



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

LUIZ EDUARDO BARBOSA GIRÃO

**BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: INVESTIGAÇÃO DO PODER CALORÍFICO
E POTENCIAL ENERGÉTICO**

FORTALEZA
2016

LUIZ EDUARDO BARBOSA GIRÃO

**BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: INVESTIGAÇÃO DO PODER CALORÍFICO E
POTENCIAL ENERGÉTICO**

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

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Alexandra de Sousa Rios.

FORTALEZA
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G432b Girão, Luiz Eduardo Barbosa.

Bagaço de cana-de-açúcar : investigação do poder calorífico e potencial energético / Luiz Eduardo Barbosa Girão. – 2016.
42 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2016.
Orientação: Profa. Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios.

1. Bagaço de cana. 2. Biomassa. 3. Cana-de-açúcar. 4. Potencial energético. I. Título.

CDD 621.042

BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: INVESTIGAÇÃO DO PODER CALORÍFICO E
POTENCIAL ENERGÉTICO

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

Aprovada em ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Maria Alexandra de Sousa Rios (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Claus Franz Wehmann
Universidade Federal do Ceará (UFC)

“Você nunca sabe a força que tem, até que a sua
única alternativa é ser forte.”

(John Christopher Depp II)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe, pessoa que nunca poupou esforços para me fornecer uma educação de qualidade desde o meu nascimento até o seu último dia de vida.

À minha tia Augusta, uma segunda mãe que eu tive a dádiva de ter.

À minha irmã, Luiza Jovina, que sempre esteve ao meu lado nas situações mais difíceis.

À minha orientadora, Prof.^a Dr^a Maria Alexandra S. Rios, e à minha colega de laboratório, Mariana Vidal por terem disponibilizado o seu tempo para orientar-me e concedido o LARBIO (Laboratório de Biocombustíveis) para o desenvolvimento deste trabalho, e também por serem sempre tão prestativas e atenciosas comigo na execução deste trabalho, sempre compartilhando o vasto conhecimento na área e auxiliando na realização dos experimentos.

Aos meus amigos do curso de Engenharia, José Cláudio, Rafael Façanha, João Gomes, Júnior Paiva, José Augusto, Yan Nunes, Vitória Sales, Nathaly Cavalcante, Maria de Fátima e Rafael Cronemberger que estiveram sempre comigo nesta longa caminhada.

Aos meus amigos pessoais, Neres de Lima, Arthur Yannayev, Marcelo Marques, Gildson Filho, Hudson Gondim, Larisse Cavalcante, Sâmia Dias, Pâmela Soares, que sempre se fizeram presentes em minha vida mesmo antes do início da graduação.

RESUMO

Diante do contexto mundial concernente à configuração energética, há a tendência que as fontes de energias renováveis tomem cada vez mais espaço no cenário atual. Dentre essas fontes de energia, encontra-se a biomassa. Por ser um dos maiores produtores de açúcar e etanol do mundo, o Brasil é também um grande gerador de resíduos proveniente do bagaço de cana. Esse tipo de resíduo ocupa um espaço considerável nos aterros sanitários, e, não raras as vezes, pode causar sérios problemas ambientais, quando negligenciados e deixados de forma incorreta na natureza. Como solução, buscou-se um melhor destino para este resíduo e isso tem se refletido na matriz energética brasileira, a qual tem aproximadamente 12% do bagaço de cana em sua composição. Diante deste cenário, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os teores de cinzas, voláteis, umidade e carbono fixo para o bagaço de cana de açúcar, bem como o Poder Calorífico Superior (PCS), para que o potencial energético do referido resíduo pudesse ser investigado. Os procedimentos experimentais foram executados segundo metodologias descritas nas normas ABNT NBR 8112 e 8633. De acordo com os resultados de análise imediata e PCS, o bagaço utilizado no experimento apresentou a seguinte composição, 67% de teor de voláteis, 18,64% de teor de cinzas e um PCS de 16,8719 MJ/kg, pode-se inferir que o bagaço de cana apresenta significativo potencial energético para utilização como biocombustível, sendo uma alternativa interessante à energia provinda de combustíveis fósseis que é de quase 60% da matriz energética nacional.

Palavras Chave: Potencial energético, Bagaço de cana, PCS.

ABSTRACT

Given the global current energy configuration, there is a tendency for renewable energy resources to take more and more space worldwide. Among these energy sources is biomass. As one of the world's largest producers of sugar and ethanol, Brazil is also a major generator of waste from sugarcane bagasse. This type of waste occupies considerable space in landfills, and not infrequently can cause serious environmental problems when neglected and left out incorrectly in nature. As a solution, a better destination for this waste was sought and this has been reflected in the Brazilian energy matrix, which has approximately 12% of the sugarcane bagasse in its composition. The objective of this study was to evaluate the ash, volatile, moisture and fixed carbon contents for the sugarcane bagasse, as well as the Upper Calorific Power (PCS), so that the energy potential of said residue could be under study. The experimental procedures were performed according to the methodologies described in ABNT NBR 8112 and 8633. According to the results of immediate analysis and PCS, the bagasse used in the experiment had the following composition: 67% volatile content, 18.64% Of ash and a PCS of 16.8719MJ/kg, it can be inferred that sugarcane bagasse presents significant energetic potential for use as biofuel. It is an interesting alternative to fossil fuel energy that is almost 60% of the national energy matrix.

Keywords: *Potential Energetic, Biomass, Sugar Cane Bagasse.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxo de energia no ecossistema.....	18
Figura 2 – Bagaço de cana <i>in natura</i>	33
Figura 3 - Bagaço de cana após peneiramento.....	34
Figura 4 - Medidor de umidade ID200.....	34
Figura 5 - Forno mufla.....	35
Figura 6 - Bomba calorimétrica	36

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Produção de energia provinda da lenha desde 1970.....	20
Gráfico 2 - Destino energético da lenha.....	21
Gráfico 3 - Destino energético do carvão vegetal.....	22
Gráfico 4 - Produção de energia provinda do bagaço de cana desde 1970.....	27
Gráfico 5 – Produtividade regional de cana no Brasil.....	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de rejeitos sólidos urbanos por habitante e suas características.....	24
Tabela 2 – Produção de cana-de-açúcar dos 10 maiores produtores.....	26
Tabela 3 – Análise elementar de três culturas de biomassa.....	32
Tabela 4 – Análise das amostras do bagaço de cana.....	36
Tabela 5 – PCS de diferentes culturas, incluindo o bagaço de cana.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
MME	Ministério de Minas e Energia
MTep	Milhões de Toneladas Equivalentes de Petróleo
MW	Megawatt
t/ano	Toneladas por ano
TWh	TeraWatt-hora
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
BRACELPA	Associação Brasileira de Celulose e Papel
CETEC	Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
LARBIO	Laboratório de Referência em Biocombustíveis
PCS	Poder Calorífico Superior
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação.
T_c	Teor de cinzas
T_u	Teor de umidade
T_v	Teor de voláteis
T_{cf}	Teor de carbono fixo
ω	Teor de cinzas
bu	Base úmida
bs	Base seca
C	Carbono
H	Hidrogênio
N	Nitrogênio
S	Enxofre
O	Oxigênio
CO ₂	Gás carbônico
ρ	Massa específica
a.C.	Antes de Cristo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo geral.....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 Definição e conceito de biomassa.....	17
3.2 Histórico da biomassa.....	18
3.3 Tipos de biomassa.....	19
3.3.1 Florestal.....	19
3.3.1.1 Lenha.....	19
3.3.1.2 Carvão Vegetal.....	21
3.3.2 Biomassa do lixo.....	22
3.3.2.1 Rejeitos Urbanos.....	23
3.3.2.2 Rejeitos Industriais.....	24
3.3.3 Biomassa de origem agrícola.....	25
3.3.3.1 Cana-de-açúcar.....	25
3.3.3.1.1 Produção da cana-de-açúcar no mundo.....	25
3.3.3.1.2 Crescimento na produção do Brasil.....	26
3.3.3.2 Outros tipos de cultura.....	28
3.4 Caracterização e propriedades físicas da biomassa	29
3.4.1 Massa específica.....	29
3.4.2 Análise imediata.....	29
3.4.2.1 Teor de umidade.....	29
3.4.2.2 Teor de voláteis.....	30
3.4.2.3 Teor de cinzas.....	31
3.4.2.4 Teor de carbono fixo.....	31
3.4.3 Análise elementar.....	32
3.4.4 Poder calorífico.....	32
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
4.1 Localização dos experimentos.....	33
4.2 Coleta das amostras.....	33
4.3 Caracterização dos materiais.....	33

