

**DANILO CAMPIOM ARANTES**

**BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: ANÁLISE  
TÉRMICA E ENERGÉTICA DE BIOMASSA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2014**

**DANILO CAMPIOM ARANTES**

**BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: ANÁLISE TÉRMICA E  
ENERGÉTICA DE BIOMASSA**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de concentração: Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Solidônio R. de Carvalho

**UBERLÂNDIA - MG**

**2014**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

A662b Arantes, Danilo Campiom, 1982-  
2014 Bagaço de cana-de-açúcar: análise térmica e energética de biomassa  
/ Danilo Campiom Arantes. - 2014.  
75 f. : il.

Orientador: Solidônio Rodrigues de Carvalho.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Bagaço de cana - Teses. 3.  
Biomassa - Teses. I. Carvalho, Solidônio Rodrigues de, 1978- II.  
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica. III. Título.

---

CDU: 621

**Dedicatória**

*Aos meus amados e queridos pais*

*À minha amada companheira Natascha*

*Ao meu irmão querido e guerreiro*

*Aos meus lindos e amados sobrinhos*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por minha saúde, sabedoria e iluminar o meu caminho e dar-me paciência.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

Ao orientador, Solidônio Rodrigues de Carvalho, pela motivação, confiança e valiosa orientação profissional e pessoal.

A equipe do Laboratório de Transferência de Calor e Massa pelo espírito de colaboração infinito e estímulo por meio das palavras sinceras e dos momentos de descontração.

Aos amigos Edson, Michelle, Zé, João, Mascote, Bruno e Lívia pelos valiosos momentos de descontração e alegrias no dia a dia

Ao Instituto de Química da UFU e, em especial ao técnico, Roni, pelo grande apoio e disposição em ajudar-me, independentemente do horário, com as análises elementares.

À Faculdade de Medicina Veterinária, em especial ao professor Evandro, que gentilmente disponibilizou o uso da bomba calorimétrica para as análises de Poder Calorífico e à aluna Fernanda que me ajudou durante as análises e aos problemas encontrados durante o experimento.

Aos queridos professores e amigos do Departamento de Zootecnia: Gilberto, Manuel, Leandro, Lúcio, Fernanda, Elenice, Carina, Janine, Simone, Veridiana, Ana Luisa, Felipe e Alex.

Aos órgãos de fomento CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

À minha maravilhosa família por sempre acreditar em mim e ensinar-me a sonhar e a persistir mesmo diante dos desafios da vida. Muito obrigado: Sebastião, Maria Lúcia, Marcelo, Daniela, Augusto e Otávio. Amo todos vocês !!!!

À minha querida amiga, namorada, companheira e esposa Natascha, a qual tive a alegria de conhecer, me apaixonar e casar e por sempre acreditar em mim e me apoiar incondicionalmente na conclusão deste trabalho

Aos meus queridos tios e tias da família Campiom e Arantes

Aos meus queridos sogros Francisco e Maria Eduarda.

Agradecimentos especiais a todas as pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, conscientes ou não, para a realização deste trabalho. De fato, esta dissertação é o fruto do apoio e da ajuda de muitas pessoas.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>x</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>xi</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiv</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>4</b>
2.1. O uso dos diferentes tipos de biomassa para conversão em energia .....	4
2.1.1. Resíduos Vegetais .....	5
2.1.2. Resíduos Urbanos .....	6
2.1.3. Resíduos Industriais .....	7
2.1.4. Resíduos Animais .....	7
2.1.5. Resíduos Florestais .....	8
2.2. A cana-de-açúcar no Brasil .....	10
2.2.1. A Biomassa na geração de energia e o desenvolvimento sustentável .....	12
2.2.2. A cogeração de energia na indústria da cana-de-açúcar .....	15
2.3. Caracterização Energética da Biomassa Vegetal .....	16
2.3.1. Análise Imediata .....	16
2.3.2. Análise Elementar .....	18
2.3.3. Poder Calorífico .....	18
2.4. Tipos de Tratamentos da Biomassa .....	21
2.4.1. Secagem .....	22
2.4.2. Torrefação .....	22
2.4.3. Carbonização .....	25
2.5. Objetivos e contribuição científica deste trabalho .....	28
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>30</b>
3.1. Introdução .....	30
3.2. O bagaço da cana-de-açúcar .....	30
3.3. Preparação das Amostras .....	31
3.4. Análise Elementar .....	31
3.5. Análise Imediata .....	32
3.5.1. Determinação do Teor de Umidade em Base Úmida .....	34

3.5.2. Determinação do Teor de Materiais Voláteis .....	34
3.5.3. Determinação do Teor de Cinzas .....	35
3.5.4. Determinação do Teor de Carbono Fixo .....	36
3.6. Determinação da Densidade à Granel.....	36
3.7. Determinação do Poder Calorífico.....	36
3.8. Densidade Energética .....	38
3.9. Influência do Teor de Umidade sobre o Poder Calorífico Superior do bagaço de cana .....	38
3.10. Torrefação do Bagaço de Cana-de-Açúcar .....	39
3.11. Rendimento Gravimétrico .....	40
3.12. Análise de Higroscopicidade do Bagaço de Cana-de-Açúcar .....	40
3.13. Índice de Combustão.....	41
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>42</b>
4.1. Caracterização do produto padrão .....	42
4.2. Influência do teor de umidade no poder calorífico do bagaço de cana-de-açúcar padrão.....	47
4.3 – Torrefação do bagaço de cana-de-açúcar .....	51
4.3.2. Análise de Higroscopicidade.....	56
4.3.3 – Comportamento do bagaço de cana durante a combustão.....	60
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>67</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Fontes de Biomassa (Fonte: Cortez et al 2008).....	5
Figura 2.2 - Alguns exemplos de biomassa utilizados como combustíveis (Fonte: Ecoetec, Biocana, 2014).....	10
Figura 2.3: Diagrama do saldo energético de uma usina sucroalcooleira. (Fonte: SOARES e ROSSELL, 2007).....	14
Figura 2.4: Evolução da compra do excedente de energia gerada pelas usinas (Fonte: SOARES E ROSSELL, 2007).....	15
Figura 2.5: Fluxograma do Processo de Carbonização da Madeira (Fonte: Silva, 2009). ....	26
Figura 2.6: Diferentes modelos de fornos usados na produção de carvão (Fonte: Galdino et al (2010), Brito (1990) e DPC Biomassa (2012)).....	27
Figura 3 1:Padronização e armazenamento das amostras. ....	31
Figura 3.2: Análise Elemental de CHNS/O .....	32
Figura 3.3: Equipamentos pertencentes ao LTCM usados nas diversas análises .....	33
Figura 3.4: Bomba calorimétrica IKA-WERNE C2000 .....	37
Figura 3.5: Equipamentos utilizados para torrefação .....	40
Figura 4.1 – Poder calorífico em função da umidade para amostras de bagaço de cana.....	49
Figura 4.2 – Comparação do poder calorífico do bagaço de cana (1), bagaço de cana (2) e madeira de Eucalyptus Benthamii.....	50
Figura 4.3: Amostras de bagaço de cana torrificados .....	52
Figura 4.4: Amostras de bagaço de cana torrificadas a 240°C em 60, 90 e 120 minutos.....	53
Figura 4.5: Rendimento Gravimétrico para o bagaço de cana em função da temperatura e tempo de torrefação.....	54
Figura 4.6: Rendimento gravimétrico do bagaço de cana torrificada na temperatura de 240°C. ....	55
Figura 4.7: Comparação do PCS da biomassa padrão (base seca) e torrificada à 240 °C com diferentes tempos de aquecimento. ....	56
Figura 4.8: Comparativo entre bagaço de cana padrão e torrificado, ambos em condições higroscópicas.....	57
Figura 4.9: Absorção de umidade e redução do poder calorífico em função do tempo de torrefação a 240°C.....	58
Figura 4.10: Bancada experimental para análise de combustão.....	60
Figura 4.11: Combustão do bagaço de cana padrão com 44,35% de umidade.....	61

Figura 4.12: Perda de massa em função do tempo durante o processo de combustão do bagaço de cana. ....	62
Figura 4.13: Análise de combustão do bagaço de cana torreficado a 240°C em 120 minutos. .....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. – Produção de matéria-prima e seus resíduos no Brasil em 2004 (Fonte: Cortez et al, 2008).....	6
Tabela 2.2: Quantidade de excremento produzido por diferentes rebanhos (Fonte: Cortez et al, 2008).....	8
Tabela 2.3: Principais países produtores de cana-de-açúcar no mundo. ....	11
Tabela 2.4: Fases da degradação térmica da biomassa e formação de subprodutos (Fonte: RODRIGUES, 2009).....	24
Tabela 2.5: Normas nacionais utilizadas nos experimentos do presente trabalho.....	28
Tabela 3.1: Adição de água para o teor de umidade em base úmida desejada.....	38
Tabela 3.2: Temperatura e tempo de aquecimento das amostras.....	39
Tabela 4.1: Análise elementar das amostras padrão.....	43
Tabela 4.2: Análise elementar de amostras padrão e comparação com os dados da literatura.....	43
Tabela 4.3: Análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar padrão.....	44
Tabela 4.4: Comparação dos resultados de análise imediata da amostra de bagaço de cana-de-açúcar padrão com resultados da literatura.....	44
Tabela 4.5: Poder calorífico das amostras de bagaço de cana padrão.....	45
Tabela 4.6: Resultados de poder calorífico das amostras padrão comparados com dados da literatura.....	45
Tabela 4.7: Densidade das amostras padrão de bagaço de cana.....	46
Tabela 4.8: Comparação da densidade energética do bagaço de cana padrão e dados da literatura.....	47
Tabela 4.9: Poder calorífico superior em função do teor de umidade para o bagaço de cana padrão.....	48
Tabela 4.10: Análise imediata da biomassa torrificada a 240°C e tempo de aquecimento de 120 minutos.....	59

## LISTA DE SÍMBOLOS

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica  
BTH: bagaço de cana torreficado submetido à condição de higroscopicidade  
BT: bagaço de cana torreficado seco  
C: Carbono  
C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> gás etano  
CF: Carbono Fixo  
CG: cromatografia gasosa  
CH<sub>4</sub>: gás metano  
CO: Monóxido de carbono  
CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono  
CONAB: Conselho Nacional de Abastecimento  
CZ: Cinzas  
D: Densidade  
DE: Densidade Energética  
FEMEC: Faculdade de Engenharia Mecânica  
FID: Detector de ionização por chama  
FIESP: Federação das indústrias do estado de São Paulo  
g: gramas  
GNC: gases não condensáveis  
h: Entalpia  
H: hidrogênio  
H<sub>2</sub>: gás hidrogênio  
H<sub>2</sub>O: molécula de água  
kcal: quilocalorias  
LTCM: Laboratório de transferência de calor e massa  
M: massa da caixa (kg)  
m<sup>3</sup>: metros cúbicos  
MJ/kg: mega joule dividido por quilograma  
MAPA: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento  
MDL: Mecanismo de desenvolvimento limpo  
mg: miligramas  
MME: Ministério de Minas e Energia

MV: Materiais voláteis  
MW: megawatts  
N: nitrogênio  
O: oxigênio  
PC: Poder calorífico (kcal/kg)  
PCI: Poder calorífico inferior (kcal/kg)  
PCS: Poder calorífico superior (kcal/kg)  
PCU: Poder calorífico útil(kcal/kg)  
RCE: Redução certificada de emissões  
S: Enxofre  
t/ha: tonelada dividido por hectare  
TCD: Detector de condutividade térmica  
ton: toneladas  
TU: Teor de umidade (%)  
UFU: Universidade Federal de Uberlândia  
°C: graus Celsius

ARANTES, D. C. **BAGASSO DE CANA DE AÇÚCAR: ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA DE BIOMASSA**. 2014. 99p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## RESUMO

A dependência da humanidade sobre os combustíveis fósseis ainda é muito evidente. E a busca por alternativas ecologicamente favoráveis que possam reduzir o uso de fontes não renováveis necessitam cada vez mais de investimentos. Frente a essa dependência, a biomassa exerce um papel importantíssimo, pois se trata de uma fonte de energia renovável bastante explorada em nosso planeta. Entretanto, o uso deste combustível requer um manuseio cuidadoso e consciente dos recursos naturais, evitando assim desequilíbrios ambientais e destruição de ecossistemas. Dentre as alternativas existentes para o uso da biomassa com fins energéticos, destaca-se o reaproveitamento energético de resíduos florestais, agrícolas e urbanos. No entanto, os resíduos apresentam-se com baixa eficiência energética, devido algumas características que restringe o seu uso direto como combustível, tais como baixa densidade, elevado teor de umidade, granulometria irregular, baixo poder calorífico, alto teor de cinzas, entre outras. No intuito de melhorar algumas propriedades e padronizar o produto faz-se necessária a utilização de processos industriais, como a compactação e a torrefação. Neste contexto, este trabalho consiste em analisar e definir o potencial energético do bagaço de cana-de-açúcar de uma grande usina sucroalcooleira do interior do estado de Goiás. Os experimentos foram conduzidos segundo normas técnicas nacionais e consistiram em realizar a análise imediata, determinar a densidade do bagaço de cana-de-açúcar e definir a relação entre poder calorífico e umidade do produto padrão. E, por fim, aplicou-se o tratamento térmico chamado torrefação, o que proporcionou a valorização energética do produto e diminuiu sua característica higroscópica quando comparado ao produto padrão.

