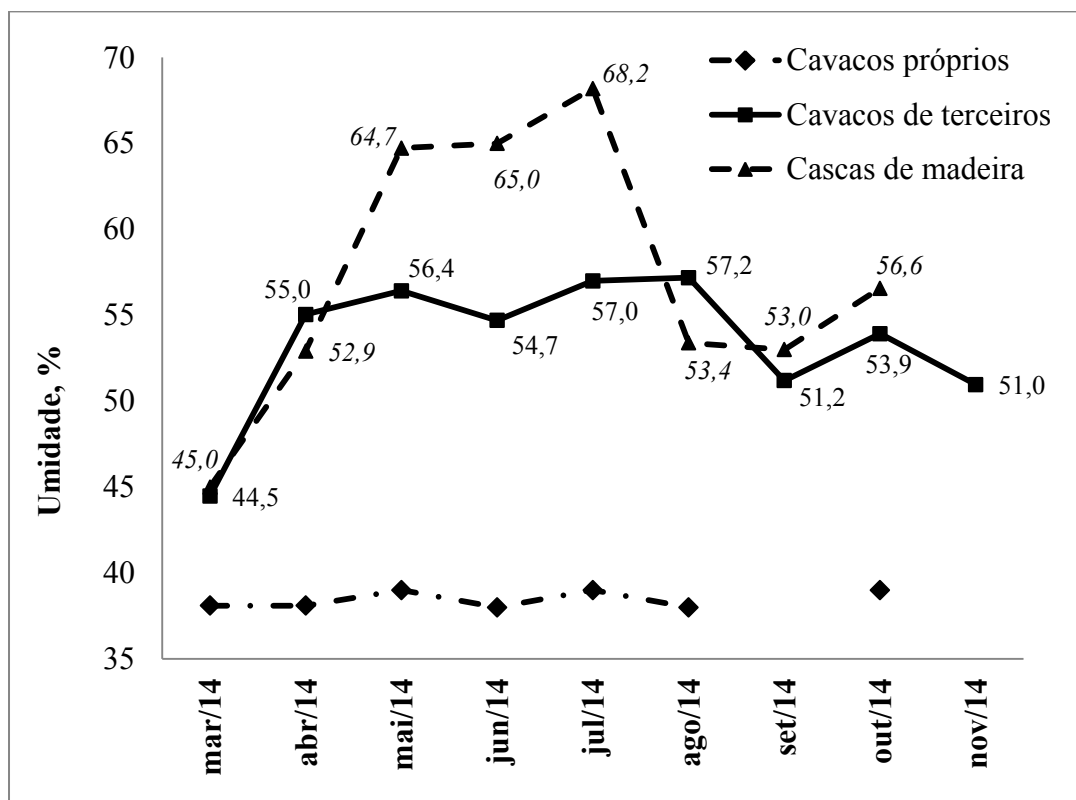
<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>	<b>Item</b>
PCU <sub>1</sub> da biomassa antes de secagem (Tabela 8)	kcal/kg	1525,8
Quantidade de biomassa para produzir 20,7 t/h de vapor, antes de secagem (Tabela 13)	kg/h	9689,6
PCU <sub>2</sub> da biomassa após secagem (Tabela 9)	kcal/kg	1616,8
Quantidade de biomassa para produzir 20,7 t/h de vapor após secagem (Tabela 9)	kg/h	9118,8
Redução do consumo de cavacos após secagem devido ao aumento do PCU para 1616,8 kcal/kg	t/h	0,5835
Custo do cavaco	R\$/t	95,00
Redução de custo anual com cavacos	R\$/a	478.936,80

Conforme mostrado na Tabela 11, a secagem de 12,8 t/d de fibras e fiapos de 80 para 20% de umidade e a secagem de 22,7 t/d de lodo da ETE de 55% para 20%, (Tabela 10), gera redução de 0,5835 toneladas de cavacos por hora (420,1 t cavacos/m) para produzir as mesmas 20,7 t/h de vapor, considerando-se a eficiência térmica da caldeira de 90,9%.

O investimento em equipamento de secagem com capacidade para até 10 toneladas secas por dia é de R\$ 1.438.500,00. O retorno do investimento, para redução de custo líquido com cavacos de R\$ 478.936,80 por ano é de 3 anos. No cálculo do retorno de investimento, não está se considerando custos operacionais para disposição de lodo da ETE em aterro industrial, o que reduziria o tempo de retorno.

#### 5.5.2. Viabilidade de cobertura da área de estocagem de cavacos e cascas de madeira para evitar redução do poder calorífico pela absorção de umidade devido às chuvas

Os cavacos e cascas de madeira adquiridos de terceiros são recebidos com umidade média de 55%. A estocagem dessa biomassa a céu aberto fica sujeita ao aumento de umidade devido às chuvas, reduzindo seu poder calorífico. Durante o ano de 2014, observou-se maior umidade nos cavacos de terceiros nos meses de maio a agosto. Já as cascas de madeira apresentaram maior umidade no período de maio a julho, conforme ilustrado na Figura 12.



**Figura 12** – Variação do teor de umidade média mensal de cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B) e cascas de madeira, estocados a céu aberto.

A cobertura da área de estocagem, reduziria a umidade média de 56,3% (meses de maio a agosto de 2014) para umidade média de 52% (meses de setembro a novembro de 2014), trazendo economia de combustíveis na geração de vapor, pois o aumento do poder calorífico médio seria de 1356,6 kcal/kg para 1549,1 kcal/kg, aumentando em 14,1% o poder calorífico no período considerado, conforme Tabela 12.

**Tabela 11** – Redução de custo com menor consumo de cavacos com instalação de galpão coberto para evitar aumento de umidade da biomassa com as chuvas.

<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>	<b>Item</b>
PCU da biomassa na umidade 56,3% (maio a agosto de 2014)	kcal/kg	1356,6
Quantidade de biomassa para produzir 20,7 t/h de vapor a 56,3% de umidade	kg/h	10743,0
PCU da biomassa na umidade de 52% (setembro a novembro de 2014)	kcal/kg	1549,1
Quantidade de biomassa para produzir 20,7 t/h de vapor na umidade de 52%	kg/h	9408,0
Redução do consumo de cavacos após instalação da cobertura	t/h	1,3
Custo do cavaco	R\$/t	95,00
Redução de custo anual com cavacos (considerando 90 dias de chuva no ano, totalizando 180 dias de cavacos úmidos)	R\$/a	533.520,00

O investimento no galpão para cobertura da área de estocagem com dimensões, 24,5 m de largura por 139,0 m de comprimento, totalizando área coberta de 3.405,50 m<sup>2</sup> é de R\$ 1.167.367,74. O retorno de investimento equivalente para a redução de custo anual com cavacos de R\$ 533.520,00 é de 2,18 anos.

### 5.5.3. Geração de biogás pela fermentação de resíduo celulósico em mistura com glicerina

Uma forma de aumentar a sustentabilidade na produção de papel é a produção de biogás a partir de resíduos celulósicos.

O resíduo de origem vegetal contém 5 a 20% de teor de sólidos totais (ST) e 76 a 90% de sólidos voláteis (SV), cujo rendimento na produção de biogás é de 0,3 a 0,4 m<sup>3</sup>/kg de SV (ZUPANCIC; GRILIC, 2012).

Então, a produção de biogás a partir da fermentação anaeróbica de resíduos celulósicos pode ser uma alternativa de utilização energética do lodo da ETE da fábrica de papel-cartão. De acordo com resultados obtidos por Hermmann et al., (2014), a inoculação de 5 mL de micro-organismos *Escherichia coli*, por 72 h a 36 ± 0,5 °C, com 0,56 g de resíduo celulósico (lodo da ETE), em mistura com 50mL de glicerina residual de produção de biodiesel, resultaram na geração de biogás, cujo teor de metano (CH<sub>4</sub>) obtido nestas condições foi de 25% em volume (v/v) (HERRMANN et al., 2014).