4.4 Operação de Peneiramento.....	33
4.5 Metodologia para determinação do teor de umidade.....	34
4.6 Metodologia para determinação do teor de voláteis.....	35
4.7 Metodologia para determinação do teor de cinzas.....	35
4.8 Metodologia para determinação do poder calorífico.....	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5.1 Teor de umidade	37
5.2 Teor de voláteis	37
5.3 Teor de cinzas.....	38
5.4 Teor de carbono fixo.....	38
5.5 Poder calorífico.....	38
6 CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

Efeito estufa e suas consequências são corriqueiramente constantes em notícias, tanto em âmbito nacional como mundial. Como consequência deste efeito, temos um forte impacto ecológico. Derretimento das calotas polares, mudanças climáticas, retenção do calor na atmosfera, áreas em processo de desertificação e desequilíbrio de ecossistemas são alguns dos impactos do efeito estufa. A principal causa deste fenômeno é a emissão de gases poluentes, sendo o principal poluente é o gás carbônico ou dióxido de carbono, produto da queima de combustíveis fósseis e seus derivados. (FREITAS, 2016)

Segundo o balanço energético nacional de 2016, quase 60% da matriz energética brasileira ainda é baseada em combustíveis fósseis. Em nível mundial, esse valor sobe para mais de 80%, não é por acaso que encontros sobre o clima com grandes líderes mundiais têm se tornado frequentes e necessários. Como alternativa aos combustíveis fósseis, aparecem no cenário as energias renováveis, dentre elas, a biomassa, que também gera CO₂ ao final do processo, mas que é compensado anteriormente com a fotossíntese, que absorve esse mesmo gás carbônico.

Uma das principais fontes de energia com maior potencial de desenvolvimento nos próximos anos, no mercado interno e internacional, é a biomassa, que traz vantagens na atenuação da dependência de combustíveis fósseis e na diversificação da matriz energética do país. Apesar de ser encontrada em maior abundância, grande parte destes recursos energéticos encontra-se em regiões pouco desenvolvidas, na qual têm como principal fonte de subsistência a agricultura (ANEEL, 2002).

A matriz energética brasileira ainda é muito dependente dos combustíveis fósseis, fato este que implica diretamente no incremento da poluição e consequente aumento dos problemas ambientais, assim como, o aumento do quantitativo de resíduos industriais e urbanos, também acarreta poluição do ambiente, além de subutilizar uma especial fonte de energia renovável que é a biomassa presente nos referidos resíduos.

O bagaço da cana é o maior resíduo agrícola produzido no Brasil com aproximadamente 280 kg de bagaço por tonelada de cana-de-açúcar moída. De acordo com a Aneel, quase 400 usinas usam esta fonte para suprir toda a demanda de produção térmica e elétrica durante o período de safra. São Paulo se destaca com a maioria, 172 usinas. O Ceará aparece modestamente com apenas uma usina, localizada no município de Jaguaruana, a 183 km de Fortaleza.

Esses tipos de resíduos lignocelulósicos possuem uma relevante capacidade calorífica, como também são fontes energéticas capazes de substituir algumas fontes de combustíveis fósseis, o que pode tornar essa atividade vantajosa (SILVA, 2001).

Diante dessa problemática, o presente trabalho foi desenvolvido visando à investigação e análise do potencial energético do bagaço de cana, para que se pudesse comprovar a possibilidade de aproveitamento deste resíduo que, de certa forma, quando expostos de maneira incorreta no ambiente, pode ocasionar malefícios a população. E que têm um enorme potencial energético a ser explorado.

O estudo desenvolvido envolveu análises necessárias a qualificação do material, como uma boa alternativa para aproveitamento deste como fonte geradora de energia. Tais análises foram: Teor de Umidade, Teor de Voláteis, Teor de Cinzas, Carbono Fixo e Poder Calorífico Superior.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O trabalho teve como objetivo caracterizar a biomassa proveniente de Resíduos Agrícolas, em particular, o bagaço de cana-de-açúcar.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o bagaço de cana de açúcar;
- Determinar a análise imediata, umidade, teor de cinzas, voláteis, carbono fixo e poder calorífico superior da biomassa seca.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Definição e conceito de biomassa.

Higman e Van der Burgt (2003) apud Fonseca (2009) definem, de forma abrangente, a biomassa como sendo qualquer combustível ou matéria bruta derivados de organismos que estiveram vivos recentemente. Tal definição claramente exclui os tradicionais combustíveis fósseis, como o petróleo, carvão mineral e xistos betuminosos, que, mesmo tendo sido derivados de matéria orgânica vegetal e animal, necessitaram de milhões de anos para sua conversão na forma que são encontrados atualmente. Com exceção de algumas microalgas e matérias com altos índices de umidade, a biomassa se caracteriza, essencialmente, por ser uma matéria carbonada em estado sólido.

Outra definição, semelhante às supracitadas, é apresentada por Nogueira e Lora (2005), no qual se pode considerar a biomassa, de forma mais abrangente, como sendo todo material de origem orgânica, como por exemplo, a madeira, detritos animais e resíduos orgânicos, sendo de grande interesse os resíduos agrícolas como a casca de arroz, a serragem e o bagaço da cana-de-açúcar.

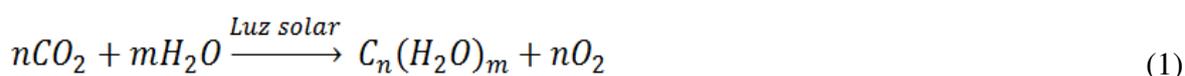
Ainda em definições e nomenclaturas concernentes ao termo “biomassa”, face à sua origem ser tanto de plantas quanto de animais, denominações específicas são dadas. Dessa forma, toda matéria orgânica originada da flora é conhecida por fitomassa, enquanto a proveniente da fauna é intitulada de zoomassa (COELHO, 1982).

Assim, do ponto de vista energético, infere-se que a biomassa se constitui num recurso renovável proveniente da matéria orgânica de natureza diversificada que pode ser utilizado na produção de energia.

Como nos combustíveis convencionais, a energia contida na biomassa é energia química associada com os átomos de carbono e hidrogênio contidos nas moléculas orgânicas oxidáveis. Para organização e assimilação dessas moléculas orgânicas e consequente produção de biomassa vegetal, ocorre nos vegetais a conversão do dióxido de carbono e da água para uma forma de combustível orgânico, comumente chamada de glicose.

Este processo é chamado de fotossíntese, sendo indispensável para tal, a exposição de tecidos fotossintetizantes à energia solar.

O processo de fotossíntese pode ser resumido na Equação (1):

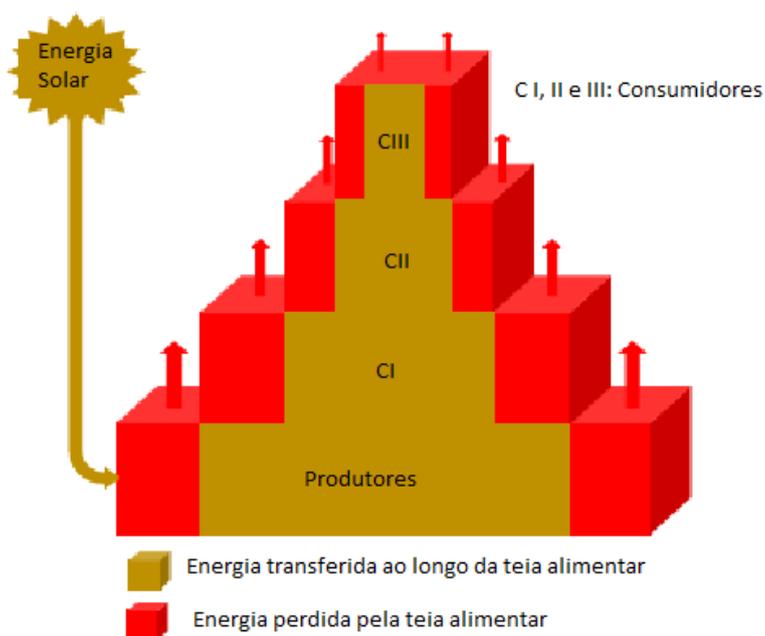


Na reação de fotossíntese, o termo $C_n(H_2O)_m$ é usado para representar uma classe de compostos orgânicos conhecidos como hidratos de carbono ou carboidratos, os quais têm origem no decorrer da reação.