ARANTES, D. C. **SUGARCANE BAGASSE: THERMAL AND ENERGY ANALYSIS FROM BIOMASS**. 2014. 99p. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## ABSTRACT

The dependence of fossil fuels is still very evident and the search for alternative environmentally fuels that can reduce this dependency need investment. In this sense, biomass has an important role as a renewable energy source quite exploited on our planet. However, the use of this fuel requires careful and conscientious handling of natural resources, preventing environmental imbalance and destruction of ecosystems. Among the alternatives of biomass for energy purposes, highlights the energetic reuse of forest, agricultural and urban residues. However, this kind of biomass presents low energy efficiency due to certain characteristics that restricts their direct use as fuel, such as low density, high moisture, irregular grain size, low calorific value, high ash, among others. In order to fix some properties, improve and standardize the product is necessary the use of industrial processes, such as compaction and roasting. In this context, this paper is to analyze and define the energy potential of sugarcane bagasse, a large sugarcane mill in the state of Goiás. The experiments were conducted according national standards and consisted perform immediate analysis, determine the density of sugarcane bagasse and define the relationship between calorific value and moisture of the standard product. Finally, we applied the thermal treatment called roasting, which provided energy recovery product and decreased its hygroscopic character when compared to standard product.

---

*Keywords: sugarcane bagasse, biomass, roasting, calorific value.*

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A dependência mundial sobre os combustíveis fósseis, como carvão mineral, petróleo e seus derivados, ainda é muito acentuada. E a busca por combustíveis menos poluentes e que possam reduzir essa dependência é contínua e necessitam cada vez mais de investimentos em pesquisa e tecnologia.

Frente a essa dependência, a biomassa exerce um papel muito importante, pois é uma fonte de energia renovável bastante explorada em nosso planeta. A introdução da cana-de-açúcar no Brasil, data da época do descobrimento, trazidas pelo colono português Martina Afonso de Souza, primeiramente ao estado de São Paulo e depois a cultura se espalhou para diversos estados brasileiros no decorrer dos tempos.

O Brasil é hoje o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, reconhecido como um dos líderes na produção de cana-de-açúcar e responsável por 1/3 de toda a produção mundial (RODRIGUES, 2010). Segundo a CONAB (2013), é esperado para esta safra de 2014 um aumento na área plantada e também um aumento na produção de cana-de-açúcar. De todas as culturas brasileiras, a da cana-de-açúcar é a que mais gera resíduos de biomassa que são reaproveitados no processo produtivo para a geração e cogeração de energia. Com isso, há um enorme acúmulo de biomassa nos pátios das usinas, pois nem todo bagaço de cana-de-açúcar gerado é consumido durante a safra.

Segundo Santos, et al (2011), nas usinas e destilarias, a produção do bagaço tem início na fase de recepção da matéria-prima e após a extração do caldo, o bagaço sai das moendas com um teor de umidade de aproximadamente 50%, sendo enviado em seguida às caldeiras para a combustão.

Por ser uma biomassa sazonal, o excedente de bagaço é normalmente estocado nos pátios das usinas em forma de pilhas que podem chegar a cerca de 300 metros de extensão, 100 metros de largura e 40 metros de altura. Nestas condições, a deterioração da camada externa protege as camadas internas, gerando perdas de até 15% em massa de bagaço (SANTOS et al, 2011).

O bagaço é estocado ainda úmido com cerca de 2 a 3% de açúcar. Logo, ao longo dos dias, devido alto teor de umidade e à ação microbiana, a biomassa inicia um processo de fermentação exotérmico, o que faz com que o interior da pilha atinja temperaturas elevadas, em torno de 60°C, o que provoca sua deterioração e afeta diretamente suas características. Além disso, durante o processo de fermentação, há a formação e acúmulo de gases no interior das pilhas, que podem entrar em combustão e, conseqüentemente causar a queima da biomassa, demandando constante inspeção e gerando prejuízos para a usina. Essa deterioração é causada, principalmente, por fungos que se dividem entre aqueles que causam a podridão parda, destruindo polissacarídeos da parede celular (hemicelulose e celulose) e os que causam a podridão branca que, além dos polissacarídeos, destroem também a lignina (SANTOS et al, 2011).

Um procedimento alternativo à estocagem em forma de pilhas consiste no tratamento térmico e posteriormente compactação da biomassa. Segundo Felfli (2003), a torrefação é um tratamento térmico viável para o melhoramento do bagaço de cana-de-açúcar como combustível, demandando pouca energia para sua realização, e que transforma a biomassa em um biocombustível intermediário entre o produto padrão e o carvão vegetal. Além do alto rendimento gravimétrico, a torrefação também proporciona uma melhora energética do combustível por meio da redução do teor de umidade, redução das características higroscópicas, incremento no carbono fixo, aumento da resistência à degradação biológica (fermentação) e, principalmente, aumento do poder calorífico, característica muito importante para uma matéria-prima a ser usada para conversão em energia.

Por meio do tratamento térmico da torrefação, a biomassa que é normalmente estocada, passa a ter inúmeras aplicações e pode gerar lucro para usina, uma vez que o excedente pode ser vendido para o mercado nacional e até mesmo internacional. Como exemplo, citam-se as aplicações na geração e cogeração de energia nas próprias usinas, na siderurgia, em indústrias na substituição de combustíveis derivados do petróleo, em caldeiras geradoras de vapor, no comércio em churrascarias, pizzarias, etc. Por se tratar de uma biomassa (bagaço de cana-de-açúcar torrificada), com baixas características higroscópicas e alto poder calorífico, a exportação se torna uma prática viável e lucrativa para as usinas sucroalcooleiras. Além disso, vale a pena ressaltar que compactação se faz

necessária, pois aumenta a densidade da biomassa o que viabiliza o transporte e até mesmo a exportação.

Com base e tais informações este trabalho apresenta uma análise térmica e energética de bagaço de cana-de-açúcar ssp. O estudo consiste em definir o potencial energético do produto padrão colhido diretamente em uma usina sucroalcooleira, localizada no interior do estado de Goiás, e identificar a melhor relação tempo x temperatura de torrefação que proporcionem a melhor valorização energética da biomassa. Por meio de experimentos realizados em laboratório, como por exemplo, a análise do poder calorífico, carbono fixo, teor de umidade, combustão, comparações com as características térmicas e energéticas do produto padrão, será avaliada a viabilidade do tratamento térmico proposto.

Assim sendo, no Capítulo II, apresenta-se inicialmente uma revisão bibliográfica acerca dos diversos tipos de biomassa que são usados no Brasil para a geração de energia, destacando-se o uso da cana-de-açúcar. São discutidos também os diversos tipos de ensaios que são realizados para a caracterização térmica e energética de uma biomassa. E por fim, são apresentados alguns tratamentos termoquímicos e mecânicos, tais como a secagem, a torrefação, a carbonização da biomassa e a compactação como forma de melhoria das características energéticas deste combustível.

Já no Capítulo III são apresentados todos os procedimentos experimentais e metodologias realizadas com o bagaço de cana-de-açúcar desde a preparação das amostras até sua finalização. Inicialmente realizou-se a análise imediata, seguida da determinação da densidade à granel e do poder calorífico das amostras padrão colhidas diretamente na usina sucroalcooleira. Na sequência, determinou-se a influência do teor umidade no poder calorífico da amostra padrão. Para a torrefação foram definidos o tempo e a temperatura que tornam a biomassa menos higroscópica e aumentam seu poder calorífico útil. E, por último foi realizada a análise de combustão do produto padrão e do produto torreficado.

No Capítulo IV são apresentados todos os resultados obtidos na caracterização do produto padrão e dos produtos torrefeitos. Destacando-se a influência do teor de umidade no poder calorífico do produto padrão, a análise de higroscopicidade dos produtos torreficados e o comportamento do bagaço de cana-de-açúcar padrão e torreficado frente ao processo de combustão.

Por fim, no capítulo V são apresentadas as conclusões deste trabalho e as propostas para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. O uso dos diferentes tipos de biomassa para conversão em energia

O termo biomassa compreende a matéria vegetal gerada pela fotossíntese e seus diversos produtos e subprodutos derivados, tais como florestas, culturas (plantadas e nativas), resíduos agrícolas dejetos animais e matéria orgânica. Essa matéria-prima contém energia química acumulada através da transformação energética da radiação solar e pode ser diretamente liberada por meio da combustão, ou ser convertida através de diferentes processos, em produtos energéticos, tais como carvão vegetal, etanos, gases combustíveis e de síntese, óleos vegetais combustíveis e outros (MME, 2007).

Segundo Brito e Barrichello (1978), a biomassa é um dos recursos naturais mais úteis de que dispõe o homem e, através da fotossíntese convertem o carbono, hidrogênio e oxigênio em fibras de madeira.

Numa perspectiva de longo prazo, o MME (2007) relata que a biomassa como fonte de energia elétrica e para fins energéticos de uma maneira geral, está entre as fontes renováveis com maiores possibilidades de utilização. Do mesmo modo a Agência nacional de energia Elétrica - ANEEL (2008) e Srivastava (1995) concordam afirmando que a biomassa é uma das fontes energéticas de maior potencial de crescimento, tanto no mercado internacional quanto no mercado interno, sendo uma excelente alternativa para a redução da dependência dos combustíveis fósseis e/ou sólidos (lenha, carvão vegetal e mineral). Da cana-de-açúcar, por exemplo, é possível se obter o etanol em substituição aos derivados de petróleo, como a gasolina e o óleo diesel. E uma maneira fácil e simples de se utilizar o poder calorífico da biomassa é a sua combustão direta.

Goldemberg (2009) em seu estudo mostra que as projeções para o futuro indicam que a importância da biomassa aumentará muito, chegando a representar no fim do século 21 de 10 a 20% de toda a quantidade de energia usada pela humanidade.

Mas, se atualmente a biomassa é uma alternativa energética em evidência, historicamente tem sido pouco expressiva na matriz energética mundial. Ao contrário do que ocorre com outras fontes, como carvão, energia hidráulica ou petróleo, não tem sido contabilizada com precisão (ANEEL, 2008). Ainda, segundo a ANEEL (2008), as estimativas mais aceitas indicam que a biomassa representa cerca de 10% do consumo mundial de energia primária, frente aos quase 50% do uso de petróleo.

De acordo com Cortez et al. (2008), a biomassa pode ser obtida através de resíduos vegetais não-lenhosos e lenhosos, resíduos orgânicos e os biofluidos (óleos vegetais), como mostra a Figura 1. Além das formas de combustíveis já citadas, este autor também menciona os resíduos urbanos, industriais, florestais e animais como fonte de biomassa.