Na Tabela 13 é apresentada a redução de custo com cavacos, pela combustão do

biogás na caldeira em substituição de cavacos e cascas para produção de vapor.

**Tabela 12** – Redução de custo com cavacos, pela utilização de biogás na combustão da caldeira de biomassa, gerado a partir de fermentação de lodo da ETE, glicerina e *Escherichia coli*.

<b>Descrição</b>	<b>Item</b>
Quantidade de lodo disponível	10,2 tss/d
Teor de voláteis no lodo (Tabela A.1. do anexo)	68,3%
Quantidade de voláteis do lodo	6426,0 kg SV/d
Rendimento na geração de biogás	0,3 m <sup>3</sup> biogás/kg SV
Geração de biogás	1927,8 m <sup>3</sup> /d
Teor de metano do biogás	25%
Poder calorífico inferior do biogás com 60% de metano	5000 kg/kg
Poder calorífico do biogás de lodo da ETE com 25% de metano	2083 kcal/kg
Energia liberada na combustão do biogás	4015,6 Mcal/d
Equivalente de cavacos na energia liberada na combustão	2,626 t/d
Preço do cavaco	95,00 R\$/t
Redução de custo com cavacos	89.809,20 R\$/a

Considerando a disponibilidade de 10,2 t secas de lodo da ETE por dia, cujo teor de sólidos voláteis (SV) obtido pela análise imediata foi 68,3%. Esta quantidade de lodo da ETE equivale a 6426 kg SV, sendo possível a geração de 1927,8 m<sup>3</sup> biogás/d, com rendimento de 0,3 m<sup>3</sup> de biogás/kg SV e 25% de metano.

O poder calorífico do biogás com 60% de metano é aproximadamente 5000 kcal/m<sup>3</sup> de biogás (DEGANUTTI, et al., 2002). Uma vez que o biogás obtido tem 25% de metano, o poder calorífico do biogás obtido com lodo da ETE é 2083 kcal/m<sup>3</sup> e o equivalente energético pela produção de 1927,8 m<sup>3</sup>/d de biogás a partir de lodo da ETE é de 4015,6 Mcal/d. Esta energia do biogás poderia ser utilizada na combustão da caldeira, para redução de 2626 kg de cavacos por dia. A redução de consumo de cavacos é 78,8 t/m, com custo mensal de R\$ 7.484,10, ou redução de custo anual de R\$ 89.809,20. Não foi considerado o investimento na célula de biogás nem custos operacionais para disposição do resíduo celulósico em aterro industrial após a fermentação.

De acordo com Herrmann et al. (2014), no mesmo experimento houve geração 98 ppm (%v/v) de gás hidrogênio (H<sub>2</sub>). Então a quantidade de gás hidrogênio sobre a produção de 1927,8 m<sup>3</sup>/d de biogás é 188,8 kg H<sub>2</sub>/d. A combustão do hidrogênio na caldeira geraria

5429 Mcal/d de calor liberado, considerando-se que o PCI do H<sub>2</sub> é 120,21 MJ/kg (UNITES STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2015). Esse calor liberado na combustão do hidrogênio corresponde a 3,65 t/d de cavacos de terceiros (PCU de cavacos de terceiros 1484,9 kcal/kg, Tabela 5), ou redução de custo de R\$ 125.039,00 por ano. A economia total com a geração de biogás e hidrogênio é de R\$ 214.848,20 por ano.

#### 5.5.4. Geração de etanol pela fermentação de resíduo celulósico em mistura com glicerina

A geração de etanol pela fermentação de glicerina com micro-organismos *Escherichia coli* tem sido objeto de algumas pesquisas: a produção de bioetanol e biohidrogênio a partir de glucose, glicerina e biomassa, como fontes de carbono com cepas selecionadas de *Escherichia coli*, comprovou que o micro-organismo tem mais afinidade com a glicerina do que com a glucose, tendo alcançado produção máxima de 1 mol de etanol por mol de glicerina utilizada na fermentação (SUHAINE et al., 2012). No mecanismo de produção de etanol a partir da glicerina, há etapas de formação de dihidroxiacetona fosfato (DHPA), dihexadecil-hidrogênio-fosfato (DHP), piruvirato, acetila e por fim, o etanol (ALMEIDA et al., 2012).

Nos resultados obtidos por Kovalski et al., (2014), para produção de etanol, a partir da fermentação microbiológica do glicerol em mistura com resíduo celulósico (lodo da ETE), indicou que a inoculação de 4 mL do micro-organismo *Escherichia coli*, com 2 g de resíduo celulósico e 50 mL de glicerol por 72 h a 36 ± 0,5 °C, houve fermentação e geração de 7 mL de etanol, que após destilação atingiu 81°GL (KOVALSKI et al., 2014).

Com base nos resultados de Kovalski et al. (2014), na presente pesquisa foi avaliado o retorno de investimento numa microdestilaria de álcool com capacidade de produção de 650 litros de álcool por dia.

Sabendo-se que 1 mol de glicerina pesa 93 g/mol e um mol de etanol 46 g/mol, pode-se afirmar que o rendimento em etanol é de 49,46% em relação à quantidade de glicerina utilizada, sendo a glicerina o componente limitante da reação, considerando o lodo da ETE como suporte fibroso para o desenvolvimento dos micro-organismos.

Na Tabela 14 é apresentado o valor de investimento numa microdestilaria para produção de etanol e os custos operacionais, considerando rendimento da reação de 80% devido a perdas (ENTREPRENEURS TOOLKIT, 2015).

**Tabela 13** – Retorno do investimento em microdestilaria para produção de 650 L/d de etanol a partir de fermentação de resíduo celulósico com glicerina e *Escherichia coli*.

<b>1. Investimento atualizado</b>		
Microdestilaria (R\$)	612.758,73	Unidade
<b>2. Receita com produção de álcool</b>		
Receita com álcool	1,61	R\$/L
Receita anual	376.740,00	R\$/a
<b>3. Custo operacional e de manutenção</b>		
Custo manutenção (5%)	30.637,93	R\$/a
Consumo de glicerina (80% de rendimento)	1642,7	kg/d
Custo glicerina	80,00	R\$/t
Custo glicerina	47.308,70	R\$/a
Consumo de energia elétrica	12.960,00	R\$/a
Consumo de vapor	22.932,58	R\$/a
01 operador	36.000,00	R\$/a
	119.201,27	
<b>4. Receita líquida</b>		
receita líquida anual	257.538,73	R\$/a
<b>5. Retorno do investimento</b>		
ROI	2,4	anos

O preço do álcool foi tomado como 70% do valor atualmente comercializado nos postos, R\$ 2,30, em média, sendo 30% de impostos. A receita com venda de 650 L/d de álcool no período de um ano é R\$ 376.740,00. O custo operacional com manutenção da microdestilaria consome de glicerina, energia elétrica e vapor totalizaram R\$119.201,27, dando uma receita líquida de R\$ 257.538,73, cujo retorno do investimento é de 2,4 anos. Não se considerou custos para descarte em aterro industrial do resíduo celulósico após a produção de álcool.