Ushima (2006) reafirma que a biomassa pode ser tida como uma fonte natural de energia, pois armazena a energia solar através da reação de fotossíntese, tendo como principais componentes a hemicelulose, a lignina e a celulose (composição média: $C_6H_{10}O_5$), variando pouco, dependendo de sua natureza.

A figura 1 representa o fluxo de energia ao longo da teia alimentar.

Figura 1- Representação gráfica da transferência e da perda energética ao longo dos níveis tróficos do ecossistema.



Fonte: Adaptado de (Lima et al., 2016)

3.2 Histórico da biomassa.

Desde tempos imemoriais a biomassa tem sido importante como fonte energética. Os historiadores estimam que a descoberta do fogo data de 500.000 a.C., o que certamente corresponde às primeiras utilizações da biomassa (principalmente madeira de árvores) para geração de calor para cozimento de alimentos e proteção contra o frio (GUARDABASSI, 2006).

Na história da humanidade, o uso de madeira proveniente de florestas foi o grande responsável pelo desmatamento das áreas vegetais do planeta, incluindo-se aí a Europa e os Estados Unidos. Mesmo no Brasil, a destruição da Mata Atlântica e de grande parte da

Floresta Amazônica é consequência do desmatamento indiscriminado, em grande parte para utilização da madeira como fonte de energia de forma não sustentável.

Por este motivo, durante muito tempo, a biomassa foi vista de forma pejorativa, como sendo um combustível para ser usado apenas por países subdesenvolvidos. Entretanto, as crises do petróleo da década de 1970 tiveram papel significativo para alterar esta visão, pois o uso da biomassa como fonte de energia passou a ser encarado como uma opção alternativa em substituição aos derivados de petróleo.

3.3 Tipos de biomassa

3.3.1 Florestal

De acordo com Nogueira e Lora (2002) a biomassa energética florestal é definida como produtos e subprodutos dos recursos florestais que incluem basicamente biomassa lenhosa. O conteúdo energético desta classe de biomassa está associado à celulose e lignina contidas na matéria e ao baixo teor de umidade. Seu aproveitamento no uso final energético se realiza, principalmente, através das rotas tecnológicas de transformação termoquímica mais simples, como combustão direta e carbonização, mas rotas mais complexas também são empregadas para a produção de combustíveis líquidos e gasosos, como metanol, etanol, gases de síntese, licor negro - subproduto da indústria de celulose - entre outros.

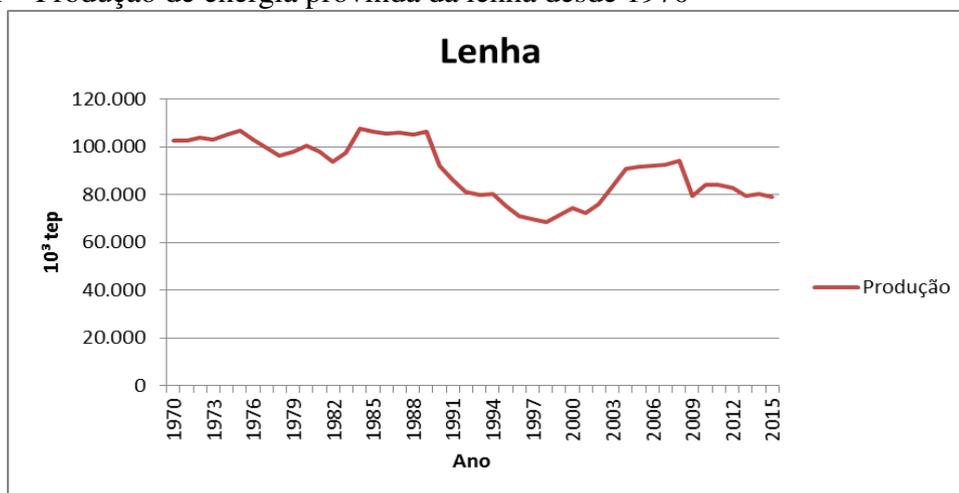
No tocante a florestas plantadas para produção de energia, Soares Filho et al. (2002) destacam que a biomassa florestal pode ser utilizada como fonte de energia limpa, renovável, e geradora de empregos. Os autores relatam que, embora possua desenvolvida capacitação tecnológica para exploração dos recursos florestais além de possuir extensas áreas, relevo, clima e condições biológicas excepcionais para a produção da biomassa florestal, o elevado custo de produção seja a explicação para o não aproveitamento da biomassa florestal na geração de eletricidade no Brasil. (LIMA, 2016)

3.3.1.1 Lenha

A lenha é definida como ramos, troncos ou quaisquer pedaços de madeira que podem ser utilizados como combustível. No Brasil, ela participa com cerca de 8% da produção de energia primária e continua tendo grande participação na matriz energética do país, sendo de fundamental importância para o setor residencial e agrícola, pois é fonte de, respectivamente 24,6% e 23,9% do total de energia consumida no setor. Em relação a sua composição a lenha possui de 41% a 49% de celulose, de 15% a 27% de hemicelulose e de

18% a 24% de lignina e seu poder calorífico inferior médio é de 3100 kcal/kg. O gráfico 1 ilustra a produção de energia provinda da lenha ao longo dos últimos 45 anos.

Gráfico 1 – Produção de energia provinda da lenha desde 1970



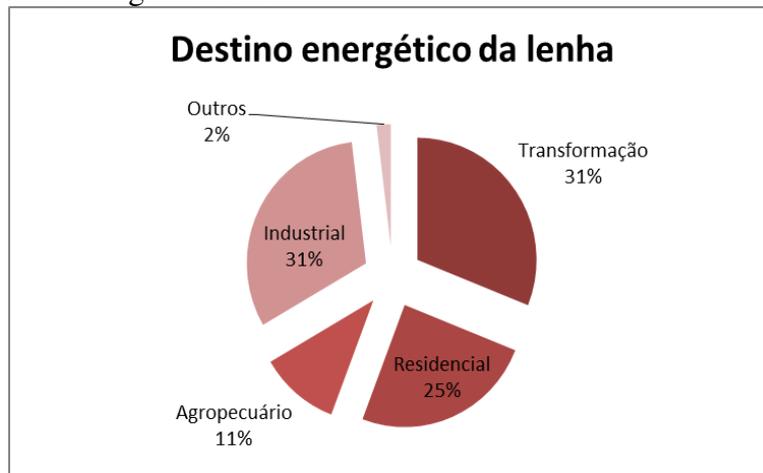
Fonte: Balanço Energético Nacional (2016).

A produção de lenha pode ser dividida em dois segmentos: a lenha catada e a lenha produzida para fins comerciais.

A lenha catada proveniente de matas nativas parecia uma fonte inesgotável desta biomassa, contudo a forma predatória com que a mesma foi explorada causou problemas críticos em diversas regiões do país. Várias regiões onde existiam abundantes coberturas florestais passaram a conviver com a degradação do solo, a alteração no regime das chuvas e consequente desertificação.

Na produção de lenha para fins comerciais, principalmente nas serrarias e indústrias de móveis, a lenha proveniente das matas nativas é substituída pela lenha de reflorestamento, sendo o eucalipto a principal árvore cultivada para este fim. Após a utilização da lenha nas fábricas são gerados resíduos industriais como pontas de toras, costaneiras e serragem de diferentes tamanhos e densidade. Tais resíduos podem ter um aproveitamento energético.

A unidade primária da lenha é o metro cúbico estereo (m^3 st). Para a lenha de uso residencial - vulgarmente identificada como “catada” - foi adotada densidade de $300 \text{ kg}/m^3$ st, valor médio identificado em pesquisa realizada pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC em localidades do Estado de Minas Gerais. Para a lenha comercial, foi utilizada a densidade de $390 \text{ kg}/m^3$ st, segundo dados fornecidos pela BRACELPA. O gráfico 2 nos mostra o destino da energia provinda da lenha.

Gráfico 2 – Destino energético da lenha

Fonte: elaborado pelo autor.

3.3.1.2 Carvão Vegetal

No Brasil em 2015, cerca de 31% da lenha produzida foi transformada em carvão vegetal. Esta transformação é realizada através dos processos conhecidos como carbonização, que consiste na queima da lenha com presença controlada de ar, ou pelo processo de pirólise, onde a lenha é submetida a altas temperaturas em um ambiente com pouquíssima ou nenhuma quantidade de oxigênio. A fim de garantir a viabilidade econômica da produção de carvão vegetal, se faz necessário que as carvoarias fiquem próximas a indústrias que produzam resíduos de madeira, como as serrarias.