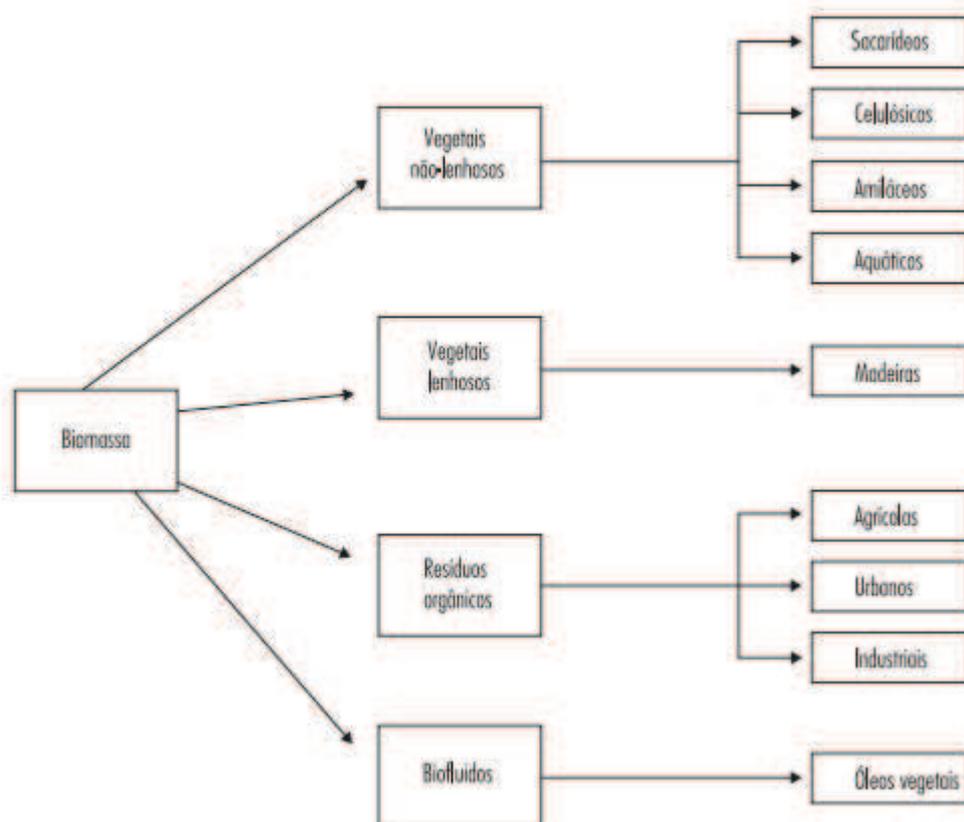


Figura 2.1- Fontes de Biomassa (Fonte: Cortez et al 2008).

### 2.1.1. Resíduos Vegetais

Segundo Cortez et al (2008), os resíduos vegetais são produzidos no campo, resultantes da atividade de colheita dos produtos agrícolas, sendo o Brasil um grande produtor. Com o aumento da área plantada e de produção, há uma grande quantidade de

resíduos que são aproveitados energeticamente com as tecnologias existentes, porém o Brasil não aproveita mais de 200 milhões de toneladas dos resíduos agroindustriais.

A Tabela 2.1 mostra que o Brasil é um grande produtor de cana-de-açúcar e também de outras culturas como arroz, mandioca e soja.

Tabela 2.1. – Produção de matéria-prima e seus resíduos no Brasil em 2004 (Fonte: Cortez et al, 2008).

<b>Matéria-prima</b>	<b>Produção agrícola (ton)</b>	<b>Produção de resíduos (t/ha)</b>	<b>Matéria seca (%)</b>	<b>Produção total de resíduos (ton)</b>
Cana-de-açúcar (bagaço)	396.012.158	7,0-13,0	23,4	59.041.824
Arroz (casca)	10.334.603	4,0-6,0	89,0	2.937.094
Café (casca)	2.454.470	-	-	1.662.658
Mandioca (rama)	21.961.082	6,0-10,0	90,4	6.542.206
Milho (palha e sabugo)	48.327.323	5,0-8,0	90,5	64.028.870
Soja (restos de cultura)	51.919.440	3,0-4,0	88,5	80.746.639

Os resíduos vegetais possuem baixa densidade e muitos deles se encontram em forma de pó, provocando poeira e poluição, tornando difícil e de custo elevado seu manuseio, o transporte, o armazenamento e seu uso como combustível. A maioria dos resíduos vegetais contém elevado teor de umidade. Portanto, entre 18 e 20% do calor gerado na combustão é consumido para secar a própria biomassa, perdendo assim grande parte de seu potencial energético (GONÇALVES, 2010). Segundo Cortez et al (2008) os resíduos gerados por essas culturas (Tabela 2.1), são constituídos basicamente por palhas, folhas e caules, gerando um poder calorífico de 15,7 MJ/kg, em média.

### 2.1.2. Resíduos Urbanos

Para Cortez et al (2008) os resíduos sólidos urbanos são obtidos dos resíduos domiciliares e dos resíduos comerciais, onde há um crescimento anual de 5% em quantidade de lixo gerado. Para que o aproveitamento energético desses resíduos seja vantajoso economicamente, é necessário considerar uma população de no mínimo 300 mil habitantes. O teor de matéria orgânica (C, H, O, N) no lixo urbano brasileiro é de

aproximadamente 60%, conferindo um bom potencial energético e com Poder Calorífico Inferior (PCI) médio de 1300 kcal/kg

Ciampi (1992) mostra que a utilização de resíduos urbanos, como fonte de energia renovável, visto que onde há sociedade, haverá resíduos, já é uma realidade antiga em países como a França, que utiliza essa modalidade desde o ano de 1928 para a produção de energia elétrica e produção de vapor para calefação.

### 2.1.3. Resíduos Industriais

Já os resíduos industriais são considerados por Cortez et al (2008) aqueles provenientes do beneficiamento de produtos agroflorestais, do uso de carvão vegetal no setor siderúrgico e do gás de alto-forno. A indústria madeireira (serrarias e mobiliário), através do beneficiamento de toras, obtém resíduos na forma de cascas, cavaco, costaneira, pó de serra, marvalha e aparas. E as indústrias de alimentos e bebidas produzem resíduos na produção de sucos e aguardentes como laranja, caju, abacaxi, cana-de-açúcar, etc. (CORTEZ et al, 2008).

O uso energético desses resíduos é obtido por meio da queima direta, na maioria dos casos, em fornos e caldeiras, ou através da digestão anaeróbica. A tomada de decisão para a escolha do processo de conversão energética desses resíduos é o seu teor de umidade, pois em prática, só é possível a queima de resíduos com até 50% de teor de umidade. Sendo assim, resíduos como vinhaça resultante da produção de etanol, afluentes de matadouros, derivados de leite, etc., são adequados para a produção de biogás através da fermentação anaeróbica. (CORTEZ et al, 2008)

No setor de papel e celulose há a produção de casca, cavaco e lixívia como forma de resíduos. Existem 220 companhias em 16 estados brasileiros que utilizam madeira de reflorestamento das espécies eucalipto (62%) e *pinus* (36%). Há também o setor siderúrgico, que reaproveita o gás de alto-forno, com unidades em diversos estados brasileiros, principalmente no estado de Minas Gerais. (CORTEZ et al, 2008)

Esse tipo de resíduo ainda é pouco controlado no Brasil, revelando que o país desconhece os dados sobre a própria geração de resíduos industriais, sendo que, dos 5471 municípios, apenas 551 fazem controle dos resíduos gerados pelo setor produtivo privado, no ano de 2003. (CORTEZ et al, 2008)

### 2.1.4. Resíduos Animais

Os resíduos animais são determinados pela capacidade de produção de dejetos das criações. As criações brasileiras de animais que são relevantes e justificam um

aproveitamento energético dos resíduos são as de gado bovino, suíno, caprino e ovino, sendo os rebanhos bovinos e suínos os principais. (CORTEZ et al, 2008)

Na Tabela 2.2 é apresentado a quantidade de dejetos produzido por tipo de rebanho, destacando o gado bovino com o maior volume de dejetos e maior quantidade de animais. Para a obtenção do poder energético, o esterco seco pode ser queimado diretamente, produzindo um poder calorífico de 14,6 MJ/kg. (CORTEZ et al, 2008)

Tabela 2.2: Quantidade de excremento produzido por diferentes rebanhos (Fonte: Cortez et al, 2008).

<b>Animal</b>	<b>Massa animal (kg)</b>	<b>Volume excremento (m<sup>3</sup>/dia) [10<sup>-3</sup>]</b>	<b>Massa úmida excremento (kg/dia)</b>	<b>Matéria seca (%)</b>
Gado de corte	500	28,0-37,0	27,7-36,6	10
Gado de leite	500	31,0-35,0	30,2-35	10
Suínos	100	5,6-7,8	5,4-7,6	10
Equinos	500	25,0	28,0	20
Ovelhas	-	-	2,0	20

#### 2.1.5. Resíduos Florestais

Os resíduos florestais, segundo Cortez et al.(2008), são formados por todo material rejeitado durante a coleta da madeira (folhas, galhos e matéria de destoca), tanto em florestas nativas, bosques e reflorestamento, assim como também as serragens e aparas produzidas no processamento da madeira. O Brasil é o segundo país do mundo quando o assunto é reflorestamento, com uma área de 29 mil km<sup>2</sup> de árvores de eucalipto replantadas, atrás somente da Índia, sendo o principal destino a região brasileira do cerrado. Com um grande salto tecnológico, resultando no aprimoramento de técnicas de implantação, manejo e exploração, o setor de papel e celulose passou usar toda matéria-prima proveniente do reflorestamento Cortez et al.(2008).

O fornecimento de matéria-prima para a indústria do carvão vegetal viu, em uma década, saltar de 34% para 72%. Mesmo o eucalipto possuindo menor tempo de crescimento (4 a 8 anos) com relação ao pinus (12 anos), ainda não é a principal matéria-prima para esse tipo de indústria, com um volume de 1.823.204 m<sup>3</sup>, ante o pinus com um volume de 2.013.607 m<sup>3</sup> de madeira consumida pelas empresas para a geração de energia. (CORTEZ et al, 2008)

No Brasil o uso mais importante da biomassa está relacionado com o desenvolvimento e utilização de veículos movidos a etanol (cana-de-açúcar), que veio a

criar uma alternativa mais sustentável e promissora que os derivados de petróleo (WALKER, 2009). O maior produtor de biomassa de cana-de-açúcar é São Paulo, exportando etanol para todos os estados brasileiros, onde as usinas, em alguns casos, são autossuficientes na produção de energia elétrica utilizando o próprio bagaço da cana que seria descartado (WALKER, 2009). O MME (2011) mostrou que no ano de 2011 a participação de energias renováveis na matriz energética brasileira (44,1%) manteve-se entre as mais elevadas do mundo, com pequena redução devido à menor oferta de etanol. Dentre essas fontes destaca-se a biomassa de cana-de-açúcar com 15,7%, hidráulica para eletricidade, com 14,7%, lenha e carvão vegetal, 9,7% e lixo e outras fontes, com 4,1%

De acordo com Walker (2009), na região amazônica, para a produção de energia elétrica nas comunidades locais, são utilizados óleos vegetais de várias plantas, como por exemplo das árvores de andiróbas e copaíbas. Outros estados brasileiros, como Rio Grande do Sul, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Maranhão e Pará são grandes produtores de casca de arroz como resíduos. Assim como podemos destacar também; nos estados do Pará e Bahia, o óleo de dendê; no Ceará e Piauí, a casca da castanha de caju e no Mato Grosso a madeira (WALKER, 2009).

A Fig. 2.2 exemplifica alguns dos tipos de biomassa existentes e seu destino como combustível. Entre esses exemplos podemos citar pellets de biomassa, cavaco de lenha, lenha de eucalipto, casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, casca de castanhas, etc.

A cana-de-açúcar é uma cultura extremamente antiga no Brasil, e por muito tempo, considerada a mais importante e rentável cultura da época, pois o açúcar, um produto secundário extraído da cana-de-açúcar era muito apreciado e valorizado pela coroa portuguesa.



a) Pellets de biomassa



b) Lenhas de Eucalipto



c) Cavacos de Lenha



d) Casca de arroz



e) Bagaço de cana-de-açúcar



f) Casca de castanhas

Figura 2.2 - Alguns exemplos de biomassa utilizados como combustíveis (Fonte: Ecogetec, Biocana, 2014).

## 2.2. A cana-de-açúcar no Brasil

Segundo Brandão (1984), a introdução do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil-colônia tinha como finalidade a fabricação do açúcar para enriquecimento de Portugal, que era a metrópole. Também é considerada a mais longa das bases econômicas de nossa história. Com origem na Ásia, teve uma adaptação muito boa ao clima brasileiro, pois é excelente para climas tropicais e subtropicais.

Segundo o mesmo autor, há uma divergência sobre a época em que foi introduzida a cultura da cana no Brasil. As primeiras mudas de cana-de-açúcar podem ter sido trazidas em 1502 pelos colonos portugueses. No entanto, Mattos (1942), afirma que as primeiras mudas foram trazidas da Ilha da Madeira, de Portugal, no século XVI, por Martin Afonso de Souza que foi o responsável pelo primeiro engenho brasileiro em São Vicente, no ano de 1532. Em seguida, outros engenhos proliferaram pela costa brasileira, sobretudo no litoral de Pernambuco e Bahia. Alguns dos engenhos brasileiros da época evoluíram e transformaram-se em usinas.