## 6. CONCLUSÕES

- a) A caracterização dos combustíveis utilizados na caldeira de biomassa (cavacos e cascas de madeira) e dos resíduos celulósicos da fábrica de papel-cartão (fibras e fiapos de madeira, lodo de efluente e cinzas da caldeira), por meio da composição elementar, análise imediata, teor de umidade e do poder calorífico, permitiu afirmar que há potencial de reaproveitamento dos resíduos celulósicos de fábrica de papel-cartão, para combustão em mistura com combustíveis normalmente utilizados;
- b) O balanço energético da caldeira de biomassa da fábrica de papel-cartão indicou que a quantidade de energia liberada contida nos gases de exaustão da chaminé da caldeira é suficiente para secar o lodo da estação de tratamento de efluentes (lodo da ETE), (reduzindo sua umidade inicial de 55% para 20%) e secar fibras e fiapos de madeira (reduzindo sua umidade de 80% para 20%). A secagem desses resíduos, em secador de biomassa, permite aumentar o poder calorífico do lodo da ETE em 55% e de fibras e fiapos em 88%, possibilitando a queima em mistura com a biomassa (cavacos e cascas de madeira) atualmente utilizada na caldeira da fábrica;
- c) O balanço com a introdução dos resíduos secos (20% de umidade); 1,5% de fibras e fiapos, 6,5% de lodo da ETE, para combustão em mistura com 89,8% de cavacos e 2,4% de cascas de madeira, indicou que houve aumento de 14,8% de energia na combustão na caldeira, possibilitando a redução de 420,1 toneladas por mês, no consumo de cavacos e cascas;
- d) O balanço indicou que a utilização de 12,7% do calor emitido pelos gases da chaminé da caldeira é suficiente para secagem de resíduos em secador de leito fluidizado. A análise de viabilidade de instalação do secador demonstrou ser uma alternativa viável para o aproveitamento energético de resíduos celulósicos, cujo retorno é de 3 anos;
- e) O investimento na cobertura de área de estocagem de biomassa, para evitar aumento de umidade de cavacos e casca de madeira com chuvas e conseqüentemente, redução do poder calorífico dos combustíveis, é uma

alternativa viável para redução do consumo de combustível na caldeira, com retorno do investimento de 2,18 anos;

- f) A produção de biogás a partir da fermentação anaeróbica de resíduos celulósicos, em mistura com glicerina e bactérias *Escherichia coli*, pode ser uma alternativa para produção de energia a partir de resíduos celulósicos de fábrica de papel-cartão. A combustão do biogás (obtido no experimento) na caldeira pode reduzir o consumo de cavacos, com redução de custo equivalente a R\$ 89.809,20 por ano, com a utilização de 10,2 toneladas secas por dia de resíduos celulósicos e R\$ 125.039,00 por ano correspondente à queima do hidrogênio gerado;
- g) A pesquisa laboratorial para geração de etanol a partir da fermentação microbiológica de glicerina, em mistura com resíduo celulósico e bactérias *Escherichia coli*, caracterizou-se como alternativa com potencial econômico para aproveitamento do resíduo celulósico de fábrica de papel-cartão. O retorno de investimento com instalação de uma microdestilaria para produção de 650 litros de álcool por dia é de 2,4 anos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOLI, M. A.; KARBASSI, A. R.; SAMIEE-ZAFARGHANDI, R.; RASHIDI, ZH.; GITIPOUR, S.; PAZOKI, M. Electricity generation from leacheate treatment plant. **International Journal of Environmental Research**. Tehran, IRAN. 6 (2), p. 493 – 498, 2012.

ABREU, F. C.; PECORA, V.; VELÁZQUEZ, S.; COELHO, S. T. **Biogás de aterro para geração de eletricidade e iluminação**. Centro Nacional de Referência em Biomassa - CENBIO. Universidade de São Paulo - USP. São Paulo, 2005. Disponível em: [http://www.researchgate.net/publication/267253623\\_BIOGS\\_DE\\_ATERRO\\_PARA\\_GERAO\\_DE\\_ELETRICIDADE\\_E\\_ILUMINAO](http://www.researchgate.net/publication/267253623_BIOGS_DE_ATERRO_PARA_GERAO_DE_ELETRICIDADE_E_ILUMINAO). Acesso em: 16/05/2015.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. 2014a. Resolução ANP Nº 45, DE 25.8.2014 - DOU 26.8.2014. Disponível em: [http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes\\_anp/2014/agosto/ranp%2045%20-%202014.xml](http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2014/agosto/ranp%2045%20-%202014.xml). Acesso em 05/07/2015.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. 2014b. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?id=470>. Acesso em: 01/02/2015.

ALBRECHT, Equipamentos Industriais Ltda. Disponível em: [http://www.albrecht.com.br/pt-br/default.php?go=bruthus\\_if](http://www.albrecht.com.br/pt-br/default.php?go=bruthus_if). Acesso em: 12/02/2015.

ALMEIDA, J. R. M.; FÁVARO, L. C. L.; QUIRINO, B. F. **Biodiesel biorefinery: opportunities and challenges for microbial production of fuels and chemicals from glycerol waste**. *Biotechnology for Biofuels* 2012, **5**:48. Disponível em <http://www.biotechnologyforbiofuels.com/content/5/1/48>. Acesso em 05/07/2015.

ANDRADE, H. O.; 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. In: VII CONNEPI – CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO. **Proceedings...** Palmas, 2012.

ANGARITA, E. E. Y.; ROCHA, M. H.; LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J.; TORRES, E. A.; ALVES, C. T.; RESTREPO, S.Y.G. Biocombustíveis de primeira geração: biodiesel. In: LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. **Biocombustíveis**. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2012. p. 174-309.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL – BRACELPA. INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. Disponível em: [http://www.bracelpa.org.br/shared/iba\\_2014\\_pt.pdf](http://www.bracelpa.org.br/shared/iba_2014_pt.pdf). Acesso em: 10/02/2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR – 8112/86**. Carvão Vegetal - Análise Imediata. Rio de Janeiro, Outubro 1986. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR – 8419/92**. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, Abril 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10004/04**. Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, Maio 2004.

AVACI, A. B.; CHAVES, L. I.; GASPARIN, E.; RODRIGUES, A.; ROSA, H. A. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica a partir da vinhaça. **Acta Iguazu**, v.1, n. 2, p. 80 – 93, Cascavel, 2012.

BALAT, M.; BALAT, V. Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. **Applied Energy**, v. 86, 10 p. 2009. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.467.4517&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 01/05/2015.

BASU, P. **Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory**. USA: Elsevier: 364 p., 2010.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - BNDES. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. **BNDES Setorial 33, Papel e Celulose**, p. 261-314, 03/2011. Disponível em: [http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta\\_Expressa/Setor/Energia/201103\\_08.html](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta_Expressa/Setor/Energia/201103_08.html) >. Acesso em: 30/08/2014

BLASCHEK, H. P.; EZEJI, T. C.; SCHEFFRAN, J. **Biofuels from agricultural wastes and byproducts**. Wiley-Backwell, 2010. 262p.

BLEY JR, C.; LIBÂNIO, J. C.; GALINKIN, M.; OLIVEIRA, M. **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais**. 2ª ed. rev. Foz do Iguaçu, PR. Brasília: Itaipu Binacional, Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, TechnoPolitik Editora, 2009. 140 p.

BRAND, M. A.; STAHELIN, T. S. F.; FERREIRA, J. C.; NEVES, M .D. Produção de biomassa para geração de energia em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes idades. **Revista Árvore**, Viçosa, v.38, n.2, p. 353-360, 2014.

BRITO, J. O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In Congresso Florestal Panamericano, 1, Congresso Florestal Brasileiro, 7, 1993, Curitiba, **Anais...** Curitiba: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1993, p. 280-282. In: GONÇALVES, J. E.; LEÃO, A. L.; SARTORI, M. M. P. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. In: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 657 – 661, 2009.