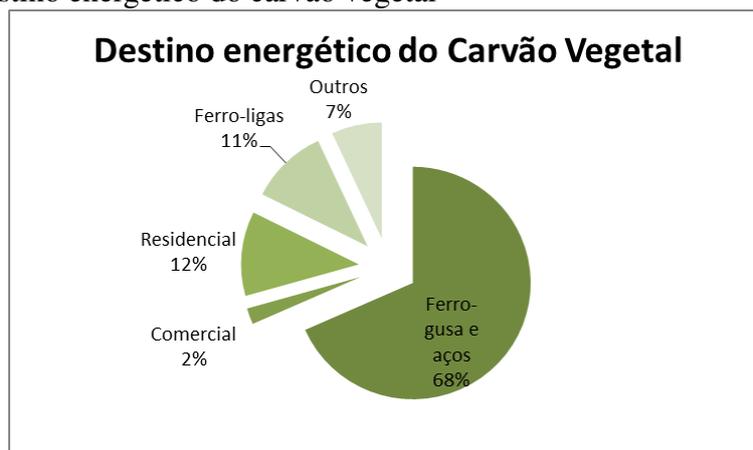
O poder calorífico inferior do carvão vegetal é de 6460 kcal/kg e sua densidade média é de 250 kg/m³. Em relação a sua composição tem-se de 20% a 35% de material volátil, de 65% a 80% de carbono fixo e de 1% a 3% as cinzas, que se trata de material inorgânico.

O Brasil é o maior produtor mundial deste insumo energético, sendo o setor industrial, liderado pelas indústrias de ferro-gusa e aço e ferro-ligas, o maior consumidor do carvão vegetal utilizando 68,4% e 10,7% da produção nacional, respectivamente. 11,7% da produção nacional é destinado ao setor residencial e em menor expressão aparece o setor comercial, sendo consumidor de 2,2% de toda a energia proveniente do carvão vegetal.

Segundo o Balanço Energético Nacional 2015, no Brasil a produção total de lenha em 2014 foi de 79,77 milhões de toneladas, sendo que 24,77 milhões de toneladas (31,1%) foram utilizadas na produção de carvão vegetal. O setor residencial é responsável pelo consumo de 24,7% da lenha produzida, geralmente utilizada na cocção dos alimentos nas

regiões rurais. Como exemplo, tem-se como média a necessidade de 2 m³ de lenha por mês para que uma família de oito pessoas possa preparar suas refeições neste período. O setor industrial fica responsável por 31,5% do consumo da produção de lenha, sendo as indústrias de alimento e bebidas, cerâmicas e papel e celulose as principais consumidoras. O gráfico 3 nos mostra o destino da energia provinda do carvão vegetal.

Gráfico 3 – Destino energético do carvão vegetal



Fonte: elaborado pelo autor.

3.3.2 Biomassa do lixo

A biomassa contida em resíduos sólidos e líquidos urbanos tem diversas origens e se encontra no lixo e no esgoto. O lixo urbano é uma mistura heterogênea de metais, plásticos, vidro, resíduos celulósicos e vegetais, e matéria orgânica. As rotas tecnológicas de seu aproveitamento energético são dispostas em duas vias: temos a via termoquímica, por meio da combustão direta, a menos aconselhável, e a gaseificação após a separação dos materiais recicláveis, além da via termoquímica temos a via biológica, por meio da digestão anaeróbica e produção de biogás. O esgoto urbano possui matéria orgânica residual diluída, cujo tratamento é uma imposição sanitária, que através da rota tecnológica de digestão anaeróbica encontra aplicação energética.

Também se enquadram nesta categoria os subprodutos das atividades agroindustriais e da produção animal. Cujas expressivas quantidades de subprodutos são tratadas como resíduos, porém possuem potencial energético importante, que varia segundo a rota tecnológica empregada, que pode variar desde a transformação termoquímica, com combustão direta, pirólise ou gaseificação, passando pelas transformações biológicas e físico-químicas, incluindo a digestão anaeróbica.

3.3.2.1 Rejeitos Urbanos

Os rejeitos urbanos são classificados em dois grandes grupos, os líquidos e os sólidos. Os rejeitos urbanos líquidos consistem nos efluentes líquidos de origem doméstica e residencial. Já os rejeitos sólidos podem ser definidos como uma mistura heterogênea de materiais descartados pelos setores comerciais e residenciais, tais como: plásticos, metais, vidros, madeiras e matéria orgânica, cuja combinação é vulgarmente chamada de lixo.

Os efluentes líquidos são descartados nas redes de esgoto e de lá seguem para as estações de tratamento. Após o tratamento nestas estações, uma massa orgânica é produzida, vulgarmente chamada de lodo. O lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto está sendo alvo de estudos e pesquisas, visando seu aproveitamento na geração de energia elétrica através da rota tecnológica de digestão anaeróbica.

Com relação aos rejeitos sólidos urbanos existem várias rotas tecnológicas mais aceitáveis para o processamento desta biomassa, em destaque temos a biodigestão anaeróbica é a que apresenta mais vantagens, pois além de um processo com maior rendimento energético, possui considerável capacidade de despoluir, permite valorizar um produto energético (biogás) e ainda obter um fertilizante, cuja disponibilidade contribui com a rápida amortização dos custos da tecnologia instalada.

No Brasil são geradas, diariamente, cerca de 250 mil toneladas de lixo. Esse lixo tem sua composição caracterizada por 52% de lixo orgânico, 26% de papel e papelão, 3% de plásticos, 2% de vidro, 2% de metais e 15% de outros materiais. (GRIPPI, 2006)

O destino do lixo é uma problemática considerável, apenas 2% do lixo é reciclado. Os lixões recebem 20% de todo o lixo, os aterros controlados são responsáveis por armazenar 23% e a grande parte, 52% tem como destino final o aterro sanitário, local sendo inviável à instalação de uma planta geradora.

Por esse motivo, a título de exemplo, é considerado um fator de aproveitamento de 40%, sendo assim consideradas 36,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos. Com este quantitativo, considerando o poder calorífico médio do biogás como 5000 Kcal/m³ e adotando-se uma produção média de biogás de 0,15 m³/kg de rejeito, tem-se o equivalente de 2,74 milhões de tep e 31,83 TWh que poderiam ser aproveitados.

A Tabela 1 nos mostra alguns dados sobre os rejeitos sólidos urbanos.

Tabela 1 – Produção de rejeitos sólidos urbanos por habitante e suas características

Produção por habitante	0,6 – 0,8 kg/dia
Umidade	45% a 55%
Densidade média	250 – 300 kg/m ³
Poder calorífico médio do lixo	2750 – 3200 kcal/kg
Poder calorífico do biogás	5000 – 7000 kcal/m ³
Produção média de biogás	0,15 – 0,30 m ³ /kg

Fonte: CETESB, 2006.

3.3.2.2 Rejeitos Industriais

O rejeito industrial ou, também chamado, resíduo industrial é bastante variado, seja ele sólido, líquido ou gasoso, podendo ser representado por cinzas, lodos, óleos, resíduos alcalinos ou ácidos, plásticos, papel, madeira, fibras, borracha, metal, vidros, cerâmicas e assim por diante. (COLEFAR, 2016)

Os tipos de resíduos possuem um destino específico e nem todos estão de acordo com as leis ambientais. De tal modo, o lixo Industrial pode ser classificado pela sua periculosidade de três maneiras: Classe 1, são os mais perigosos, contaminantes ou tóxicos, esse tipo de lixo necessita de tratamento especial pelo seu potencial de envenenamento. Temos ainda a Classe 2, onde entram os resíduos não-inertes e potencialmente contaminantes e, por fim, a classe 3, que é composta por material inerte.

Além disso, o rejeito industrial ainda pode ser classificado quanto ao seu estado físico: em sólido, líquido ou gasoso. O Rejeito sólido é o tipo de resíduo industrial amontoado e enterrado em locais específicos, como aterros industriais, o que pode causar sérios danos de contaminação no solo e no lençol freático, já o resíduo líquido sem nenhum tipo de tratamento, a maioria das indústrias lançam esse tipo de resíduos nos rios e mares, comprometendo os cursos de água, por fim o resíduo gasoso, geralmente proveniente das fumaças lançadas pelas chaminés das indústrias, comumente esses resíduos são lançados na atmosfera sem passar por tratamento prévio. (TODAMATÉRIA, 2016)

Os rejeitos industriais sólidos e líquidos normalmente são produzidos em baixa escala e em locais dispersos, estes rejeitos podem ser utilizados para produzir biogás e gerar energia elétrica mediante estudos de viabilidade. Esta energia produzida será utilizada pela própria indústria em seus processos e, se possível, o excedente poderá ser comercializado.