Como Portugal não forneceu condições às suas colônias para a manutenção do monopólio da cana-de-açúcar e com o declínio do consumo de açúcar pelo mercado europeu, em meados do século XIX, a cana-de-açúcar perde espaço e deixa de ser o principal produto nacional, perdendo para o café e para a borracha. (MATTOS, 1942). Segundo Figueiredo (2008), no início, a produção da cana-de-açúcar no Brasil já era feita por grandes proprietários visando o comércio exterior de açúcar, contribuindo para um sistema latifundiário que perdura até os dias atuais. Antes de seu declínio, segundo Unica (2008), estima-se que a exportação de açúcar rendeu ao Brasil lucros 5 vezes maiores que todas as outras culturas agrícolas que eram destinadas à exportação.

Segundo o MAPA (2012), o Brasil possui aproximadamente 10 milhões de hectares com o plantio de cana-de-açúcar, totalizando apenas 2% de toda terra agricultável disponível no país, sendo o maior produtor mundial, seguido por Índia, China e Tailândia. As maiores regiões produtoras brasileiras são Sudeste, Centro-Oeste, Sul e Nordeste, permitindo duas safras por ano. A Tabela 2.3 ilustra os principais produtores de cana-de-açúcar no mundo.

Tabela 2.3: Principais países produtores de cana-de-açúcar no mundo.

<b>País</b>	<b>Produção (milhões ton)</b>	<b>Área (milhares ha)</b>	<b>Produtividade (ton/ha)</b>
Brasil	627,3	9080,8	53,5
Índia	227,8	4200	66,1
China	111,5	1695,2	65,7
Tailândia	50,4	978	70,4
México	68,8	703,9	71,6

Fonte: MAPA – Anuário Estatístico da agroenergia 2012.

De acordo com Gonçalves (2008), o interesse mundial pela cana-de-açúcar cresceu, devido a sua importância na produção de energia elétrica (bagaço), combustível (etanol), medicamentos e alimentos (açúcar).

Do processamento da cana-de-açúcar, são obtidos o açúcar, o etanol combustível e o etanol comum utilizado em bebidas alcoólicas e, para limpeza doméstica o etanol hidratado, a vinhaça e a levedura de cana. Além disso, o bagaço e a palha da cana, antes considerados resíduos industriais, hoje são utilizados como fontes de energia térmica e elétrica em sistemas de cogeração, com valor agregado, instalados na maioria das indústrias sucroalcooleiras distribuídas pelo Brasil (DIAS et al. 2009).

Ribeiro e Morelli (2009) mostraram que a reutilização e reaproveitamento de resíduos economizam recursos naturais e reduzem os impactos ambientais ao serem utilizados em seu processo produtivo, quando comparados aos processos que utilizam matérias virgens.

Segundo a CONAB (2013), Companhia Nacional de Abastecimento, para a safra 2013/2014 de cana-de-açúcar, é esperado que o Brasil tenha um acréscimo de 314 mil hectares de área plantada, equivalendo a 3,7% da safra anterior. Tal acréscimo é reflexo do aumento de área na região Centro-Sul. As regiões Norte/Nordeste praticamente se mantém constante, porém os estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul deverão ser os estados com maior acréscimo de áreas com 95,9 mil hectares, 60,1 mil hectares, 92,5 mil hectares e 81,4 hectares, respectivamente.

Já para a produção de cana-de-açúcar, a CONAB (2013) espera que região Centro-Sul produza 594,1 milhões de toneladas, 11,5% maior que a produção da safra anterior. Para a região Nordeste é esperado um aumento em torno de 3,6%, passando dos atuais 55,93 milhões de toneladas da safra anterior para 57,92 milhões na safra 2013/14. A previsão do total de cana a ser moída é de 652,02 milhões de tonelada, com aumento de 10,70% em relação à safra de 2012/13.

### *2.2.1. A Biomassa na geração de energia e o desenvolvimento sustentável*

Na primeira Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, realizada em Berlim em 1995, foi decidido pela negociação de um protocolo, cujas diretrizes estão contidas na resolução conhecida como Mandato de Berlim. De acordo com esse mandato, deveria ser iniciado um processo, por meio da adoção de um protocolo ou outro instrumento legal, que fortalecesse os compromissos dos países incluídos nessa convenção. Esses membros deveriam elaborar políticas e medidas para definir objetivos de limitação quantificada e redução dentro de prazos específicos, como 2005, 2010 e 2020, para suas emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros de gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal (JURAS, 2007).

Nesta ocasião, o Brasil apresentou uma proposta para a concepção desse novo instrumento e teve participação de destaque nas negociações que se seguiram. A proposta consistia nos seguintes pontos:

- Gases do efeito estufa: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O);
- Estabelecimento de um teto de emissões para os países;
- O não cumprimento do teto implicaria em um valor de U\$ 3,33 para cada unidade de emissão acima do teto, em toneladas de carbono, destinadas a um fundo de desenvolvimento limpo;
- Os recursos do fundo seriam destinados aos países para uso em projetos de mitigação e adaptação à mudança do clima.

Essa proposta, com algumas modificações, resultou no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), um dos instrumentos previstos no protocolo de Kyoto, assinado em 1997, Na terceira conferência dos países.

O protocolo de Kyoto obrigou os países desenvolvidos, individual ou conjuntamente, a cortar, no período de 2008 a 2012, em média, 5,2% das emissões de gases do efeito estufa em relação ao ano-base de 1990. Além do MDL, o protocolo prevê dois outros mecanismos que permitem o cumprimento das metas de redução de emissões, a implementação conjunta (*joint implementation*) e o comércio de emissões (*emissions trading*). Qualquer país pode adquirir de outras unidades de redução de emissões de projetos destinados a diminuir as emissões ou aumentar as remoções dos gases do efeito estufa (JURAS, 2007). Em seu artigo 12, o MDL diz que para cada tonelada de CO<sub>2</sub> retirada ou deixada de ser emitida na atmosfera, de instalações em países em desenvolvimento, possa ser negociada no mercado internacional com uma Redução Certificada de Emissões (RCE) ou em créditos de carbono (OLIVEIRA, 2007).

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo destina-se a auxiliar os países não desenvolvidos a atingir o desenvolvimento sustentável e contribuir para o objetivo final da Convenção. O MDL poderá beneficiar o Brasil, em projetos nos setores energéticos, de transportes e florestal. Podem candidatar-se, por exemplo, projetos relativos a implementação de energia solar e eólica, cogeração, aproveitamento de biomassa, plantios florestais e reflorestamento. (JURAS, 2007).

À procura de fontes mais eficientes e menos poluentes, o mundo tem buscado novas alternativas, priorizando as mais limpas. Como fonte de energia primária a biomassa é tida como uma das principais responsáveis pelo consumo energético de países em desenvolvimento e uma das mais utilizadas no mundo, com destaque para a cana-de-açúcar (DANTAS, 2010).

Lora e Teixeira (2001) mostraram algumas vantagens da biomassa como combustível, quando comparado aos combustíveis fósseis. As vantagens apresentadas são o fato de ser uma fonte renovável de energia, baixo custo na aquisição e baixas emissões

de CO<sub>2</sub>. Há também as baixas emissões de materiais particulados, óxidos de nitrogênio e óxidos de enxofre quando comparados aos combustíveis fósseis como carvão mineral e óleos combustíveis.

Segundo Barros (2007), a produção de energia elétrica à partir da biomassa tem sido bastante defendida e incentivada. De acordo com a FEISP (2007), o Brasil há vários anos investe em tecnologias para a utilização da biomassa como fonte geradora de energia.

Soares e Rossell (2007), em seus estudos, fizeram uma comparação entre o conteúdo energético de uma tonelada de cana de açúcar, com um valor de 1.718.000 kcal, frente ao potencial energético de um barril de petróleo que é de 1.386.000 kcal, ou seja, uma tonelada de cana-de-açúcar equivale energeticamente a 1,24 barris de petróleo bruto. Considerando que a produção da safra de 2004/2005 foi de 386,2 milhões de toneladas, em equivalência energética, essa safra correspondeu a 478,7 milhões de barris de petróleo ou 1,3 milhões de barris/dia, valor esse muito próximo ao consumo nacional da época, que foi de 1,5 milhões de barris/dia.

De acordo com Soares e Rossell (2007), o aproveitamento do bagaço de cana, atualmente, é como combustível nas caldeiras, para geração de vapor e geração de energia elétrica para o consumo na própria usina e a venda do excedente para as concessionárias de energia elétrica, sendo que o grau de eficiência do sistema de cogeração ou geração depende da tecnologia empregada em cada usina.

Segundo Soares e Rossell (2007), DEDINE uma empresa brasileira fabricante de caldeiras, é possível a geração de 153 MW totais de potência elétrica, com um aproveitamento de 100% do bagaço de cana em uma usina de médio porte, moendo 10.000 toneladas/dia de cana ou 2 milhões de toneladas por safra. A Fig. 3 ilustra o aproveitamento de energia gerado pelo bagaço de cana nas caldeiras.

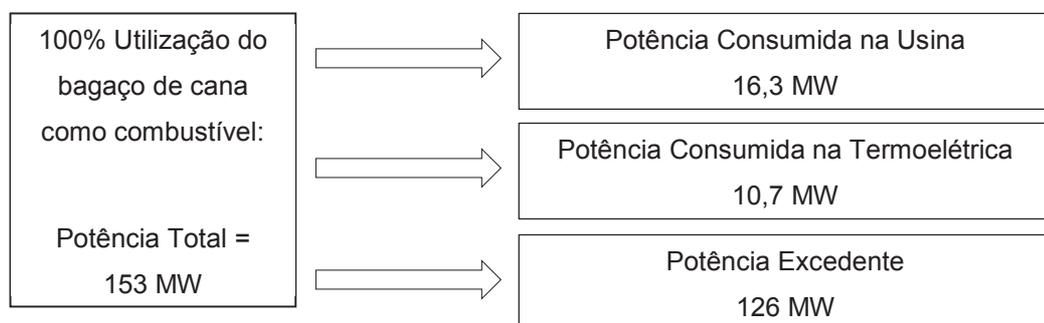


Figura 2.3: Diagrama do saldo energético de uma usina sucroalcooleira. (Fonte: SOARES e ROSSELL, 2007).

Com a privatização do setor elétrico, à partir de 1999, foi criado a figura do produtor independente de energia, abrindo um novo mercado para as usinas sucroalcooleiras. Tal condição foi um incentivo para os produtores investirem em tecnologias e modificassem seu

sistema de geração de vapor e energia de baixa eficiência, que tinha por finalidade apenas o consumo do bagaço gerado, para um sistema de melhor eficiência para que o excedente de bagaço fosse utilizado para a geração de energia elétrica. (SOARES e ROSSELL, 2007).

Segundo o MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2009), há no Brasil um total de 423 usinas de cana-de-açúcar cadastradas. Deste total, 16 usinas são somente produtoras de açúcar, 159 produtoras de álcool e 248 mistas (produtoras de açúcar e álcool), onde o estado de São Paulo possui perto de 50% do total dessas usinas instaladas, ou seja, 195 usinas cadastradas, em que 61 são produtoras de etanol, 6 de açúcar e 128 são mistas. De acordo com Soares e Rossell (2007), a grande maioria dessas usinas estão localizadas na região de atuação da CPFL Energia S/A (Companhia Paulista de Força e Luz), sendo esta companhia a maior compradora de energia gerada pelas usinas. A Fig. 4 mostra a evolução do total de energia comprado pela CPFL das usinas instaladas na área, mostrando o grande salto à partir das privatizações em 1999.