CASTANHÔN, N. J. B. Biogás, originado a partir dos rejeitos rurais. Trabalho apresentado na disciplina: Biomassa como fonte de energia – conversão e utilização. Universidade de São

Paulo, São Paulo, 2002. In: LEME, M. M. V; LORA, E. E. S; ROCHA, M. H.; SALOMON, K. R. Biocombustíveis de primeira geração: Biogás. In: LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. **Biocombustíveis**. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2012. p. 312-358.

CHANNIWALA, S. A.; PARIKH, P. P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuel. **Fuel**, vol. 81, no. 8, p. 1051-1063, 2002.

CHEN, W. H.; KUO, P. C. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. **Energy** v.36, p. 803-811, 2011.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – **CEMIG. Alternativas energéticas. Uma visão Cemig**. Belo Horizonte, Divisão de Análise e Desenvolvimento Energético. 369 p., 2012. Disponível em: <http://cemig20/Inovacao/AlternativasEnergeticas/Documents/Alternativas%20Energéticas%20-%20Uma%20Visao%20Cemig.pdf>. Acesso em: 16/05/2015.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares 2009**. Inventário CETESB: São Paulo, 177 p., 2010. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/publicacoes-e-relatorios/1-publicacoes/-relatorios>. Acesso em: 24/01/15.

CORREA NETO, V.; TOMASQUIM, M. T. Avaliação econômica da cogeração em ciclo combinado com gaseificação de biomassa e gás natural no setor sucroalcooleiro. **Revista Brasileira de Energia**, v.8, n. 2. SBPE - Sociedade Brasileira de Planejamento Energético. 2001. Disponível em: [www.sbpe.org.br/socios/download.php?id=151](http://www.sbpe.org.br/socios/download.php?id=151) Acesso em: 28/06/2015.

CORTEZ, L. A. B.; GÓMEZ, E. O; LORA, E. E. S. **Biomassa para energia**. Ed. UNICAMP: Campinas, 2009.

COUTO, L. C.; COUTO, L.; WATZLAWICK, L. F.; CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa e Energia**, v.1, n. 1, p. 71 – 92, 2004.

DAVIS, S.C.; HAY, W.; PIERCE, J. **Biomass in the energy industry: an introduction**. Published by BP p.l.c., London, United Kingdom, 2014. Disponível em: <[http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/.../ESC\\_biomass\\_handbook.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/.../ESC_biomass_handbook.pdf)>. Acesso em 20/08/2015.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M.C.J.P; ROSSI, M.; TAVARES, R. **Biodigestores rurais: modelos indiano, chinês e batelada**. UNESP – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Bauru, 2002.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources: An introduction. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008. 443p.

DOAT, J. Le pouvoir calorifique des bois tropicaux. **Revue Bois Forêts des Tropiques**, n. 172, p. 33-48, 1977.

DRAPCHO, C. M.; NHUAN, N. P.; WALKER, T. H. **Biodiesel engineering process technology**. U.S.A.: Ed. Mc-Graw Hill, 268p., 2008. Disponível em: <[http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/eng032-BL/Biodiesel\\_Engineering\\_Process\\_Technology.pdf](http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/eng032-BL/Biodiesel_Engineering_Process_Technology.pdf)> Acesso em: 26/08/2014.

EARTH POLICY INSTITUTE - EPI. **World biodiesel production 1990-2012**. Disponível em: [www.earth-policy.org/datacenter/xls/book\\_fpep\\_ch4\\_6.xlsx](http://www.earth-policy.org/datacenter/xls/book_fpep_ch4_6.xlsx). Acesso em: 11/01/2015.

ENERGY INTERNATIONAL AGENCY – EIA. **U.S Department of energy. Washington, D.C. USA. 2012**. Disponível em: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=79&pid=81&aid=1&cid=regions&syid=2008&eyid=2012&unit=TBPD>. Acesso em: 17/01/15.

ENTERPRENEUR’S TOOLKIT. **Microdestilarias no Brasil**. Disponível em: [http://www.entrepreneurstoolkit.org/index.php?title=Microdestilarias\\_no\\_Brasil#Custo\\_e\\_via\\_bilidade\\_de\\_uma\\_microdestilaria](http://www.entrepreneurstoolkit.org/index.php?title=Microdestilarias_no_Brasil#Custo_e_via_bilidade_de_uma_microdestilaria). Acesso em 05/07/2015.

FARINHAQUE, R. Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracatinga (*Mimosa scrabella*, Benth) e aspectos gerais de combustão. Curitiba: FUPEF, 1981. 14p. Série Técnica. In: GONÇALVES, J. E.; LEÃO, A. L.; SARTORI, M. M. P. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. In: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 657 – 661, 2009.

FLORENTINO, H. O.; RANGEL, S.; BAPTISTA, E. C. Técnicas de otimização no processo de aproveitamento do palhço da cana-de-açúcar para geração de energia. **Biomassa e Energia**, v. 2, n. 4, p. 285-292, 2005.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **The state of food and agriculture: Biofuels: prospects, risks and opportunities. 2008**. Disponível em: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0100e/i0290e.pdf>. Acesso em: 11/01/2015.

GABIALTI, J. K.; GALLO, C. A.; LAVANHOLI, M. G. D. P. **Produção de energia elétrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar**. Nucleus, v.7, n.1, Ituverava, SP, 2010 In: SZMERCÁSÁNYI, T. **O planejamento da agroindústria canavieira no Brasil (1930-75)**. São Paulo: Hucitec, 1979, 540 p.

GALLERT C.; WINTER J. Propionic acid accumulation and degradation during restart of a full-scale anaerobic biowaste digester, **Biores Technology**, v. 99, p. 170–178, 2008.

GAVRILESCU, D. Energy from biomass in pulp and paper mills. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 7, n. 5, p. 537-546, 2008.

Granato, E.F. e Silva, C.L. (2002) - **Geração de energia elétrica a partir do resíduo de vinhaça**. Encontro Energia no Meio Rural, vol. 4, p. 1-6

GUPTA; R. B.; DEMIRBAS, A. **Gasoline, diesel and ethanol biofuels from grasses and**

**plants.** Cambridge University Press, New York, NY, 230 p., 2010

HARDOIM, P. C.; GONCALVES, A. D. M. A. Avaliação do potencial do emprego do biogás nos equipamentos utilizados em sistemas de produção de leite. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., Campinas, 2000, apud UTENBERG B. L.; AFONSO, E. R.; PEREIRA, A. S. C. **Manejo de dejetos em confinamento de bovinos de corte.** In: III SIMPÓSIO DE SUSTENTABILIDADE E CIÊNCIA ANIMAL. Pirassununga, SP, 2013.

HARWOOD, H. J. Oleochemicals as a fuel: Mechanical and economic feasibility. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 61, n. 2, p. 315-324, 1984.

HERRMANN, H. W.; KOVALSKI, G.; GALLINA, A. L.; FÜRSTENBERGER, C. B.; RODRIGUES, P. R. P. Reaproveitamento de resíduos industriais para fins energéticos. 2014. Foz do Iguaçu. In: II SIMPÓSIO DE BIOENERGIA E BIOCOMBUSTÍVEIS DO MERCOSUL. **Proceedings...** PTI - Parque Tecnológico de Itaipu. 2014, 10 p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. Relatório 2014. Disponível em: [http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&sqi=2&ved=0C DIQjBAwAw&url=http%3A%2F%2Fwww.iba.org%2Fshared%2Fiba\\_2014\\_pt.pdf&ei=GH6 HVcrzEbK1sAT-so6QAQ&usg=AFQjCNG7PD4G1mEO5Pm4vmXzyzXCM7vbmG&bvm=bv.96339352,d.c Wc](http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&sqi=2&ved=0C DIQjBAwAw&url=http%3A%2F%2Fwww.iba.org%2Fshared%2Fiba_2014_pt.pdf&ei=GH6 HVcrzEbK1sAT-so6QAQ&usg=AFQjCNG7PD4G1mEO5Pm4vmXzyzXCM7vbmG&bvm=bv.96339352,d.c Wc). Acesso em 22/06/2015.