3.3.3 Biomassa de origem agrícola

A biomassa energética agrícola é definida como os produtos e subprodutos provenientes das plantações não florestais, tipicamente originados de colheitas anuais, cujas culturas são selecionadas segundo as propriedades de teores de amido, celulose, carboidratos e lipídios, contidos na matéria, em função da rota tecnológica a que se destina.

São considerados resíduos de origem agrícola aqueles que apresentam grande potencial para serem utilizados na produção de energia, como exemplo, resíduos de culturas agrícolas e de seu beneficiamento ou as palhas, cascas de frutos, cereais, os bagaços, os resíduos das podas de pomares e vinhas, rejeitos madeireiros, entre outros (SAITER, 2008).

3.3.3.1 Cana-de-açúcar

A espécie mais conhecida é *Saccharum officinarum*. A planta de cana é constituída por quatro partes principais, que são: raízes, talho (fruto agrícola), folhas e flores. O talho é constituído no seu interior por um tecido esponjoso muito rico em sumo açucarado que pode ser extraído de diversas maneiras.

O conteúdo calórico da cana-de-açúcar, considerando todos os seus componentes (sacarose, fibras, água e outros) é de, aproximadamente, 1060 kcal/kg.

Para o bagaço de cana o poder calorífico inferior é de 2130 kcal/kg, considerando o bagaço com 50% de umidade. O poder calorífico inferior das pontas e folhas (palha) da cana-de-açúcar é de 3105 kcal/kg, também considerando 50% de umidade. (CARDOSO, 2012)

3.3.3.1.1 Produção de cana de açúcar no mundo

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas do mundo, cultivada em mais de 100 países, e em todos representa uma importante fonte de mão de obra no meio rural. Apesar desta difusão mundial, cerca de 80% da produção do planeta estão concentradas em dez países, Tabela 2.

Tabela 2 – Produção de cana-de-açúcar dos 10 maiores produtores

<i>País</i>	<i>Área colhida (10 ha)</i>	<i>Produção (10 t)</i>	<i>% Área colhida</i>	<i>Produtividade (t/ha)</i>
Brasil	6,153	455,3	30,2	74,0
Índia	4,200	281,2	20,6	67,0
China	1,220	100,7	6,0	82,5
México	0,668	50,6	3,3	75,7
Tailândia	0,936	47,7	4,6	51,0
Paquistão	0,907	44,7	4,6	51,0
Colômbia	0,426	39,8	2,1	93,4
Austrália	0,415	38,2	2,0	92,0
Indonésia	0,370	30,2	1,8	81,6
Estados Unidos	0,364	26,8	1,8	73,6
Outros	4,713	276,2	23,1	58,6
Total	20,372	1.391,4	100,0	68,3

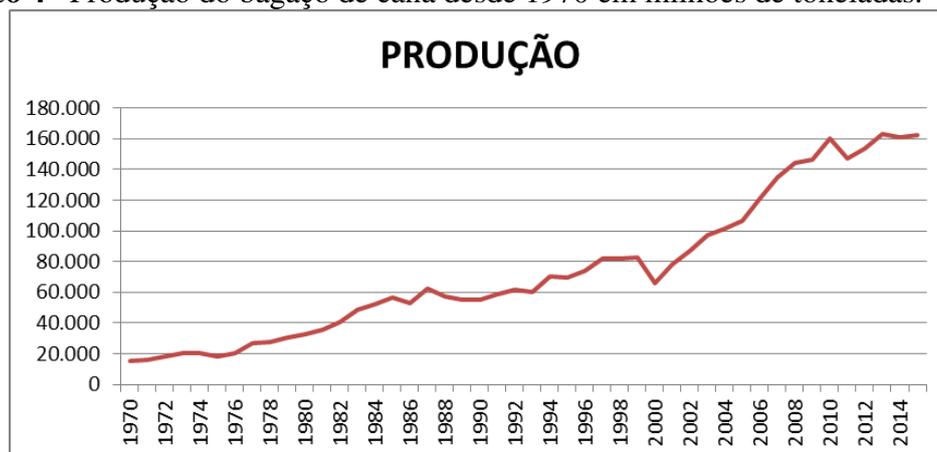
Fonte: FAO, 2008

3.3.3.1.2 Crescimento na produção do Brasil

A produção de energia a partir do bagaço de cana no Brasil é representada por uma crescente quase monótona desde 1970. Após 1975, ano de implantação do Proálcool, a tendência foi de apostar cada vez mais nesta cultura, passando de um patamar de 18 milhões de toneladas por ano para um novo patamar em torno de 60 milhões de toneladas por ano, em 1987, por onde se manteve aproximadamente constante até o ano de 1993, quando houve uma alta demanda externa da cultura da cana-de-açúcar. O aumento das exportações foi determinante para o crescimento da produção até o período entre os anos de 1998 e 2001, tempos de crise no setor. Por fim, nos últimos 15 anos a produção só aumenta, sobretudo com o incentivo da chegada dos carros *flex fuel*, em 2003.

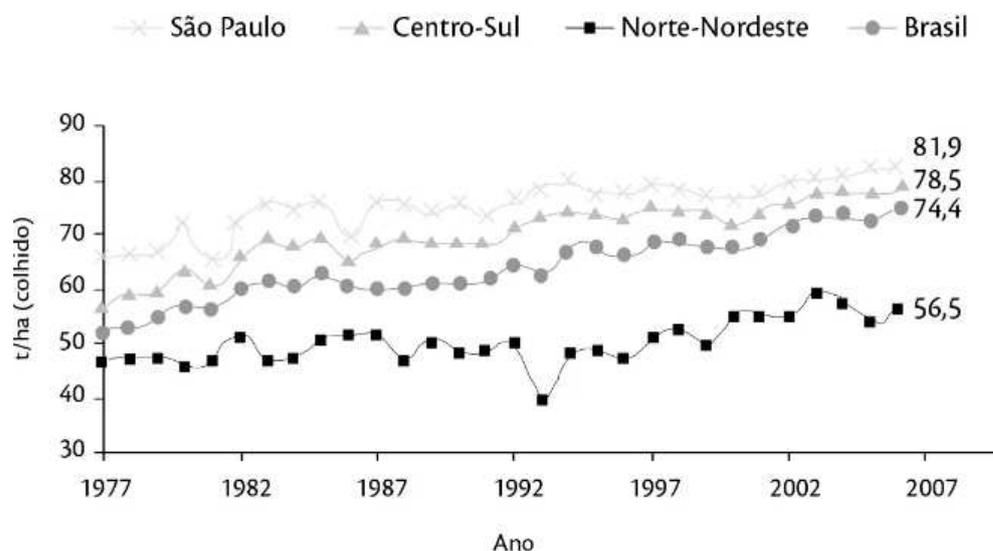
Hoje, a cana-de-açúcar é a terceira cultura temporária em termos de ocupação de área, bem atrás da soja e de milho.

Ano passado, em 2015, a produção energética do bagaço de cana contou com 162,588 milhões de toneladas, o equivalente a 28,67 milhões de tep, ou 333,4 milhões MWh, representando 11% de toda matriz energética brasileira. O gráfico 4 ilustra a produção de energia provinda do bagaço de cana ao longo dos últimos 45 anos.

Gráfico 4 – Produção do bagaço de cana desde 1970 em milhões de toneladas.

Fonte: Balanço Energético Nacional (2016).

Os ganhos de produtividade da cultura da cana são mostrados neste outro gráfico. Pode-se notar que a produtividade do Centro-Sul, e principalmente de São Paulo, é amplamente superior à do Nordeste; uma grande parte dessa diferença é explicada por diferenças de solo e clima, mas também há um forte componente tecnológico, uma vez que as variedades de cana que existem foram desenvolvidas, prioritariamente, para a região Centro-Sul. O gráfico 5 discrimina a produção de energia provinda de acordo com diferentes regiões, divididas em São Paulo, Centro-Sul, Norte-Nordeste e os demais estados da região sudeste.

Gráfico 5 – Evolução da produtividade regional de cana no Brasil.