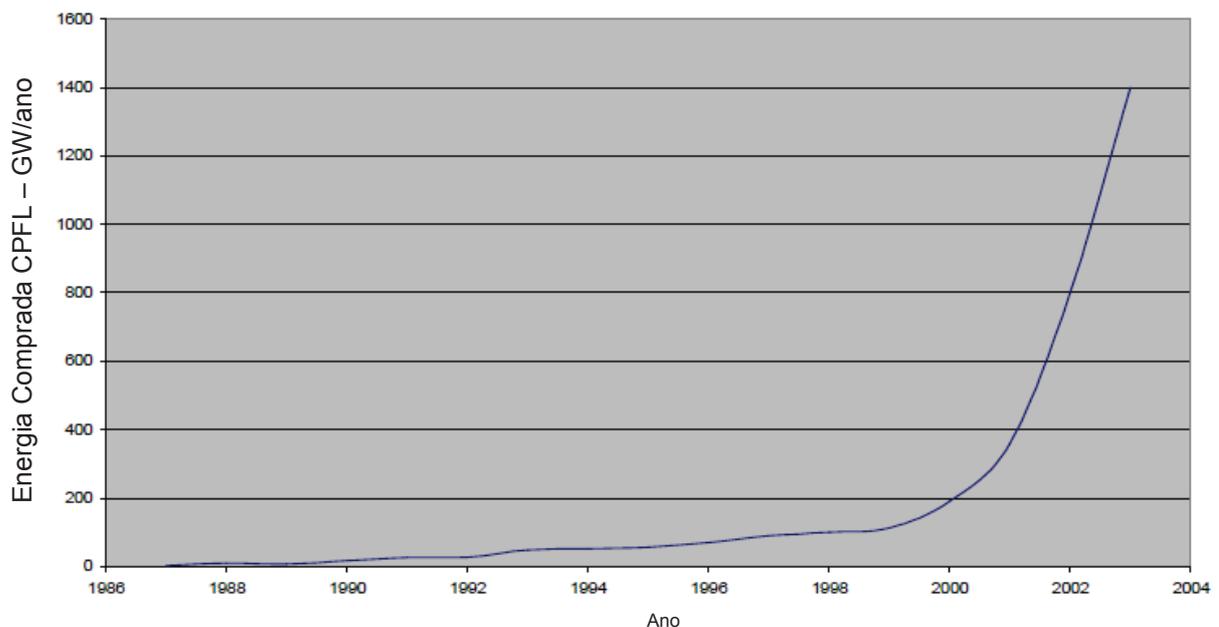


Figura 2.4: Evolução da compra do excedente de energia gerada pelas usinas (Fonte: SOARES E ROSSELL, 2007).

### 2.2.2. A cogeração de energia na indústria da cana-de-açúcar

De acordo com Dantas (2010), o sistema de cogeração é o principal responsável pelo suprimento de energia térmica e eletromecânica nas usinas de cana-de-açúcar no Brasil e no mundo. Segundo Costa (1998), a cogeração é um processo no qual uma fonte de energia primária alimenta uma máquina térmica que, pelo processo de combustão, converte a energia química do combustível em energia térmica, depois em mecânica e, finalmente é convertida em energia elétrica por meio de geradores elétricos.

De acordo com Ramos et al (2003), no Brasil, a cogeração é uma prática tradicional, mudando apenas a eficiência com que os resíduos são utilizados. Durante alguns anos, a cogeração ficou limitada a sistemas isolados e a indústrias com lixos combustíveis, pois esse sistema foi perdendo espaço e competitividade para a eletricidade produzida pelas grandes concessionárias, devido a ineficiência tecnológica de seus equipamentos. No entanto Schirmer (2006), explica que a partir dessa perda de espaço, e com a necessidade de redução de CO<sub>2</sub>, um novo modelo no setor elétrico voltou a estimular a produção de energia local que fosse mais eficiente e com custos mais reduzidos, onde beneficiasse todos os tipos de usinas. Vieira e Oliveira Júnior (1998), a partir de suas análises termoeconômicas dos sistemas de cogeração e geração termoelétrica, concluíram que um aumento da utilização dos sistemas de cogeração na matriz energética brasileira traria apenas benefícios sobre a redução do consumo de combustível e à diminuição dos poluentes atmosféricos, e como consequência, uma redução dos custos das emissões.

A grande maioria das indústrias sucroalcooleiras são auto suficientes em suas demandas térmicas e energéticas, havendo usinas produtoras de excedentes de energia elétrica, que são exportados para a rede de transmissão elétrica. Nesse sentido, a geração de energia atual proveniente do setor sucroalcooleiro, encontra-se muito abaixo de seu potencial, quando comparado aos países industrializados (BARJA, 2006).

Segundo um estudo feito pelo Instituto Euvaldo Lodi (IEL, 2008), em parceria com a Confederação Nacional da Indústria e a Itaipu Binacional, foi apresentado que a biomassa de cana tem condições de acrescentar ao sistema elétrico brasileiro, até 2020, aproximadamente 15 mil MW de eletricidade, o que seria equivalente a incorporação de uma nova usina Itaipu ao parque nacional. Tais dados mostram que o setor poderá contribuir muito para suprir a crescente demanda de energia no país.

### **2.3. Caracterização Energética da Biomassa Vegetal**

Segundo Rendeiro e Nogueira (2008) a análise imediata tem como finalidade a quantificação dos teores de umidade, materiais voláteis (gases condensáveis e não condensáveis) e carbono fixo na amostra de biomassa e destaca também a importância do conhecimento da análise elementar do combustível usado. Ciampi (1992) e Rodrigues (2009), além dos parâmetros já citados, acrescentam também a análise de Poder Calorífico e densidade energética, respectivamente.

#### **2.3.1. Análise Imediata**

Os ensaios de análise imediata serão realizados segundo a norma ABNT/NBR 8112/1986 e engloba os teores de: umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo. Lenço (2010) comenta que as análises desses parâmetros servem para prever o comportamento

do combustível no processo de combustão. Segundo Rendeiro e Nogueira (2008), o Brasil ainda não possui normas específicas para análise de biomassa vegetal. Para este trabalho foi adotada as normas para o carvão vegetal.

**a) Teor de umidade (TU):** Segundo Rendeiro e Nogueira (2008) o teor de umidade pode ser definido como a massa de água contida na biomassa, que pode ser expressa em base úmida (bu) quanto em base seca (bs). O teor de umidade é calculado pela diferença entre as massas de uma amostra, antes e após ser submetida a secagem dentro da estufa. De acordo com Vieira (2012), a umidade presente na biomassa pode interferir em propriedade como o Poder Calorífico Inferior (PCI), pois o mesmo decresce com o aumento da umidade.

Souza et al (2012) e Farinhaque (1981) mostraram que o poder calorífico diminui com o aumento do teor de umidade, devido ao gasto de energia para o aquecimento e vaporização da água durante o processo de combustão da biomassa.

**b) Teor de Materiais Voláteis (MV):** De acordo com Cortez et al (2008), a importância dos Materiais Voláteis está durante a ignição e as etapas iniciais de combustão da biomassa e Brand (2010) define o teor de Materiais Voláteis como a facilidade com que um material queima, sendo determinado como fração em massa do combustível que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada. Segundo Brito e Barrichelo (1979), os materiais voláteis representam de 50 a 60% do calor aproveitável da queima da madeira. Assim como os demais autores, Smith (1976) relata que aqueles combustíveis os quais apresentam altos teores de substâncias voláteis são mais fáceis e rapidamente queimados.

**c) Teor de Cinzas (CZ):** Ciampi (1992) o define como o teste inicial para a viabilidade econômica e o potencial uso da biomassa como combustível. Para Rendeiro (2008), as cinzas são os produtos inorgânicos oxidados resultantes da combustão dos componentes orgânicos. O teor de cinzas de uma biomassa afeta tanto a manipulação e os custos de processamento da conversão global de energia da biomassa. A energia do combustível é reduzida em proporção à magnitude do teor de cinzas (McKENDRY, 2002).

**d) Teor de Carbono Fixo (CF):** a obtenção dos valores de carbono fixo ocorre de maneira indireta, pois seu resultado é a subtração (do total de 100%) da soma dos teores de cinzas e materiais voláteis. Segundo Morais (2007), o carbono fixo, no que diz respeito à biomassa como combustível, é o componente mais importante e o principal contribuinte na produção de energia durante a combustão. O autor também ressalta que o teor de carbono contido na madeira é maior que em resíduos de culturas agrícolas, como o caso do bagaço de cana.

Vale (2000) ressalta que combustíveis com alto teor de carbono fixo possuem queima mais lenta e, conseqüentemente, maior tempo de consumo dentro das câmaras de combustão, sendo mais vantajosos que combustíveis com queima rápida

### 2.3.2. *Análise Elementar*

Os ensaios para a determinação da análise elementar foram realizados segundo a norma ASTM D 5373/1993.

Vieira (2012) relata que a análise elementar é um ensaio empregado na determinação da composição química e, conseqüentemente, o poder calorífico superior (PCS) dos combustíveis, e fornecendo também os percentuais em massa de cada um dos elementos constituintes, como carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S) contidos nas amostras de biomassa.

Além dos itens citados acima, Rendeiro (2008) nos mostra que a análise elementar também fornece a razão entre o total de átomos de hidrogênio/carbono (H/C) e entre oxigênio/carbono (O/C). e a razão ar/combustível para a previsão da composição dos gases de saída no processo de combustão. Brand (2010) complementa que, à partir da composição química elementar, é possível calcular o potencial energético do combustível. E alguns autores consideram esse parâmetro a característica térmica mais importante do combustível.

Com o percentual de hidrogênio encontrado, é permitido o cálculo do valor de poder calorífico inferior (PCI), conhecendo-se também o valor de poder calorífico superior (PCS) e, conseqüentemente, o valor de poder calorífico útil (PCU) da biomassa.

O conhecimento da composição química do combustível permite quantificar a relação ar-combustível e prever a composição dos gases na saída do processo de combustão ou gaseificação (RENDEIRO, 2008; FONSECA e FELIX, 2003).

Para resíduos agrícolas, a composição química elementar pode variar devido à influência das cinzas que se formam, uma vez que esse tipo de biomassa possui maiores teores de hemiceluloses em sua constituição, segundo Macedo (2012).

### 2.3.3. *Poder Calorífico*

Segundo Pessoa Filho (2013), o poder calorífico, sem dúvida alguma, é a propriedade mais importante na avaliação energética de um combustível, pois fornece a quantidade de energia bruta (PCS) do mesmo.

Em sua formação, o poder calorífico pode ser desmembrado em dois outros valores, o poder calorífico superior e o inferior. O poder calorífico superior (PCS) nada mais é que a quantidade de calor total (energia térmica) liberado durante a combustão completa de uma unidade de massa seca (0%) ou de volume de combustível, sendo que a água gerada é

proveniente da combustão do hidrogênio, onde o resultado é expresso em kcal/kg ou kJ/kg (BRAND, 2010; CIAMPI, 1992). No entanto, o poder calorífico inferior (PCI) é definido como a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível, subtraindo-se os gastos com a evaporação da água. (CIAMPI, 1992).

O valor de PCS foi obtido experimentalmente através da análise da biomassa utilizando, como equipamento, uma bomba calorimétrica. Tal equipamento é destinado a medir variações energéticas onde ocorre alterações de temperatura e/ou transferências de calor para o ambiente. Um calorímetro comum, contudo, pode ser dividido em duas partes: o vaso calorimétrico (local onde o processo de combustão ocorre) e o ambiente ou vizinhança. Embora, existam vários critérios para a classificação de uma bomba calorimétrica, a classificação mais geral leva em conta as trocas de calor entre o vaso calorimétrico e o ambiente, assim, conduz a três tipos principais de calorímetros: adiabático, isoperibólico e o de condução de calor. (PESSOA FILHO, 2013).

Ainda segundo Pessoa Filho (2013), no calorímetro adiabático não há troca de calor entre o vaso calorimétrico e o ambiente e equipamentos utilizados para determinação de calores específicos em temperaturas bem diferentes da temperatura ambiente. Em um calorímetro de condução de calor, o calor é transferido do vaso calorimétrico para o ambiente, funcionando como reservatório de calor, utilizados principalmente, como microcalorímetros para processos lentos, geralmente em sistemas bioquímicos. Já o calorímetro isoperibólico, encontra-se entre os outros dois tipos de calorímetro, o vaso calorimétrico não está totalmente isolado termicamente do ambiente, de modo que um pequeno fluxo de calor ocorre entre ambos.

O processo de determinação do PCS não pode ser comparado a um processo real de combustão onde a água permanece no estado de vapor e é liberada junto com os gases de combustão. Na prática adota-se o PCI, pois ele fornece uma ideia mais exata da quantidade de energia na forma de calor liberado pelo combustível. Como não existe um equipamento que determine o PCI ele pode ser calculado a partir do PCS. O PCI é obtido deduzindo do PCS a quantidade de energia em forma de calor necessária para vaporizar a água presente na amostra, mais a água formada da combustão do hidrogênio contido na amostra (PESSOA FILHO, 2013).