INSTITUTO DE TECNOLOGIA DO PARANÁ - TECPAR. **Manual de biosistemas integrados na suino-cultura.** Centro Integrado de Tecnologia do Paraná - CITPAR. Telus - Rede Paranaense de Projetos em Desenvolvimento Sustentável, Curitiba, 140 p., 2002.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Key world energy statistics. 2014.**

Disponível em:

<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2014.pdf>. Acesso em: 11/01/2015a.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. (2015). **Thermal gaseification of biomass.**

Disponível em: [http://www.ieatask33.org/content/thermal\\_gasification](http://www.ieatask33.org/content/thermal_gasification). Acesso em: 03/05/2015b.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. (2015). **Pyrolysis.** Disponível em: [http://www.pyne.co.uk/?\\_id=76](http://www.pyne.co.uk/?_id=76). Acesso em: 17/05/2015c.

KOVALSKI G.; HERRMANN H. W.; GALLINA, ANDRÉ; FÜRSTENBERGER, C. B.; RODRIGUES P. R. P. Produção de etanol a partir da fermentação de resíduos industriais. 2014. Foz do Iguaçu. In: II SIMPÓSIO DE BIOENERGIA E BIOCOMBUSTÍVEIS DO MERCOSUL. **Proceedings...** PTI - Parque Tecnológico de Itaipu. 2014, 10 p.

LIMA, P. C. R. **O biodiesel e a inclusão social.** Consultoria Legislativa. Câmara dos Deputados, Brasília, Março 2004.

LORA, E.E.; ZAMPIERI, M. Classificação e balanço térmico da fornalhas para a combustão de biomassa. In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. Ed. Unicamp, Campinas, 2008. p. 155-177.

LORA, E. E. S.; ROCHA, M. H.; VENTURINI, O. J.; COBAS, V. R. M.; SOTOMONTE, C. R. Biomassa in natura: combustão e acionadores primários. In: LORA, E.E.S.; VENTURINI, O.J. **Biocombustíveis**. Ed. Interciência. Rio de Janeiro, 2012. p. 48-172.

LORA, E.E.S.; VENTURINI, O.J. **Biocombustíveis**. Ed. Interciência. Rio de Janeiro, 2012. 588 p.

LUCAS, J. F. R.; MARAN, M. A.; FRARE L. M. **Proposta de aproveitamento do biogás gerado no aterro sanitário de Foz do Iguaçu - PR**. In: XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Foz do Iguaçu, 2010. Disponível em: [www.foz.unioeste.br/~lamat/publicbiogas/biogascobeq2010.pdf](http://www.foz.unioeste.br/~lamat/publicbiogas/biogascobeq2010.pdf). Acesso em: 16/05/2015.

MA, F.; HANNA, M.A. Biodiesel production: a review. **Biosource Technology**, 70(10;1-15), 1999.

McKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. **Bioresource Technology**, v. 83, p. 47-54, 2002.

MELO, G. C. B.; FILHO, A. T. Desempenho ambiental e energético de um biocombustível sólido obtido de resíduos gerados em área metropolitana. **Biomassa e Energia**, v.2, p. 133-140, 2005.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balanço energético nacional 2015: Ano base 2014**. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2015.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf). Acessado em 04/08/2015a.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balanço energético nacional 2014: Ano-base 2013**. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatório\\_Final\\_BEN\\_2014.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatório_Final_BEN_2014.pdf). Acesso em: 05/01/2015b.

OASMAA, A.; PEACOCKE, C. **A guide to physical property characterization of biomass-derived fast pyrolysis liquids. A guide**. Espoo. 2010. VTT Publications 731. Disponível em: [http://www.otalib.fi/cgi-bin/thw/trip/?\\$BASE}=vttjure&\\${HTML}=wwwrecorden&\\${OOHTML}=wwwrecorden&\\${TRIPSHOW}=form=wwwabstracten&\\${FREETEXT}=R%3D64861](http://www.otalib.fi/cgi-bin/thw/trip/?$BASE}=vttjure&${HTML}=wwwrecorden&${OOHTML}=wwwrecorden&${TRIPSHOW}=form=wwwabstracten&${FREETEXT}=R%3D64861). Acesso em 21/06/2015.

OLIVEIRA, P. A. V. **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos**. Concórdia. EMBRAPA-CNPSA, 1983. 188 p.

OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, M. M. **Geração e utilização de biogás em unidade de produção de suínos**. In: OLIVEIRA, P. A. V. de. Tecnologia para o manejo de resíduos na produção de suínos: manual de boas práticas. Concórdia-SC: Embrapa Suínos e Aves, 2004.



Cap. 4, p. 43-55. Disponível em:

[http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.cnpsa.embrapa.br%2Fsgc%2Fsgc\\_publicacoes%2Fpublicacao\\_14177t4r.PDF&ei=ajg1VduMsSQsQS1xYHIAQ&usg=AFQjCNE2MDsrIN9I2AV38RkY\\_1TMckWw7A&bvm=bv.91071109,d.cWc](http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.cnpsa.embrapa.br%2Fsgc%2Fsgc_publicacoes%2Fpublicacao_14177t4r.PDF&ei=ajg1VduMsSQsQS1xYHIAQ&usg=AFQjCNE2MDsrIN9I2AV38RkY_1TMckWw7A&bvm=bv.91071109,d.cWc). Acesso em: 10/02/2015.

PANOUTSOU, C. Supply of solid biofuels: Potential feedstocks, cost and sustainability issues in EU27. In: GRAMMELIS, P. (Editor) **Solid biofuels for energy - a lower greenhouse gas alternative**. Greece: Springer-Verlag London Limited, 2011. Cap. 01, p.1-20.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005.

PERA, H. Geradores de Vapor – **Um compêndio sobre conversão de Energia com vistas à preservação da ecologia**, Ciências Térmicas, Editora Fama, São Paulo, 216 p., 1990.

PRYDE, E. H. Vegetable oil as diesel fuel: Overview. **Journal of the American Oil Chemist's Society**, v. 60(8):1 557-1 558, 1983.

QUIRINO, W. F. Utilização energética de resíduos vegetais. Brasília: LPF/IBAMA, 2003. 14 p. In: RAMOS e PAULA, L. E.; TRUGUILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, abr./jun. 2011.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente, 2ª ed. Piracicaba. Edição dos autores, 2004. 302 p. Disponível em: <http://www.usp.br/green/downloads/12%20-%20Tomaz%20Caetano%20Canndvan%20Ripoli.pdf>. Acesso em 20/08/2015.

RESSOURCES NATURELLES DU CANADA - RNA. Glossaire: R. Gouvernement du Canada. Disponível em: <http://scf.mcan.gc.ca/termes/explorer/R>. Acesso em 31/07/2015.

ROOS, C. J. **Biomass drying and dewatering for clean heat and power**. Northwest Combined Heat and Power Application Center. U.S. Department of Energy. Washington, USA, p. 35., 2008.