Fonte: IBGE (2008)

Com efeito, as usinas que atualmente conseguem as melhores produtividades dispõem de equipes técnicas próprias ou assessorias com larga experiência acumulada durante um período longo de observação e análise, por meio do qual conseguem um manejo de variedades, adubação e tratos culturais mais aprimorados ou próximos de uma condição ótima. A extensão desse modelo às diversas áreas de expansão da cana-de-açúcar é essencial para reduzir a grande variabilidade nas produtividades obtidas nas diversas regiões produtoras do país, como acontece atualmente.

3.3.3.2 Outros tipos de cultura

O Brasil é o maior produtor mundial de arroz fora da Ásia, na safra 2014/2015 colheu 12,43 milhões de toneladas (CONAB, 2015). A casca de arroz é um dos mais abundantes resíduos agrícolas, estima-se que para cada hectare de cultura de arroz seja produzido de 4,0 a 6,0 toneladas de resíduos (NOGUEIRA ET AL 2000 APUD CORTEZ; LORA; AYARZA, 2008).

A palha de arroz (0,38 tonelada para cada tonelada de arroz colhido) é definida como o resíduo que permanece no campo após a etapa de colheita. Já a casca de arroz (22% do peso do arroz com casca) é resíduo gerado após o processamento industrial do arroz bruto.

Em torno de 15% das cascas de arroz residuais do processo industrial são utilizadas na fase de secagem do próprio processo, sendo que os outros 85%, assim como os resíduos de palha de arroz gerados no plantio, não possuem outro tipo de reaproveitamento.

A casca de arroz possui baixa densidade e grande volume, características que dificultam e aumentam o custo de seu transporte. Este fato implica diretamente na destinação adequada destes resíduos.

A soja é um grão rico em proteínas e pertence a família fabaceae (leguminosa), assim como o feijão, a lentilha e a ervilha. O poder calorífico da palha de soja é de 3487 kcal/kg. (CARDOSO, 2012)

Em 2015/2016, foram cultivados aproximadamente 33,18 milhões de hectares com soja, aproximadamente 56% da área cultivada no Brasil, com produção de 95,63 milhões de toneladas, sendo aproximadamente 10 milhões de toneladas produzidas na a Região Nordeste, representando com 9,8% da produção. (EMBRAPA, 2016)

Segundo Nogueira *et al* (2000) apud Cortez; Lora e Ayarza (2008) estima-se que para cada ha de soja seja produzido de 3,0 a 4,0 toneladas de resíduos, ou seja, restos da cultura da soja, sendo que a sua principal utilização atualmente é como ingrediente na alimentação animal.

3.4 Caracterização e propriedades físicas da biomassa.

A caracterização da biomassa deve ser baseada em sua utilização, fornecendo informações sobre as propriedades determinantes, particulares a cada aplicação, desta forma, definindo a escolha do processo de conversão. Ao realizar a caracterização energética da biomassa é fundamental conhecer suas propriedades físicas: granulometria, massa específica, e realizar sua análise imediata.

3.4.1 Massa específica

Massa específica e a relação entre a massa contínua de biomassa pelo volume que essa massa contínua ocupa fornece as frações em peso de cada dimensão característica que compõe a biomassa. A massa específica de uma biomassa é dividida em massa específica propriamente dita e massa específica aparente.

O conceito de massa específica é aplicável somente se a matéria é contínua, ou seja, no volume ocupado não existem descontinuidades, logo este conceito não se aplica a resíduos, pois nesse caso existem vários pedaços do mesmo material ocupando o volume. Nesse caso, é mais útil o conceito de massa específica aparente.

A Equação 2 mostra como é calculada a massa específica aparente

$$\rho_{ap} = \frac{m_{bio\ granel}}{V} \quad (2)$$

Na qual: ρ_{ap} é a massa específica aparente, $m_{bio\ granel}$ é a massa do montante de biomassa colocada aleatoriamente até encher o volume V .

3.4.2 Análise imediata

A análise imediata tem por objetivo quantificar os teores de umidade, voláteis, condensáveis e não condensáveis, e carbono fixo contidos numa amostra de biomassa. Ela é feita antes que qualquer outra análise e é determinada pelo método do forno de secagem

3.4.2.1 Teor de umidade

É definido como a massa de água contida na biomassa e pode ser expressa tanto na base úmida (bu) quanto na base seca (bs). Portanto, na apresentação de resultados, é necessário expressar em que base os resultados são apresentados.

O teor de umidade presente na Biomassa pode interferir em outras propriedades, como o Poder Calorífico Inferior (PCI) que está intimamente ligado, pois este decresce com o aumento da umidade. (NOGUEIRA, 2007 e CALEGARI *et al* 2005).

Biomassa originária de produção agrícola possui teor de umidade entre 5–30% bu (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008).

Teor de umidade (ω) na base úmida (bu) e na base seca (bs) e calculado por:

$$\omega_{bu} = \frac{m_{H2O}}{m_{H2O} + m_{bio\ seca}} \quad (3)$$

$$\omega_{bs} = \frac{m_{H2O}}{m_{bio\ seca}} \quad (4)$$

Na qual: m_{H2O} é a massa de água e $m_{bio\ seca}$ é a massa correspondente à biomassa sem umidade.

Segundo Katyal; Thambimuthu; Valix (2003) o teor médio de umidade no bagaço de cana é aproximadamente 8,2% em base seca.

3.4.2.2 Teor de voláteis

O teor de voláteis é quantificado medindo-se a fração de massa da biomassa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca em atmosfera inerte até temperaturas de aproximadamente 900 °C numa mufla por 7 minutos.

Após a extração dos voláteis, fica como resíduo o carbono fixo e as cinzas. O teor de voláteis é então determinado pela expressão a seguir. Necessariamente, o teor de voláteis é expresso em base seca.

$$T_V = \frac{m_2 - m_3}{m_2} \quad (5)$$

Onde T_v é o teor de voláteis, comumente expresso em porcentagens, m_2 é a massa da amostra antes do experimento e m_1 é a massa da amostra após o experimento.

Segundo Katyal; Thambimuthu; Valix (2003) o teor médio de voláteis no bagaço de cana é 83,1%.

3.4.2.3 Teor de cinzas

As cinzas são resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos em um forno mufla sob rígido controle de massa, temperatura, tempo e atmosfera.

As cinzas são constituídas de composto de silício (Si), potássio (K), sódio (Na), enxofre (S), cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg) e ferro (Fe). Quando em alta concentração podem diminuir o poder calorífico (PC).

A amostra biomassa, já sem umidade nem voláteis, e colocada num recipiente e levada ao interior de um forno. Sua temperatura é então elevada para 710°C, e nessa condição, fica por uma hora. Ao final, dentro do cadinho ficam somente as cinzas.

O teor de cinzas é calculado da seguinte forma, como descreve a seguinte equação.

$$T_{cinzas} = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \quad (6)$$

Na qual: T_{cinzas} é o teor de cinzas, comumente expresso em porcentagens, m_3 é a massa da amostra antes do experimento e m_4 é a massa da amostra após o experimento

Segundo Katyal; Thambimuthu; Valix (2003) o teor médio de cinzas no bagaço de cana é 4,2%.

3.4.2.4 Teor de carbono fixo

Após a determinação dos teores de umidade, de matéria volátil e de cinzas da amostra, o teor de carbono fixo é obtido pela Equação 6:

$$T_{cf} = 1 - T_v - T_{cinzas} \quad (6)$$

Na qual: T_{cf} é o teor de carbono fixo. T_v e T_{cinzas} já foram anteriormente mencionados.

Segundo Katyal; Thambimuthu; Valix (2003) o teor médio de carbono fixo no bagaço de cana é 12,7%.

3.4.3 Análise elementar

A fim de determinar a composição química a análise elementar determina percentuais mássicos contidos na amostra de determinados elementos, discriminando a quantidade de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), Nitrogênio (N), Enxofre (S) e cinzas (Z).

O conhecimento desta composição é fundamental para a determinação do poder calorífico. A tabela 3 nos dá exemplos com três culturas de biomassa mostrando a análise elementar de cada uma.

Tabela 3 – Análise elementar de três culturas de biomassa

Espécie	C	H	N	S	O	Cinzas
Casca de Arroz	38,24	4,40	0,80	0,06	35,50	21
Pinheiro	59	7,2	-	-	32,7	1,1
Caroço de açaí	46	6	0,8	-	4,6	1,2

Fonte: EBMA *apud* NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008.