Segundo Rendeiro e Nogueira (2008) e Pessoa Filho (2013), num combustível seco ou isento de umidade, subtraindo-se do PCS a energia necessária para evaporação da água resultante da combustão do hidrogênio presente na estrutura do combustível, é obtido o PCI em base seca, de acordo com a Eq. 1.

$$PCI_{BS} = PCS_{BS} - h_v \cdot m \quad (1)$$

em que  $PCI_{BS}$  é o poder calorífico inferior em base seca [kcal/kg],  $PCS_{BS}$  é o poder calorífico superior em base seca [kcal/kg],  $h_v$  é a entalpia de vaporização da água a 20°C [kcal/kg] e  $m$  é a porcentagem de massa de vapor de água presente nos gases de combustão [%].



Analisando a Eq. 2 pode-se observar que a massa de água formada é 9 vezes a massa de hidrogênio inicial. Sendo assim, usando um combustível seco, obtém-se  $m = 9H$ . Em que H é a porcentagem em massa de hidrogênio existente no combustível. Agora, substituindo-se o valor de  $m$  na Eq. 1, temos:

$$PCI_{BS} = PCS_{BS} - h_v \cdot \left( \frac{9H}{100} \right) \quad (3)$$

A Eq. 3 foi aplicada apenas a biomassa em base seca, ou seja, com 0% de teor de umidade. Porém, no cálculo do PCI para um combustível úmido (PCI em base úmida), chamado também de poder calorífico útil (PCU), foi necessário a subtração da energia gasta no processo de evaporação da água

$$PCI_{BU} = PCU = PCI_{BS} \cdot \left( 1 - \frac{TU}{100} \right) - h_v \cdot \left( \frac{TU}{100} \right) \quad (4)$$

em que  $PCI_{BU}$  é o poder calorífico em base úmida [kcal/kg],  $PCU$  é o poder calorífico útil [kcal/kg] e  $TU$  é a porcentagem em massa de umidade na biomassa [%]

#### 2.3.4. Densidade Energética

A densidade energética é a quantidade de energia por unidade de volume de biomassa (PINHEIRO et. al. 2005).

Para o cálculo da densidade energética, Pessoa Filho (2013), assim como Protássio (2011) utilizaram o valor do poder calorífico superior. Já Pinheiro (2005), em seus trabalhos, fez uso do poder calorífico inferior para o cálculo do mesmo parâmetro. Tal parâmetro é

calculado multiplicando o valor de densidade à granel juntamente com o valor do poder calorífico superior, segundo a norma ABNT NBR 6922/1981.

$$DE_n = PCS_{BS} \cdot D_{gra} \quad (5)$$

onde  $DE_n$  é o valor da densidade energética em [kcal/kg] e  $D_{gra}$  é a densidade à granel em [kcal/m<sup>3</sup>].

Assim como a densidade energética, o valor de densidade à granel é calculado também segundo a norma ABNT NBR 6922/1981, de acordo com a Eq. 6.

$$D_{gra} = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (6)$$

onde  $m_2$  é a massa da caixa cheia de amostra em [kg],  $m_1$  é a massa da caixa vazia em [kg] e  $V$  é o volume da caixa em [m<sup>3</sup>].

#### 2.4. Tipos de Tratamentos da Biomassa

A indústria de matéria-prima de base florestal e agroindustrial, dentre elas a sucroalcooleira, papel, celulose e madeireira, são caracterizadas pela grande geração de resíduos ao longo do processo de produção e pelo beneficiamento da madeira. (VILAS BOAS, 2011; PINHEIRO et. al, 2005). Ainda segundo o Vilas Boas (2011), em 2005, no Brasil, foram produzidos 14 milhões de toneladas de descartes de biomassa.

Fonseca e Felix (2003) relata que grande parte da lenha consumida é oriunda de florestas plantadas, porém seu aproveitamento ainda está abaixo do ideal, pois grande parte dos resíduos florestais são desperdiçados durante o transporte, e a biomassa que chega apresenta alto teor de umidade e nenhum padrão energético, originando perdas econômicas para o produtor quanto para o consumidor.

A biomassa, em sua forma natural, normalmente não pode ser utilizada diretamente, tanto em processos de combustão como em processos de gasificação, devido a algumas características limitantes, tais como: a baixa densidade, elevado teor de umidade, baixo poder calorífico, elevado teor de materiais voláteis e baixo teor de carbono fixo, ou seja, uma considerável heterogeneidade, necessitando de tratamentos termomecânicos prévios. Dentre os processamentos disponíveis há a secagem, a torrefação, briquetagem e peletização. (RENDEIRO, 2008; VILAS BOAS, 2011, PINHEIRO et.al, 2005). A seguir são apresentados alguns processos para o tratamento e melhoramento das características energéticas da biomassa.

#### 2.4.1. Secagem

Segundo Pessoa Filho (2013) este tratamento térmico consiste na remoção de toda água contida na biomassa ou na redução da umidade, considerada uma impureza, e como consequência, o aumento no poder calorífico do combustível. Neste processo, o calor é transferido do ar para a biomassa por diferença de temperatura, sendo que o calor é utilizado para vaporizar a água. (RENDEIRO, 2008).

De acordo com Lippel (2012), o processo de secagem da biomassa (bagaço de cana-de-açúcar, madeira, cavacos, serragem e outros tipos) é tido como um estágio preliminar para peletização, briquetagem ou gaseificação, sendo que o teor de umidade é reduzida para 10 à 15%. Uma das vantagens desse processo é a redução no custo de transporte e da estocagem, e criando condições favoráveis para a queima direta ou uma briquetagem com excelente qualidade. Outra vantagem é a garantia na redução de emissões gasosas durante a combustão, além de também reduzir a quantidade de biomassa gasta na queima.

#### 2.4.2. Torrefação

Segundo Oliveira (2013), a torrefação é um tratamento térmico suave, onde a biomassa perde elasticidade e propriedades fibrosas. Neste tipo de tratamento a biomassa produz um combustível com melhores características energéticas, sendo que tal tratamento é realizado sob atmosfera reduzida, caracterizada pela ausência parcial ou completa de agentes oxidantes, como oxigênio.

Já Rendeiro (2008) define a torrefação como um processo de pré-carbonização, o qual se desenvolve na fase endotérmica da pirólise, entre 200 e 300°C. Nestas condições a hemicelulose é degradada, sendo removida a umidade, o ácido acético, frações de fenol e outros componentes de baixo poder calorífico, resultando em um produto intermediário entre a biomassa padrão e o carvão.

No entanto, Felfi (2003) explica que o objetivo fundamental da torrefação é a concentração da energia da biomassa em um produto formado em curto tempo e a baixas temperaturas de aquecimento, permitindo a retenção dos materiais voláteis de maior poder calorífico no mesmo material. Este processo garante a manutenção, em média de 90% do poder energético e 70% das massas iniciais. (RODRIGUES, 2009).

Rendeiro e Nogueira (2008) e Oliveira (2013) mostram que as propriedades físicas da biomassa torrada variam com o aumento da temperatura, pois ao aumentar, a biomassa torna-se menos higroscópica, devido a transformações de caráter físico-químicas, em que a reabsorção da umidade é praticamente nula, podendo assim a biomassa ser armazenada a céu aberto, por longos períodos, absorvendo o mínimo de água. Combinando estes dois

efeitos (tempo de permanência e temperatura) pode-se obter produtos com diferentes propriedades físicas, onde a densidade energética e os teores de carbono fixo aumentam.

No processo da torrefação, o rendimento em massa ou gravimétrico, está em torno de 60 e 80%, de acordo com as condições de tempo de permanência e temperatura do processo. (FONSECA e FELIX, 2003).

Durante o processo de torrefação, a biomassa perde oxigênio e hidrogênio, em quantidade relativamente superior ao carbono. A destruição dos grupos hidroxila (OH) na biomassa por meio das reações de desidratação provoca a perda da capacidade de formar ligações de hidrogênio com a água, tornando assim, o produto mais hidrofóbico e, conseqüentemente, mais resistente a ataques de organismos xilófagos (bactérias e fungos). (OLIVEIRA, 2013).

Ainda segundo Oliveira (2013) a torrefação ocorre em 5 fases importantes. A primeira fase consiste no aquecimento inicial, onde a biomassa é aquecida até o estágio da secagem, com temperatura em torno de 130°C, com o teor de umidade reduzindo de 50 para 15%. Na segunda fase, chamada de aquecimento intermediário, a temperatura da biomassa é aumentada, gradativamente, até 200°C, onde a água ligada fisicamente é liberada. Nesta fase ocorre uma leve degradação da biomassa e alguma perda de massa. É nesta terceira fase que ocorre realmente o processo de torrefação. O processo tem início com a temperatura a 200°C, e a faixa de torrefação é definida entre 200 e 280°C, variando de acordo com a biomassa utilizada. Durante este período, também ocorre perda de massa, destruição total da hemicelulose e alterações significativas nas estruturas químicas da lignina. A quarta fase envolve a destruição da celulose, ocorrendo entre 330 e 370°C. E, a quinta e última etapa ocorre a temperaturas acima de 350°C, quando o carvão vegetal é produzido, em que acontece intensa degradação da biomassa.

De forma global, a degradação térmica da biomassa é endotérmica até o fim da torrefação e conforme o tempo de residência e temperatura o processo passa a ser exotérmico. Em cada uma das etapas de degradação há a formação de subprodutos conforme demonstrado na Tabela 2.4 (RODRIGUES, 2009).

Tabela 2.4: Fases da degradação térmica da biomassa e formação de subprodutos (Fonte: RODRIGUES, 2009).

FASE	TEMPERATURA (°C)	PRODUTOS
I (endotérmica)	Até 200	Água (Secagem)
II (endotérmica)	200 a 270-280	Água e ácido acético
III (exotérmica)	280 a 350-380	Carvão, ácido acético, metanol e alcatrão leve.
IV (exotérmica)	380 a 500	Carvão e alcatrão
V (exotérmica)	Acima de 500	Degradação do carvão

Os métodos experimentais utilizados por Rodrigues (2009) com a madeira de *Eucalyptus grandis*, demonstraram que a torrefação é um tratamento térmico muito eficaz. Os experimentos foram realizados nas temperaturas de 220, 250 e 280°C. As massas utilizadas foram de 54 gramas e passaram por um aquecimento até a temperatura final pré-estabelecida, permanecendo por 60 minutos. Para a biomassa torrefeita foram analisadas a densidade energética, poder calorífico, densidade aparente e análise imediata. Foi verificado que na temperatura de 250°C não houve alterações significativas nas propriedades supracitadas. Em comparação a biomassa padrão, algumas propriedades como densidade energética, rendimento gravimétrico e poder calorífico aumentaram. Já na temperatura de 280°C, a biomassa torrefeita apresentou mudanças mais significativas dos parâmetros no qual o poder calorífico aumentou 15,74%. Porém o autor diz que na temperatura de 250°C, houve a produção do combustível com melhores propriedades energéticas, num menor tempo e menor gasto energético no processo.

Pessoa Filho (2013), em seu trabalho com capim *brachiaria*, realizou experimentos de torrefação semelhantes, onde as temperaturas foram de 180, 200, 220 e 240°C e os tempos de permanência da biomassa dentro do forno de 10, 20, 30 e 40 min. Após o término do tratamento térmico, as amostras foram submetidas à análise imediata e aos testes de poder calorífico superior. Pessoa Filho (2013) verificou que com o aumento da temperatura e do tempo de permanência da biomassa dentro do forno, o rendimento gravimétrico variou de 100 a 97,58% para 180°C, conforme os tempos de 10 a 40 minutos, respectivamente. Para a temperatura de 200°C, os rendimentos variaram de 100% a 91,06%. E para as temperaturas de 220 e 240°C, com rendimentos gravimétricos mais significativos, as variações foram de 100% a 84,52% e de 99,78% a 72,62%, respectivamente. Os briquetes de capim *brachiaria* torrefeitos apresentaram características impressionantes para aplicações energéticas, enfatizando os altos rendimentos energéticos, o caráter hidrofóbico e um aumento no poder calorífico do produto final.

### 2.4.3. Carbonização

O uso da floresta e da madeira pelo homem é extremamente antigo, havendo indícios de uso por homínidos com aproximadamente 400 mil anos, sendo até hoje a única fonte de energia em abundância disponível para vários povos. (FIGUEIREDO, 2009).

De acordo com Figueiredo (2009), a madeira como matéria prima é, em grande parte, responsável pela evolução da espécie humana. Das florestas, o homem retira madeira para a produção de implementos e ferramentas agrícolas, armas, casas, templos, móveis, pontes, meios de transporte de pessoas e mercadorias.