ROSILLO-CALLE, F. A brief account of Brazil's biomass energy potential. **Biomassa e Energia**, v.1, n.3, p. 225-236, 2004.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S.; ROCHA, M. H.; LEME, M. M. V. Biocombustíveis de primeira geração: biogás. In: LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. **Biocombustíveis**. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2012. p. 312-358.

SÁNCHEZ, C.G. **Estudo da volatilização e da gaseificação de biomassa em leito fluidizado**, (Tese de Doutorado), Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Campinas, SP, 1994.

SOETAERT, W.; VANDAMME, E. J. **Biofuels**. New Delhi, India. Ed. Wiley, 2009, 257 p.  
SOLER, P. B.; LORA, E. E. S. **Pruebas de balance térmico em calderas para bagazo**. Santiago de Cuba: Departamento de Termoenergética, Facultad de Ingeniería Mecánica, ISPJAM - Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Mella, 1991.

SOUZA, Z. J. **A co-geração de energia no setor sucroalcooleiro: desenvolvimento e situação atual**. UFSCAR. Ribeirão Preto, SP. An. 4. Encontro de Energia No Meio Rural, 2002. Disponível em: [www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid...script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid...script=sci_arttext). Acesso em: 28/06/2015.

SUHAIMI, S. N.; PHANG, L.-Y.; MAEDA, T.; ABD-AZIZ, S.; WAKISAKA, M.; SHIRAI, Y.; HASSAN, M. A. Bioconversion of glycerol for bioethanol production using isolated *Escherichia coli* ss1. **Brazilian Journal of Microbiology**, 2012. Apr-Jun; v. 43(2): p. 506-516. Disponível em <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3768825/>. Acesso em 05/07/2015.

TILLMAN, D. A. **Wood as an energy resource**. Academic Press, New York, 1978.

THEMELIS, N. J.; ULLOA, P. A. Methane generation in landfills. **Renewable Energy**, v. 32 (7):1 243-1 257, 2007.

TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. **Handbook of solid waste management**. USA, Ed. McGrawHill Handbooks, 2002, 834 p.

UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO - ÚNICA. 2008. Disponível em: <http://www.unica.com.br/noticia/42556877920327850689/volume-de-producao-de-etanol-no-brasil-impressiona-delegacao-da-indonesia/>. Acesso em: 17/05/2014.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Energy efficiency and renewable energy. Hydrogen analysis resource center. Disponível em: <http://hydrogen.pnl.gov/hydrogen-data/lower-and-higher-heating-values-hydrogen-and-other-fuels>. Acesso em 10/10/2015.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. In: **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Rio Branco: Suprema, 2008. p. 195-241. In: RAMOS E PAULA, L. E.; TRUGUILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. A. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. *Cerne*, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, abr./jun. 2011.

VAN LOO, S.; KOPPEJAN, J. **The handbook of biomass combustion and co-firing**. London, UK, Ed. Eartscan, 2008, 398 p.

VERTÈS, A. A.; QURESHI, N.; BLASCHEK, H. P.; YUKAWA, H. **Biomass to biofuels: strategies for global industries**. UK, Ed. Wiley, 2010, 583 p.

ZANETTI, A. A.; JUNIOR, S. O. **Avaliação comparativa de sistemas de cogeração com utilização de bagaço de cana-de-açúcar e gás natural**. USP, São Paulo, 2006. Disponível em: [www.mecanica-poliusp.org.br/wp-content/.../Art\\_TCC\\_020\\_2006.pdf](http://www.mecanica-poliusp.org.br/wp-content/.../Art_TCC_020_2006.pdf). Acesso em: 28/06/2015.

ZUPANCIC, G. D.; GRILIC, V.; **Anaerobic treatment and biogas production from organic waste, management of organic waste**. 2012. Dr. Sunil Kumar (Ed.), InTech. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/management-of-organic-waste/anaerobic-treatment-and-biogas-production-from-organic-wastes>>. Acesso em: 10/02/2015.

## **ANEXOS**

**Tabela A.1** - Comparação de médias da análise imediata dos materiais pelo teste de Tukey.

Material	Voláteis	Cinzas	Carbono Fixo
	Média (%)	Média (%)	Média (%)
<b>(A) Cavacos próprios</b>	84,2 ± 0,23 a (0,27%)	1,0 ± 0,13 e (12,91%)	14,8 ± 0,23 e (1,56%)
<b>(B) Cavacos de terceiros</b>	71,6 ± 0,74 c (1,03%)	3,4 ± 0,27 d e (8,00%)	25,0 ± 0,74 c (2,94%)
<b>(C) Cascas de Pinus</b>	68,1 ± 0,86 d (1,27%)	10,2 ± 0,41 c (4,01%)	21,7 ± 0,86 d (3,98%)
<b>(D) Fibras e fiapos</b>	82,5 ± 0,61 b (0,74%)	6,1 ± 0,11 d (1,79%)	11,5 ± 0,61 f (5,29%)
<b>(E) Lodo (Fibra) da ETE</b>	68,3 ± 0,61 d (0,90%)	11,5 ± 0,29 c (2,54%)	20,2 ± 0,61 d (3,03%)
<b>(F) Cinzas</b>	12,6 ± 0,56 e (4,46%)	29,0 ± 2,65 b (9,14%)	58,4 ± 0,56 a (0,96%)
<b>(G) Cinzas peneiradas</b>	10,0 ± 0,52 f (5,16%)	39,5 ± 0,79 a (1,99%)	50,5 ± 0,52 b (1,02%)

Nota: As médias são seguidas por seus respectivos desvios padrões e entre parênteses, indica-se o coeficiente de variação (Cov). No teste de Tukey, letras coincidentes indicam que as médias são iguais e letras diferentes indicam que as médias são diferentes estatisticamente, com intervalo de confiança de 95% ( $\alpha = 0,05$ ).

**Tabela A.2** - Estimativa do poder calorífico útil (PCU) de cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas (C), fibras e fiapos (D) e lodo da ETE (E) a partir do poder calorífico superior (PCS) e das umidades médias mensais das biomassas (%).

	<b>(A) Cavacos próprios</b>			<b>(B) Cavacos terceiros</b>			<b>(C) Cascas</b>		
	Cons t/d	Umid %	PCU <sub>A</sub> kcal/kg	Cons t/d	Umid %	PCU <sub>B</sub> kcal/kg	Cons t/d	Umid	PCU <sub>C</sub> kcal/kg
<b>mar/14</b>	2,1	38,1	2888,4	123,5	44,5	1886,3	5,0	45,0	2223,6
<b>abr/14</b>	0,4	38,1	2888,4	163,9	55,0	1412,8	2,4	52,9	1817,0
<b>mai/14</b>	0,7	39,0	2837,6	125,5	56,4	1350,9	5,3	64,7	1210,7
<b>jun/14</b>	15,3	38,0	2894,0	168,5	54,7	1428,3	5,7	65,0	1196,9
<b>jul/14</b>	0,6	39,0	2837,6	158,0	57,0	1325,3	5,3	68,2	1032,6
<b>ago/14</b>	0,9	38,0	2894,0	153,1	57,2	1316,8	5,9	53,4	1792,4
<b>set/14</b>	-	-		142,5	51,2	1585,0	2,5	53,0	1812,9
<b>out/14</b>	10,2	39,0	2837,6	147,3	53,9	1463,0	4,2	56,6	1629,6
<b>nov/14</b>	-	-		131,2	51,0	1595,4	-	-	
<b>MÉDIA</b>	<b>4,3</b>	<b>38,5</b>	<b>2868,2</b>	<b>145,9</b>	<b>53,4</b>	<b>1484,9</b>	<b>4,5</b>	<b>57,4</b>	<b>1589,5</b>

**Tabela A.3** - Estimativa do poder calorífico útil (PCU) de fibras e fiapos (D) a 80% de umidade e do lodo da ETE (E) a 55% de umidade, a partir do poder calorífico superior (PCS).