3.4.4 Poder Calorífico

Para Nogueira (2003), quando ocorre combustão completa de uma unidade de combustível este libera energia térmica e é geralmente medido em termos da energia por conteúdo por unidade de massa ou volume, daí MJ/kg (sólidos), a MJ/L para líquidos e por fim para gases para MJ/Nm³. De uma maneira geral, essa propriedade depende da composição da biomassa e do seu grau de umidade.

O Poder Calorífico pode ser dividido em Superior e Inferior. O poder calorífico superior, PCS, é a quantidade de calor gerado pela combustão completa de uma unidade de volume ou massa do combustível, considerando condições de referência para temperatura e pressão, havendo condensação de vapor de água. Ou seja, inclui o calor latente de vaporização. Já o poder calorífico inferior, PCI, é o calor gerado, nas mesmas condições que o poder calorífico superior, mas com a água formada na reação de combustão ainda em estado gasoso. Ou seja, não inclui o calor latente de vaporização. (MORAN et al., 2009)

Segundo Eletrobrás, 2005; Lopes, 2002; Mata 1981 *apud* Filho 2009, o PCS do bagaço de cana é aproximadamente 8900 kJ/kg.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 LOCALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os procedimentos experimentais foram realizados no Laboratório de Referência em Biocombustíveis Prof. Expedito José de Sá Parente (LARBIO), localizado no Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará - NUTEC, Campus do Pici, Fortaleza - CE.

4.2 COLETA DAS AMOSTRAS

As amostras de bagaço da cana são resíduos da usina da Cachaça Douradinha situada no município de Redenção – CE

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para este trabalho foram utilizadas amostras de bagaço de cana, Figura 2.

Figura 2 – Bagaço de cana *in natura*.



Fonte: Autor.

As amostras foram levadas ao LARBIO, onde foram caracterizadas através das análises de determinação do teor de umidade, teor de voláteis, teor de cinzas, carbono fixo e poder calorífico superior. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

4.4 OPERAÇÃO DE PENEIRAMENTO

Com o auxílio de uma peneira, selecionou-se o bagaço de cana a ser utilizado na caracterização, tomamos como medida de comprimento característico 4 milímetros. A Figura 3 nos mostra o recipiente contendo a amostra peneirada.

Figura 3 – Bagaço de cana após a peneiração.



Fonte: Autor.

4.5 METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

A fim de definir o teor de umidade seguiu-se a metodologia descrita na norma ABNT NBR 14929 (Carvão Vegetal - Análise Imediata). Obteve-se o peso úmido de cada resíduo através de uma balança analítica de precisão ($\pm 0,0001$ g). As amostras foram introduzidas na balança medidora de umidade, modelo ID200 da marca Marte Científica (Figura 4), a 105 ± 5 °C até que a massa ficasse constante, obtendo-se a massa seca. Os teores de umidade foram obtidos pela diferença entre os pesos da amostra, antes e após secagem, através das equações 3 e 4, mencionadas anteriormente.

Figura 4 – Medidor de umidade ID200.

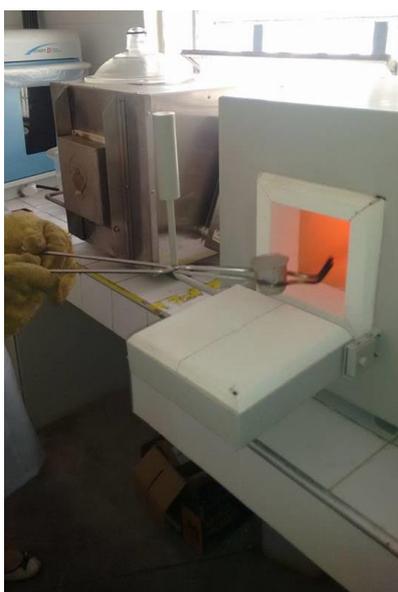


Fonte: Autor.

4.6 METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE VOLÁTEIS

O procedimento começa com a limpeza do cadinho de platina, ele é levado à mufla, onde fica por 15 minutos com a finalidade de ser limpo de qualquer possível impureza., em seguida a amostra seca é acondicionada no cadinho ao Forno Mufla, modelo Q.318.24, a qual foi aquecida até atingir 900 °C, durante 3 (três) minutos, com a tampa aberta e posteriormente, durante 7 (sete) minutos com a tampa fechada, em conformidade com as normas *ABNT NBR 8112* (Carvão Vegetal - Análise Imediata) e *ASTM D3175* (Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke). Posteriormente, a amostra foi inserida em um dessecador para resfriamento a vácuo e, por fim, foi realizada sua pesagem. Os teores de voláteis foram obtidos pela diferença entre os pesos das amostras, antes e após o aquecimento em Forno Mufla (Figura 5), através da Equação 5, mencionada anteriormente.

Figura 5 - Forno mufla



Fonte: Autor.

4.7 METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS

Após as análises de umidade e voláteis a amostra foi novamente aquecida em Forno Mufla, em conformidade com as normas *ABNT NBR 13999* e *ASTM D3174* (Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke). Uma amostra de 5 gramas foi acondicionada a uma temperatura de 500 °C, durante 4 horas dentro da mufla. Após este procedimento, a amostra foi transferida para em um dessecador para resfriamento a vácuo. O teor de cinzas foi determinado utilizando a equação 5, mencionada anteriormente.

4.8 METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO

A determinação do poder calorífico foi realizada de acordo com a norma DIN EN 14918:2014 Solid biofuels – Determination of calorific value. As amostras foram inseridas em uma bomba calorimétrica da marca IKA (Figura 6), modelo C200, para a determinação do poder calorífico. 1 grama da amostra é levado a bomba calorimétrica para queima. A temperatura inicial do processo é 17 °C. O procedimento demanda aproximadamente 15 minutos, sendo 8 minutos de análise e 7 minutos para descarga da água e do gás.

A Tabela 4 mostra valores de PCS de algumas culturas de biomassa encontrados na literatura.

Tabela 4 – PCS de diferentes culturas, incluindo o bagaço de cana.

Biomassa	PCS (KJ.kg ⁻¹)
Bagaço de Cana	8903,40
Lenha	12958,00
Casca de Arroz	16775,60
Restos de Algodão	16775,60
Eucalipto	18420,00
Sabugo de Milho	18972,60
Cascas de Castanhas	20470,30
Madeira Picada	20470,30
Carvão	30900,00

Fonte: Eletrobras, 2005; Lopes, 2002; Mata 1981 apud Filho 2009.

Figura 6 - Bomba calorimétrica.



Fonte: Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise imediata foram obtidos por meio da determinação do teor de umidade, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. Os resultados estão apresentados na Tabela 5 e na discussão, é levado em consideração a média dos resultados das três amostras.

Tabela 5 - Análise das amostras do bagaço de cana.

AMOSTRAS	UMIDADE (%)	MATERIAIS VOLÁTEIS (%)	CINZAS (%)	CARBONO FIXO (%)
Amostra 1	8,9887	70,614	17,488	11,898
Amostra 2	10,7422	63,454	20,312	16,234
Amostra 3	7,3265	67,124	18,152	14,724

Fonte: Autor.

Com base nos dados apresentados na Tabela 5 podemos notar que a amostra que tem o maior teor de cinzas (amostra 2) também é a que tem maior umidade, entretanto, elas não estão intrinsecamente relacionadas, visto que a tendência não se repete para as demais amostras.

5.1 TEOR DE UMIDADE

Uma amostra de 5 gramas de bagaço de cana foi tomada. Após a desumidificação foi constatada uma massa de 4,55 gramas, logo constata-se uma massa de água de 0,45 g.

O teor de umidade calculado obteve o valor 9% em base úmida e 9,89% em base seca, valor próximo do valor encontrado na literatura que, segundo Katyal; Thambimuthu; Valix (2003) é de 8,2% em base seca. Sabe-se que o teor de umidade influencia negativamente no valor do poder calorífico, sendo, portanto, importante que o resíduo não tenha uma umidade elevada. Segundo (THÖRNQVIST, 1984) com o aumento do teor de umidade há também um aumento das perdas energéticas.

5.2 TEOR DE VOLÁTEIS

Uma amostra de 1 grama de bagaço de cana foi tomada. Após o processo na mufla e no dessecador, obteve-se na pesagem uma massa de 0,33 gramas, logo constata-se uma massa de voláteis de 0,67 gramas.