A ação do calor sobre a madeira, que é um material predominantemente orgânico, implica na sua total degradação. Como consequência, há o surgimento de uma pequena fração residual que é chamada de cinzas, e que corresponde aos elementos minerais minoritários originalmente presentes na madeira. Este fenômeno, que produz o carvão vegetal, é chamado de pirólise ou termodegradação da madeira. (BRITO, 1990).

Segundo Figueiredo (2009) e Lima (2009), o carvão vegetal é provavelmente um dos mais antigos materiais produzidos pelo homem, com indicações de seu uso datando de aproximadamente 38 mil anos, e com finalidades, tais como no aquecimento e preparo de alimentos, produção de diferentes tipos de metais, entre outros. Com grande aplicação tecnológica para o homem, o carvão, hoje em dia, é utilizado amplamente na indústria química e farmacêutica.

De acordo com Pimenta (2002), o carvão vegetal é um material sólido, poroso, de fácil combustão e capaz de gerar grandes quantidades de calor. É produzido por processo artificial, pela destilação seca da madeira formando carvão vegetal.

O carvão vegetal é produzido à partir da pirólise ou queima incompleta da madeira, material predominantemente orgânico, em um ambiente onde a temperatura e a atmosfera (entrada de ar) são devidamente controladas, para que haja a remoção da maior parte dos componentes voláteis e aumento da concentração de carbono no carvão vegetal produzido. Este processo também é chamado de destilação da madeira ou carbonização. (GALDINO et al, 2010).

O processo de carbonização ideal da madeira tem como produtos finais o carvão, gases condensáveis e não condensáveis (GNC), conforme apresentado na Figura 5. No entanto, na grande maioria dos ciclos de produção reais há ainda a formação de tiço, ou seja, madeira carbonizada que não se transformou em carvão.

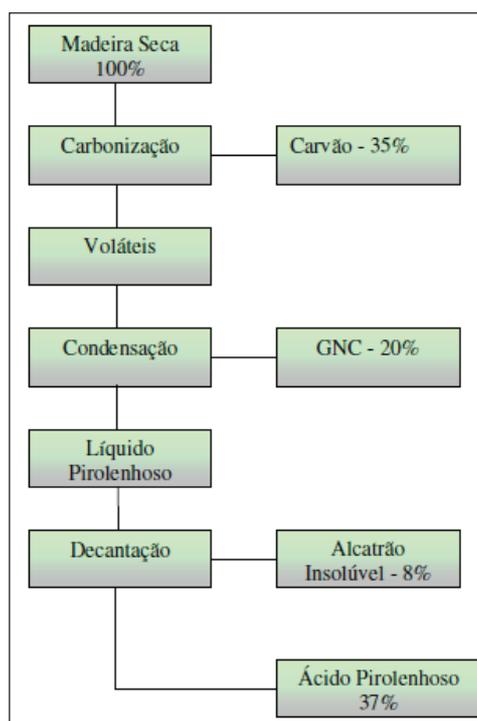


Figura 2.5: Fluxograma do Processo de Carbonização da Madeira (Fonte: Silva, 2009).

Pimenta (2002) explica que a carbonização da madeira pode ser definida como o processo cujo objetivo é aumentar o teor de carbono fixo por meio de tratamento térmico. É necessário a ocorrência de vários processos, tanto físicos quanto químicos. Durante o processo, o carvão vegetal é apenas um dos produtos que podem ser obtidos. Caso sejam utilizados sistemas apropriados para coleta, são aproveitados os gases condensados pirolenhosos (líquido pirolenhoso) e os gases não condensáveis ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{C}_2\text{H}_6$ ).

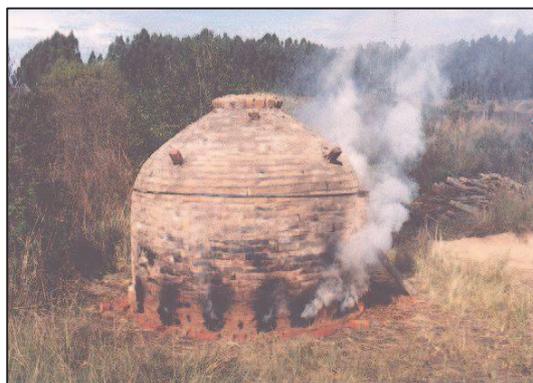
Figueroa (2009) mostra que a degradação térmica da biomassa ocorre em intervalos de temperatura, sendo que até  $200^\circ\text{C}$  ocorre o processo chamado de pirólise lenta, liberando vapor d'água e gases, onde ocorrem reações exotérmicas de oxidação e mudança na coloração da madeira. Em temperaturas entre  $200$  e  $280^\circ\text{C}$  há o aumento das reações químicas e eliminação de gases, reações exotérmicas, ainda sem ignição da madeira. Esta fase é chamada de pirólise rápida. E, para finalizar, entre  $280$  e  $380^\circ\text{C}$ , é a faixa de temperatura caracterizada por enormes quantidades de materiais destilados (ácido acético e metanol) e a produção do carvão vegetal propriamente dito.

Os sistemas de fabricação de carvão vegetal utilizados são, na maioria dos casos, bastante rudimentares. A maior parte do carvão vegetal produzido no Brasil é proveniente de fornos de alvenaria, onde não há controle da temperatura de carbonização nem a recuperação dos produtos voláteis lançados na atmosfera. (BARCELLOS, 2002). Para a produção do carvão vegetal existem diversos tipos de fornos, sendo alguns extremamente simples (fornos de rabo quente e os de encosta), outros tipos, já mecanizados (fornos

retangulares). Existem outros ainda mais desenvolvidos, como os fornos metálicos, onde os gases não condensáveis oriundos da carbonização são reutilizados como combustíveis no processo de secagem da madeira, antes do processo de carbonização.



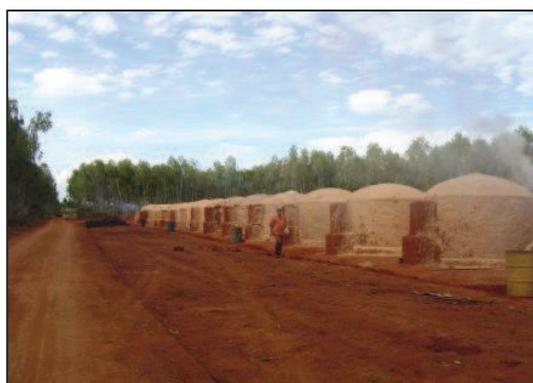
a) Forno tipo Rabo quente



b) Forno tipo Colmeia



c) Forno de Encosta



d) Forno tipo Mineirinho



e) Forno RAC 220



f) Forno Container

Figura 2.6: Diferentes modelos de fornos usados na produção de carvão (Fonte: Galdino et al (2010), Brito (1990) e DPC Biomassa (2012)).

Segundo Galdino et al (2010), o rendimento gravimétrico na produção de carvão nos fornos rabo quente não passam de 30%. Já nos fornos tipo colmeia e encosta, segundo

Brito (1990) e Galdino (2010), o rendimento gravimétrico fica em torno de 25 a 35% e, para os fornos tipo mineirinho, a faixa de rendimento gravimétrico já aumenta para 30 a 35%.

O rendimento gravimétrico médio dos fornos atuais, ou seja, relação entre a massa de carvão vegetal produzido e massa de madeira enfiada (ambos em base seca), é de aproximadamente 30%. No entanto, estudos científicos de Oliveira (2009), Barcellos (2002), Santos (2007), Figueiredo (2009) e Rezende (2007) mostram que é possível aprimorar o processo de produção de forma a alcançar rendimentos gravimétricos superiores a 40%. Basicamente, o baixo rendimento gravimétrico está relacionando ao baixo nível tecnológico utilizada neste setor. A Fig. 2.6 exemplifica o tipo de tecnologia usada no setor.

## 2.5. Objetivos e contribuição científica deste trabalho

Este trabalho tem como objetivo a definição do potencial energético (poder calorífico, teor de umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo) e melhoria das características energéticas do bagaço de cana-de-açúcar reaproveitado, como combustível, oriundo do processo produtivo para obtenção do açúcar e álcool de uma grande usina sucroalcooleira do interior do estado de Goiás

Todos os experimentos foram realizados no Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM), na Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da UFU. Entre esses experimentos estão a análise imediata, usado para a caracterização energética do bagaço de cana de açúcar padrão e o processo de torrefação como processo adicional para a valorização energética do combustível.

Todos os experimentos serão norteados através das normas ABNT e relacionadas ao tema deste trabalho. Estas normas estão apresentadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Normas nacionais utilizadas nos experimentos do presente trabalho.

<b>Teor de Umidade</b>	<b>Teor de Materiais Voláteis</b>	<b>Teor de Cinzas</b>	<b>Teor de Carbono Fixo</b>	<b>Poder Calorífico</b>
NBR 8112/1986	NBR 8112/1986	NBR 8112/1986	NBR 8112/1986	NBR 8633/1984

Como não há normas específicas para a variedade de biomassa em estudo, a metodologia adotada neste trabalho foi realizada de acordo com as normas nacionais citadas na Tab. 4 que são as desenvolvidas para a análise do carvão vegetal.

A contribuição científica deste trabalho está na análise do potencial energético do bagaço de cana-de-açúcar e quanto o processo de torrefação agregará de melhoria às propriedades energéticas já existentes, contribuindo também para o aumento das características hidrofóbicas e uniformização do poder calorífico. Caso o processo de torrefação seja bem sucedido, haverá a possibilidade da venda interna e externa da biomassa excedente do processo produtivo, garantindo assim um produto padronizado e de qualidade.

Vale salientar que o produto padrão ainda não possui boa aceitação por parte das empresas de forma geral. Então, por meio deste trabalho, é esperado que se encontre a melhor relação temperatura x tempo de torrefação que torne a biomassa torrificada um produto competitivo comercial e energeticamente, frente a madeira de eucalipto que é a biomassa mais aceita no comércio.

## CAPÍTULO III

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

#### 3.1. Introdução

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Como não há normas específicas para cana-de-açúcar, os experimentos foram realizados segundo as normas: ABNT NBR 8633/1984, NBR 8112/1986, NBR 6923/1981 e NBR 6922/1981 (SOUZA et al, 2012; RODRIGUES, 2009; VILAS BOAS, 2011; RENDEIRO et al, 2008; PINCELLI, 2011).

#### 3.2. O bagaço da cana-de-açúcar

As amostras de bagaço de cana-de-açúcar utilizadas neste trabalho foram fornecidas por uma usina sucroalcooleira do estado de Goiás.

Na safra de 2013/2014, a empresa colheu 1982 toneladas de cana-de-açúcar, num total de 31,63 hectares plantados, e produzindo em média 101 litros de álcool/tonelada de cana.

Após a moagem, o bagaço é estocado a céu aberto e utilizado diretamente como combustível na alimentação das caldeiras. Com o passar do tempo, a biomassa começa a fermentar, a produzir gases, que ficam acumulados no interior das pilhas, e a secar o que aumenta o risco de incêndios quando esses gases chegam a atmosfera.

### 3.3. Preparação das Amostras

As amostragens, de acordo com a norma ABNT NBR 6923/1981, foram realizadas na empresa, de maneira aleatória nas pilhas de bagaço de cana, e posteriormente transportadas para o Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Universidade Federal de Uberlândia (LTCM/FEMEC/UFU).

Para a padronização granulométrica das amostras, foram usadas peneiras com os diâmetros de 1,41 mm, 0,210 mm e 0,150 mm, conforme Fig. 3.1a. Em seguida, as amostras já padronizadas, foram guardadas em sacos plásticos (Fig. 3.1b).



a) Padronização das amostras



b) Armazenamento das amostras

Figura 3 1:Padronização e armazenamento das amostras.

Inicialmente para a caracterização do bagaço de cana-de-açúcar padrão, foram realizados os experimentos para Análise Elementar (C, H, N, S e O) e Análise Imediata (Determinação dos Teores de Umidade, Materiais Voláteis, Cinzas e Carbono Fixo), segundo a norma ABNT NBR 8112/1986. E, em seguida foi realizada a análise de Poder Calorífico Superior (PCS).

Os experimentos consistiram na análise térmica e energética da biomassa, realizada por meio de torrefação e análise de combustão.

### 3.4. Análise Elementar

A análise elementar de qualquer combustível (biomassa ou fóssil) é caracterizada através dos principais elementos químicos que participam de sua composição, sendo eles C, H, O, N e S. Para a realização dessa análise foi seguido a metodologia padronizada segundo a norma ASTM D 5373/2008.