<b>(D) Fibras e fiapos</b>				<b>(E) Lodo da ETE Úmido (atualmente não é queimado)</b>			
Cons. tss/d	Umid. %	Cons. t umid./d	PCU <sub>D1</sub> kcal/kg	Cons. t ss/d	Umid %	Cons. t umid./d	PCU <sub>E1</sub> kcal/kg
2,9	<b>80,0</b>	14,3	343,1	10,2	<b>55,0</b>	22,7	993,1
3,0	<b>80,0</b>	15,2	343,1	10,3	<b>55,0</b>	22,9	993,1
2,8	<b>80,0</b>	14,2	343,1	11,7	<b>55,0</b>	25,9	993,1
2,9	<b>80,0</b>	14,6	343,1	12,4	<b>55,0</b>	27,6	993,1
2,6	<b>80,0</b>	13,0	343,1	11,1	<b>55,0</b>	24,6	993,1
2,4	<b>80,0</b>	12,2	343,1	9,6	<b>55,0</b>	21,3	993,1
2,6	<b>80,0</b>	13,2	343,1	8,6	<b>55,0</b>	19,1	993,1
2,5	<b>80,0</b>	12,6	343,1	9,5	<b>55,0</b>	21,2	993,1
1,2	<b>80,0</b>	6,0	343,1	8,7	<b>55,0</b>	19,3	993,1
<b>2,56</b>	<b>80,0</b>	<b>12,8</b>	<b>343,1</b>	<b>10,2</b>	<b>55,0</b>	<b>22,7</b>	<b>993,1</b>

$$PCSs \text{ (MJ/kg)} = 0,3491 C^s + 1,1783 H^s + 0,1005 S^s - 0,0151 N^s - 0,1034 O^s - 0,0211 A^s$$

C<sup>s</sup>, H<sup>s</sup>, S<sup>s</sup>, N<sup>s</sup>, O<sup>s</sup>, valores da análise elementar; A<sup>s</sup>, valor da análise imediata

$$PCI = PCS - (600 \cdot 0,09 \cdot \% H^s)$$

H<sup>s</sup>, valor da análise elementar

$$PCU = (PCI \cdot (1 - (0,01 \cdot \% \text{ Umidade}))) - (600 \cdot 0,01 \cdot \% \text{ Umidade})$$

Umidade, % de água do combustível.

**Tabela A.4** - Estimativa do poder calorífico útil (PCU), de fibras e fiapos (D) e lodo da ETE (E), a partir do poder calorífico superior (PCS) e da umidade final de 20%, considerando que estes resíduos foram secos em secador de biomassa para redução da umidade.

	<b>(D) Fibras/fiapos após Secagem</b>				<b>(E) Lodo da ETE após Secagem</b>			
	Cons. tss/d	Umid. %	Cons. t umid./d	PCU <sub>D2</sub> kcal/kg	Cons. tss/d	Umid. %	Cons. t umid./d	PCU <sub>E2</sub> kcal/kg
<b>mar/14</b>	2,9	<b>20,0</b>	3,6	3172,5	10,2	<b>20,0</b>	12,8	2232,1
<b>abr/14</b>	3,0	<b>20,0</b>	3,8	3172,5	10,3	<b>20,0</b>	12,9	2232,1
<b>mai/14</b>	2,8	<b>20,0</b>	3,6	3172,5	11,7	<b>20,0</b>	14,6	2232,1
<b>jun/14</b>	2,9	<b>20,0</b>	3,6	3172,5	12,4	<b>20,0</b>	15,5	2232,1
<b>jul/14</b>	2,6	<b>20,0</b>	3,2	3172,5	11,1	<b>20,0</b>	13,8	2232,1
<b>ago/14</b>	2,4	<b>20,0</b>	3,0	3172,5	9,6	<b>20,0</b>	12,0	2232,1
<b>set/14</b>	2,6	<b>20,0</b>	3,3	3172,5	8,6	<b>20,0</b>	10,7	2232,1
<b>out/14</b>	2,5	<b>20,0</b>	3,1	3172,5	9,5	<b>20,0</b>	11,9	2232,1
<b>nov/14</b>	1,2	<b>20,0</b>	1,5	3172,5	8,7	<b>20,0</b>	10,9	2232,1
<b>MÉDIA</b>	<b>2,6</b>	<b>20,0</b>	<b>3,2</b>	<b>3172,5</b>	<b>10,2</b>	<b>20,0</b>	<b>12,8</b>	<b>2232,1</b>

**Tabela A.5** – Cálculo da perda de calor devido remoção de cinzas (F) e cinzas peneiras da fornalha da caldeira a partir do poder calorífico útil médio (PCU).

<b>Perda de calor devido remoção de (F) Cinzas e (G) Cinzas peneirada, Q<sub>2</sub></b>			
	Perdas de cinzas t/d	PCU(*) (kcal/kg)	Caloria (Mcal/d)
<b>mar/14</b>	0,4	1729,8	694,8
<b>abr/14</b>	0,9	1729,8	1579,9
<b>mai/14</b>	0,4	1729,8	686,2
<b>jun/14</b>	0,8	1729,8	1297,4
<b>jul/14</b>	1,1	1729,8	1874,0
<b>ago/14</b>	1,0	1729,8	1689,4
<b>set/14</b>	1,0	1729,8	1712,5
<b>out/14</b>	0,9	1729,8	1487,6
<b>nov/14</b>	1,6	1729,8	2842,7
<b>MÉDIA</b>	<b>0,9</b>	<b>1729,8</b>	<b>1540,5</b>

**Tabela A.6** - Cálculo do percentual de energia inserida na caldeira (Q<sub>5</sub>) em função da secagem de fibras e fiapos (D) e lodo da ETE (E) e do percentual de energia da chaminé utilizado na secagem de biomassa.

<b>TOTAL CALORIAS BIOMASSA ÚMIDA E APÓS SECAGEM</b>				
	Total calorias úmido (Q <sub>1</sub> ) Mcal/d	Total calorias pós-secagem (Q <sub>5</sub> ) Mcal/d	Diferença com secagem (Q <sub>6</sub> ) Mcal/d	Percentual de aumento (%Q) %
<b>mar/14</b>	254941,0	289885,9	34944,8	13,71
<b>abr/14</b>	242081,7	277708,2	35626,4	14,72
<b>mai/14</b>	182766,2	221721,6	38955,4	21,31
<b>jun/14</b>	296795,2	338000,9	41205,7	13,88
<b>jul/14</b>	220950,7	257689,3	36738,6	16,63
<b>ago/14</b>	218960,7	251153,2	32192,5	14,70
<b>set/14</b>	234817,2	264672,2	29855,0	12,71
<b>out/14</b>	255615,7	287883,8	32268,1	12,62
<b>nov/14</b>	211376,8	238351,0	26974,2	12,76
<b>MÉDIA</b>	<b>235367,2</b>	<b>269674,0</b>	<b>34306,8</b>	<b>14,8</b>

Q<sub>1</sub>, total de calorias úmido, total de energia inserida na caldeira na umidade natural

Q<sub>5</sub>, total de calorias pós-secagem, total de energia das biomassas, incluindo fibras e fiapos e lodo da ETE após secagem

Q<sub>6</sub> = Q<sub>5</sub> - Q<sub>1</sub>

%Q = (Q<sub>6</sub>/Q<sub>1</sub>) . 100

**Tabela A.7** - Cálculo da energia consumida na caldeira na geração de vapor ( $Q_v$ ), da energia perdida na chaminé ( $Q_3$ ), quantidade de água a ser evaporada ( $M_4$ ), energia para evaporar água na secagem ( $Q_4$ ) e do percentual de energia perdida na chaminé ( $\%Q_s$ ).