O teor de voláteis calculado foi de aproximadamente 67%, valor um pouco abaixo do valor encontrado na literatura que, segundo Katyal; Thambimuthu; Valix (2003), é de 83,1%. Os materiais voláteis queimam e saem rapidamente na forma gasosa.

Segundo Vieira (2012), a biomassa com alto teor de voláteis apresenta maior facilidade de incendiar e queimar. Segundo Lewandowski (1997) *apud* Klautau (2008), o material volátil interfere na ignição, pois quanto maior o teor de voláteis maior será a reatividade e conseqüentemente, a ignição.

5.3 TEOR DE CINZAS

O teor de cinzas calculado foi de 18,64%, valor superior ao valor encontrado na literatura, que, segundo Katyal; Thambimuthu; Valix (2003) é de 4,2%.

Segundo Vieira *et al.* (2013), um alto teor de cinzas leva a uma diminuição da eficiência devido ao aumento do consumo de oxigênio para derreter as cinzas. Como a umidade, o teor de cinzas também interfere no poder calorífico causando perda de energia, além de prejudicar a transferência de calor (KLAUTAU, 2008). Valores elevados de cinzas além de influenciarem negativamente no poder calorífico, podem muitas vezes, em determinados processos de combustão, obrigar a parada da produção de energia para a retirada das cinzas.

5.4 TEOR DE CARBONO FIXO

O teor de carbono fixo calculado foi de 14,21%, valor um próximo ao valor encontrado na literatura, que, segundo Katyal; Thambimuthu; Valix (2003), é de 12,7%.

O percentual de carbono fixo presente estabelece a quantidade de calor gerado, sendo que quanto maior este percentual mais lentamente o combustível irá queimar (STURION; PEREIRA; CHEMIN, 1988).

5.5 PODER CALORÍFICO SUPERIOR (PCS)

O valor do PCS para o bagaço de cana sem umidade foi de 16,8719 MJ/kg. O valor de PCS encontrado mostra-se superior quando comparados aos valores deste tipo de biomassa, citados na Tabela 4, a qual nos mostra um valor de PCS para o bagaço de cana de 8,9 MJ/kg. Este valor foi encontrado para o bagaço de cana sem passar pelo processo de desumidificação, o que nos leva a inferir que o PCS do bagaço de cana úmido é aproximadamente 53% do PCS encontrado para o bagaço de cana sem umidade.

6 CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados evidenciou-se que o bagaço de cana tem alto potencial energético e pode ser utilizado como uma fonte de energia, pois, desta forma, além de evitar um destino danoso ao meio ambiente, vem como uma alternativa bastante interessante variando a matriz energética e diminuindo a dependência de combustíveis fósseis.

Os objetivos foram alcançados: houve a caracterização do bagaço da cana-de-açúcar e determinou-se a análise imediata, teor de umidade, que atingiu o valor de aproximadamente 9%, teor de cinzas, que atingiu o valor de 18,64%, teor de voláteis, que atingiu o valor de aproximadamente 67%, o teor de carbono fixo, que atingiu o valor de 14,21% e, finalmente, o poder calorífico superior da biomassa seca, que atingiu a magnitude de 16,8719 MJ/kg.

Por fim, ainda ficou notório o aumento do PCS de aproximadamente 89% após o processo de secagem, mesmo com um teor de voláteis um pouco abaixo do encontrado na literatura, manifestando, portanto, a importância da inserção da etapa de desumidificação antes da queima direta para a geração de energia.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Biomassa**. Home Page. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicações/atlas/pdf/05-biomassa\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicações/atlas/pdf/05-biomassa(2).pdf)> Acesso em: 09 de junho de 2015.

Norma ASTM D3174 **Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke**, ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 2013.

Norma ASTM D3175 **Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke**, ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, 2013.

VIEIRA A. C.; **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas** 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, PR, 2012. p. 56.

KLAUTAU, V. P.; **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo de corrente para a secagem de grãos**. 2008. Dissertação (Mestrado em engenharia de recursos hídricos e ambiental) PPGERHA, UFPR. Curitiba: 2008. p. 28.

FREITAS, Eduardo de. "Efeito Estufa"; *Brasil Escola*. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/geografia/efeito-estufa.htm>>. Acesso em 13 de dezembro de 2016.

STURION, J.A; PEREIRA, J. C. D; CHEMIM, M.S; **Qualidade da Madeira de Eucalyptus viminalis Para Fins Energéticos Em Função Do Espaçamento e Idade de Corte**. Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo, n. 16, p.55-59, dez. 1988.

FONSECA, A. D. **Biomass-to-liquids: uma contribuição ao estudo da obtenção de biocombustíveis sintéticos através da síntese Fischer-Tropsch**. Dissertação (mestrado) Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo São Paulo, 2009.

NOGUEIRA, L. A. H. **Bioenergias e Sustentabilidade: nexos e métodos**. São Paulo, 2005

NOGUEIRA, L. A.; LORA, H. **Dendroenergia: Fundamentos e aplicações, 2 ed**, 2003

COELHO, J. C. **Biomassa – Biocombustíveis – Bioenergia**. Brasília: Ministério das Minas e Energia. 1982. 100p.

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

GUARDABASSI, P. **Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia perspectivas para países em desenvolvimento**. Dissertação (mestrado) Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo São Paulo, 2006

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica** - 2ª ed., Brasília: 2005. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm>. Acesso em: 10/12/2016

SOARES FILHO, S.; OVEREND, R.; MACEDO, I.; COUTO, L.; FREITAS, M. **Sustentabilidade na geração e uso de energia no Brasil: os próximos 20 anos**. Disponível em: < www.agr.unicamp.br/energia/Ener20/pdf/relatorios_mesas/paper_mesa5.pdf > Acesso em: 10 dezembro 2016

BRACELPA, 2010, **Relatório Anual 2009/2010**. BRACELPA.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional 2016**. Brasília: MME, 2016. 291p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional 2015**. Brasília: MME, 2015. 289p.

USHIMA, A.H. **Biomassa- Geração de gás de síntese**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, p 17, 2006

GRIPPI, Sidney. **Lixo: reciclagem e sua história: guia para as prefeituras brasileiras**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, São Paulo: 2006. Disponível em: <<http://residuossolidos.cetesb.sp.gov.br/>. Acesso em 20/11/2016>

SAITER, O. **Utilização de resíduos agrícolas e florestais como fonte de energia para a secagem de grãos de Coffea canephora var. Conilon**. 2008. Monografia (trabalho de conclusão do curso de Engenharia Florestal) Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro:2008.

LORA, E. E. S.; AYARZA, J. A. C. **Gaseificação**. CORTEZ, Luis Augusto Barbosa (Org). In:_____. Biomassa Para Energia. Campinas-SP: Editora Unicamp, 2008. p. 241-327.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **Análise química imediata do carvão vegetal**, NBR 8112. 1986.

CALEGARI, L. FOELKEL, C. E. B.; HASELEIN, C. R.; ANDRADE, J. L. S.; SILVEIRA P.; SANTINI, E. J. **Características de Algumas Biomassas Usadas na Geração de Energia no Sul do Brasil**. **Biomassa e Energia**. V.2, n.1, p. 37-46, 2005.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. (2008). Caracterização Energética da Biomassa Vegetal. BARRETO, Eduardo José Fagundes (Coord). **Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-63.

KATYAL, S.; THAMBIMUTHU, K.; VALIX, M. **Carbonisation of bagasse in a fixed bed reactor: influence of process variables on char yield and characteristics**. Renewable Energy. Canada: Pergamon, v. 28, p. 713-725, 2003.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia. 6. ed.** Rio de Janeiro: LTC, 2009.

DE LIMA, T. V.; DE MOURA, A. R. **A Biomassa no contexto ecológico.** Disponível em: < <http://www.webartigos.com/artigos/a-biomassa-no-contexto-ecologico/139542/>> Acesso em: 10 dezembro 2016

COLEFAR. **Resíduos Industriais.** Disponível em: < <http://www.colefar.com.br/residuos-industriais/>> Acesso em: 10 dezembro 2016

TODAMATÉRIA. **Lixo Industrial.** Disponível em: < <https://www.todamateria.com.br/lixo-industrial/>> Acesso em: 10 dezembro 2016

NOVA CANA. **As usinas de açúcar e etanol do Brasil.** Disponível em: <<https://www.novacana.com/usinas-brasil/>> Acesso em: 10 dezembro 2016

EMBRAPA, **Dados Econômicos.** Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>> Acesso em: 10 dezembro 2016