<b>% DE ENERGIA APROVEITADA DA ENERGIA LIBERADA PELA CHAMINÉ</b>					
	Energia consumida na caldeira na geração de vapor ( $Q_v$ )	Energia perdida pela chaminé, 12% da energia de combustão ( $Q_3$ )	Quant de água para secar fibras/fiapos de 80% para 20% e lodo de 55% para 20%. ( $M_4$ )	Energia para evaporar água na secagem (615 kcal/kg) ( $Q_4$ )	% de energia utilizada da energia perdida na chaminé ( $\%Q_s$ )
	Mcal/d	Mcal/d	kg/d	Mcal/d	%
<b>mar/14</b>	254246,2	30509,5	5292,3	3651,7	<b>12,0</b>
<b>abr/14</b>	240501,8	28860,2	5435,0	3750,2	<b>13,0</b>
<b>mai/14</b>	182080,0	21849,6	5789,1	3994,5	<b>18,3</b>
<b>jun/14</b>	295497,8	35459,7	6093,6	4204,6	<b>11,9</b>
<b>jul/14</b>	219076,7	26289,2	5431,5	3747,8	<b>14,3</b>
<b>ago/14</b>	217271,3	26072,6	4810,4	3319,2	<b>12,7</b>
<b>set/14</b>	233104,7	27972,6	4580,8	3160,7	<b>11,3</b>
<b>out/14</b>	254128,0	30495,4	4845,3	3343,3	<b>11,0</b>
<b>nov/14</b>	208534,1	25024,1	3765,0	2597,9	<b>10,4</b>
<b>MÉDIA</b>	<b>233826,7</b>	<b>28059,2</b>	<b>5115,9</b>	<b>3530,0</b>	<b>12,7</b>

$Q_v$ , energia consumida na caldeira para geração de vapor menos energia removidas com as cinzas

$Q_3 = 12\% \times$  da energia líquida utilizada na geração de vapor

$M_4$ , quantidade de água a ser evaporada para reduzir a umidade de fibras e fiapos de 80% para 20% e de lodo da ETE de 55% para 20%

$Q_4$ , quantidade de calor para evaporar água para redução de umidade

$\%Q_s$ , quantidade de calor perdidas na chaminé, 12% da energia utilizada na geração de vapor.



**Tabela A.8** - Cálculo do consumo de combustível para gerar 20,7 t/h de vapor, na queima de combustíveis normalmente utilizados: cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas (C), fibras e fiapos (D).

<b>CÁLCULO DO PCU<sub>1</sub> MÉDIO (antes da secagem)</b>						
	% cav. pro.	% cav. terc.	% casc.	% fib./fia.	PCU <sub>1</sub> med. (I)	Quant. Comb. p/20,7 t vap./h (kg/h) (Q <sub>C1</sub> )
	%	%	%	%	kcal/kg	kg/h
<b>mar/14</b>	1,5	92,6	3,8	2,1	1881,3	7725,7
<b>abr/14</b>	0,2	96,6	1,4	1,8	1402,3	10891,1
<b>mai/14</b>	0,5	93,4	3,9	2,1	1331,8	11091,1
<b>jun/14</b>	8,0	87,6	3,0	1,5	1521,5	9391,3
<b>jul/14</b>	0,4	94,9	3,2	1,6	1306,0	11420,9
<b>ago/14</b>	0,6	94,3	3,6	1,5	1328,3	11227,9
<b>set/14</b>	0,0	96,6	1,7	1,8	1566,6	9157,9
<b>out/14</b>	6,2	89,7	2,5	1,5	1535,6	9352,0
<b>nov/14</b>	0,0	99,1	0,0	0,9	1584,1	8744,1
<b>MÉDIA</b>	<b>1,9</b>	<b>93,9</b>	<b>2,6</b>	<b>1,6</b>	<b>1495,3</b>	<b>9889,1</b>

PCU<sub>1</sub>, poder calorífico útil médio da mistura de biomassa inserida na caldeira, na umidade tal qual recebida na caldeira

Q<sub>C1</sub>, quantidade de combustível necessário para geração média de 20,7 t/h de vapor (Equação 9)

**Tabela A.9** – Cálculo do consumo de combustível para geração de 20,7 t/h de vapor, na queima dos combustíveis: cavacos próprios (A), cavacos de terceiros (B), cascas (C), fibras e fiapos (D) e lodo da ETE (E) após secagem a 20% de umidade.

<b>CÁLCULO DO PCU<sub>2</sub> MÉDIO (após s secagem)</b>							
	% cav. pro.	% cav. terc.	% casc.	% fib./fia.	% lodo ETE	PCU <sub>2</sub> (III)	Quant. Comb. p/20,7 t vap./h (kg/h) (Q <sub>C2</sub> )
	%	%	%	%	%	kcal/kg	kg/h
<b>mar/14</b>	1,4	86,0	3,5	2,0	7,1	1962,6	7405,7
<b>abr/14</b>	0,2	91,1	1,3	1,7	5,7	1497,7	10197,6
<b>mai/14</b>	0,5	86,0	3,6	1,9	8,0	1458,8	10125,3
<b>jun/14</b>	7,5	82,3	2,8	1,4	6,1	1604,8	8903,9
<b>jul/14</b>	0,3	89,0	3,0	1,5	6,2	1405,1	10615,6
<b>ago/14</b>	0,5	89,1	3,4	1,4	5,6	1418,6	10512,8
<b>set/14</b>	0,0	91,3	1,6	1,7	5,5	1650,8	8690,8
<b>out/14</b>	5,9	84,8	2,4	1,4	5,5	1614,8	8893,8
<b>nov/14</b>	0,0	93,0	0,0	0,9	6,2	1648,1	8404,4
<b>MÉDIA</b>	<b>1,8</b>	<b>88,0</b>	<b>2,4</b>	<b>1,5</b>	<b>6,2</b>	<b>1584,6</b>	<b>9305,6</b>

PCU<sub>2</sub>, poder calorífico médio, após secagem de fibras e fiapos e lodo da ETE a 20% de umidade

Q<sub>C2</sub>, quantidade de combustível necessária para mesma geração média de vapor, 20,7 t/h após secagem

**Tabela A.10** - Redução do consumo de biomassa com a queima de resíduos celulósicos secos a 20% de umidade.

<b>ECONOMIA DE BIOMASSA</b>			
	Redução de biomassa para gerar 20,7 t/h Vapor (Q <sub>C</sub> ) kg/h	Redução % biomassa (%Q <sub>C</sub> ) %	Redução de biomassa mensal (24h × 30 d/m) (I) t/m
<b>mar/14</b>	320,0	4,1	230,4
<b>abr/14</b>	693,5	6,4	499,3
<b>mai/14</b>	965,8	8,7	695,4
<b>jun/14</b>	487,3	5,2	350,9
<b>jul/14</b>	805,2	7,1	579,8
<b>ago/14</b>	715,1	6,4	514,9
<b>set/14</b>	467,2	5,1	336,4
<b>out/14</b>	458,2	4,9	329,9
<b>nov/14</b>	339,7	3,9	244,6
<b>MÉDIA</b>	583,5	5,7	420,2

Q<sub>C</sub>, redução da biomassa devido aumento do PCU

%Q<sub>C</sub>, redução percentual da biomassa devido aumento do PCU

(I), redução de biomassa mensal.