Segundo Rendeiro e Nogueira *et al.* (2008), este ensaio é realizado para que se tenha conhecimento da composição química da biomassa vegetal.

A partir da análise elementar pode-se obter a razão entre a quantidade de átomos de hidrogênio/carbono e oxigênio/carbono. Com essas relações é possível fazer os cálculos de Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior, pois há uma correlação entre o PCS e as razões de H/C e O/C. E ainda, conhecendo-se a relação H/C é possível calcular o PCI (RENDEIRO e NOGUEIRA, 2008).

Para a realização desta análise, foram utilizados os seguintes equipamentos e instrumentos de medida.

- Balança analítica Marconi (precisão de 0,001g)
- Analisador Elementar CHNS/O 2400 series II Precisely (marca: Perkin Elmer).

Com a utilização de uma balança analítica foi medida a massa da amostra de bagaço de cana com 0% de umidade, previamente seca em estufa a 105°C e, em seguida a biomassa foi colocada no Analisador Elementar. A massa utilizada foi de 1,950 mg. A Figura 3.2 mostra o equipamento utilizado.



Figura 3.2: Analisador Elementar de CHNS/O

### 3.5. Análise Imediata

A análise imediata é caracterizada pela determinação dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo do bagaço de cana-de-açúcar, segundo a norma ABNT NBR 8112/1986.

Para a realização destas análises, foram utilizados os seguintes equipamentos e instrumentos de medida:

- Peneiras com malhas de 1,41; 0,210 e 0,150mm.
- Balança semi-analítica com capacidade para 1,0 kg e precisão de 1%; (Adventurer);
- Balança analítica com capacidade de 200g e precisão de 0,1mg; (Marconi);
- Cadinhos com tampa com capacidade de 25 cm<sup>2</sup>; (chiaroti)
- Estufa com circulação forçada de ar capaz de atingir 110°C; (Marconi);
- Forno Mufla para até 1000°C;
- Dessecador.

A Figura 3.3 apresenta os equipamentos que foram utilizados para a realização dos ensaios de Análise Imediata. Todos os equipamentos estão instalados no Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM) e foram adquiridos mediante projetos de pesquisa em parceria com órgãos de fomento: CNPq e FAPEMIG.



a) Balança Analítica



b) Balança semi-analítica



d) Mufla



e) Interior da estufa com as amostras de biomassa

Figura 3.3: Equipamentos pertencentes ao LTCM usados nas diversas análises

### 3.5.1. Determinação do Teor de Umidade em Base Úmida

Para a determinação do Teor de Umidade, primeiramente foi feita a padronização granulométrica, utilizando a biomassa retida na peneira de 0,210 mm. Em seguida, utilizando uma balança analítica, foi definida a massa do recipiente e adicionado em torno de 7 gramas de bagaço de cana. Esse procedimento foi repetido até que fosse atingido a quantidade de 5 recipientes com amostras. E por fim, todos os recipientes foram enumerados e colocados dentro da estufa de circulação de ar forçada à 105 °C.

A massa das amostras foram medidas 3 vezes ao dia e em triplicata, sendo que os recipientes eram retirados da estufa e colocados no dessecador para que resfriassem à temperatura ambiente. Esse procedimento foi repetido até que a massa das amostras permanecesse constante. A variação da massa cessou após 4 dias de secagem dentro da estufa.

Para o cálculo do teor de umidade, segundo a norma ABNT NBR 8112/1986, é utilizada a seguinte equação:

$$TU_{bu} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100 \quad (3.1)$$

em que,  $TU_{bu}$  é o teor de umidade [%],  $m_0$  é a massa inicial da amostra [g] e  $m_1$  a massa final [g].

A norma ABNT NBR 8112/1986 regulamenta que, para a determinação do teor de umidade das amostras, deve ser realizado um mínimo de duas análises e a diferença nos resultados não pode exceder a 5%

### 3.5.2. Determinação do Teor de Materiais Voláteis

Para a determinação do teor de Materiais Voláteis (MV), é utilizada a biomassa retida na peneira de 0,150mm. Em seguida, um cadinho de porcelana previamente seco em estufa de 105°C, foi colocado em balança analítica, anotado sua massa, tarado e adicionado 1,0g de biomassa. Esse procedimento foi repetido até que fosse atingido 6 conjuntos de cadinho e amostra. Um conjunto por vez foi posicionado sobre a porta da forno, previamente aquecida a 900°C, ficando assim por 3 minutos. Passado esse tempo, o cadinho foi tampado e colocado no interior da mufla, permanecendo dentro por mais 7 minutos com a porta fechada. A amostra foi retirada da mufla e colocada no dessecador até atingir a temperatura ambiente. E, por fim, foi medido a massa final do cadinho na balança analítica. O mesmo procedimento descrito foi repetido para todas as 6 amostras.

Para o cálculo do teor de materiais voláteis, segundo a norma ABNT NBR 8112/1986, é utilizado a seguinte equação:

$$MV = \frac{m_1 - m_2}{m} \cdot 100 \quad (3.2)$$

onde,  $MV$  é o teor de matérias voláteis [%],  $m_1$  é massa inicial do cadinho somada à massa da amostra [g],  $m_2$  é massa final do cadinho somada à amostra [g] e  $m$  é massa final da amostra [g].

A norma ABNT NBR 8112/1986 regulamenta que, para a determinação do teor de materiais voláteis, deve ser realizado um mínimo de duas análises e a diferença nos resultados não pode exceder a 2%.

### 3.5.3. Determinação do Teor de Cinzas

Para a determinação do teor de Cinzas (CZ), é utilizada a biomassa retida na peneira de 0,150mm. Em seguida, um cadinho de porcelana previamente seco em estufa de 105°C, foi colocado em balança analítica, anotado sua massa, tarado e adicionado 1,0g de bagaço de cana. Esse procedimento foi repetido até que se completasse 6 conjuntos de cadinho e amostra. Todos os 6 cadinhos foram colocados no interior da mufla já aquecida a 700°C. As amostras permaneceram no interior do forno mufla até que toda biomassa fosse totalmente queimada. Os cadinhos foram retirados do interior da mufla e colocados no do dessecador para o resfriamento até a temperatura ambiente. E, para finalizar, o cadinho foi colocado na balança analítica e medida a massa final de biomassa. Esse procedimento foi repetido para todas as 6 amostras.

Para o cálculo do teor de materiais voláteis, segundo a norma ABNT NBR 8112/1986, é utilizado a seguinte equação:

$$CZ = \frac{m_0 - m_1}{m} \cdot 100 \quad (3.3)$$

onde,  $CZ$  é o teor de cinzas [%],  $m_0$  é a massa do cadinho [g],  $m_1$  é a massa do cadinho somada aos resíduos [g],  $m$  é a massa da amostra [g].

A norma ABNT NBR 8112/1986 regulamenta que, para a determinação do teor de cinzas, deve ser realizado um mínimo de duas análises e a diferença nos resultados não pode exceder a 10%

#### 3.5.4. Determinação do Teor de Carbono Fixo

De acordo com a norma ABNT NBR 8112/1986 o teor de carbono fixo é calculado de acordo com a seguinte equação e utilizando-se os dados dos procedimentos anteriores:

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad (3.4)$$

onde,  $CF$  é o teor de carbono fixo [%],  $CZ$  é o teor de cinzas [%] e  $MV$  é o teor de matérias voláteis [%].

#### 3.6. Determinação da Densidade à Granel

A densidade à granel (massa específica) é medida segundo a o método descrito na norma ABNT NBR 6922/1981. E conforme mencionado no Capítulo II, a densidade à granel é dada pela seguinte fórmula:

$$D_{gra} = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.5)$$

onde,  $D_{gra}$  é a densidade à granel [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $m_1$  é a massa da caixa vazia [kg],  $m_2$  é a massa da caixa cheia de biomassa [kg] e  $V$  é o volume interno da caixa [ $\text{m}^3$ ].

Primeiramente, um recipiente de volume conhecido foi colocado na balança semi analítica e tarada. Em seguida, com a amostra já padronizada, foi adicionado bagaço de cana-de-açúcar até completar o volume do recipiente e anotado sua massa. Esse procedimento foi realizado para as mostras com 0% e 44,3% de teor de umidade e também para a amostra torrificada em 240°C-120 minutos.

#### 3.7. Determinação do Poder Calorífico

De acordo com a literatura, o poder calorífico pode ser apresentado como:

- Poder Calorífico Superior (PCS);
- Poder Calorífico Inferior (PCI);
- Poder Calorífico Útil (PCU).

O Poder Calorífico Superior (PCS) foi determinado segundo o método descrito na norma ABNT NBR 8633/1984 em uma bomba calorimétrica isoperibólica 25°C IKA-WERNE C2000. O PCS das amostras foi determinado de acordo com o seguinte procedimento: um cadinho de metal foi colocado numa balança analítica, anotado sua massa e tarado. Em seguida, foi colocado em torno de 0,5g de bagaço de cana dentro do cadinho e o mesmo fixado no suporte, conforme mostra a Fig (3.4). Ao conjunto foi adicionado um fio de algodão

com o mesmo em contato com a amostra. E, para finalizar, o conjunto foi introduzido dentro de um copo metálico, fechado e fixado no equipamento para a realização da análise. A determinação do PCS do bagaço de cana-de-açúcar foi realizada em triplicata e, utilizado como resultado, a média dos valores. A Fig. 3.4 mostra os detalhes e componentes da bomba calorimétrica.



Figura 3.4: Bomba calorimétrica IKA-WERNE C2000

O Poder Calorífico Inferior (PCI) e o Poder Calorífico Útil (PCU) foram calculados à partir do PCS registrado no equipamento usando as seguintes fórmulas:

$$PCI_{bs} = PCS_{bs} - h_{lv} * \left( 9 * \frac{H}{100} \right) \quad (3.6)$$

$$PCU = PCI_{bu} = PCI_{bs} * \left( 1 - \frac{TU_{bu}}{100} \right) - h_{lv} * \left( \frac{TU_{bu}}{100} \right) \quad (3.7)$$

em que,  $PCI_{bs}$  é o poder calorífico inferior em base seca – combustível seco com 0% de umidade [kcal/kg],  $PCS_{bs}$  é o poder calorífico superior em base seca – combustível seco com 0% de umidade [kcal/kg],  $h_{lv}$  é a entalpia de vaporização da água a 20°C, 586,13 [kcal/kg],  $H$  é o percentual médio de hidrogênio presente no material de acordo com a análise elementar realizada [%],  $PCU$  é o poder calorífico útil também conhecido como  $PCI_{bu}$  poder calorífico inferior em base úmida – combustível com umidade [kcal/kg] e  $TU_{bu}$  é o teor de umidade em base úmida da biomassa [%].

### 3.8. Densidade Energética

A Densidade Energética foi calculada utilizando os valores de densidade à granel e Poder Calorífico Superior (PCS). Para a obtenção deste resultado foi utilizada a seguinte fórmula:

$$D_{En} = D_{gra} * PCS \quad (3.8)$$

em que,  $D_{En}$  é a densidade energética [kcal/m<sup>3</sup>],  $PCS$  é o poder calorífico superior [kcal/kg] e  $D_{gra}$  é a densidade à granel [kg/m<sup>3</sup>].

### 3.9. Influência do Teor de Umidade sobre o Poder Calorífico Superior do bagaço de cana

Após a determinação do teor de umidade do bagaço de cana-de-açúcar padrão, foram separadas seis amostras secas, de 10g cada e colocadas em seis frascos de plástico devidamente identificado. A cada amostra foi acrescentada água destilada até que se obtivesse uma massa total proporcional a 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60% de umidade. Para encontrar o valor do teor de umidade em base úmida da amostra, foi utilizado novamente a Eq. (3.1). E, por fim, as amostras foram todas fechadas hermeticamente e colocadas no interior de uma câmara de germinação permanecendo por 14 dias à 18 °C, de acordo com Lima *et al.* (2009). A Tabela. (3.1) apresenta as massas de amostra e água, bem como o teor de umidade.

Tabela 3.1: Adição de água para o teor de umidade em base úmida desejada.

Amostra	Massa de amostra Seca [g]	Água destilada Adicionada [g]	$TU_{bu}$ [%]
Padrão seca	10,001	-	0,000
1	10,004	1,162	10,406
2	10,003	2,521	20,129
3	10,006	4,296	30,037
4	10,008	6,676	40,014
5	10,008	10,034	50,064
6	10,005	15,022	60,023

Passado o período de umectação, foi determinado, para cada amostra, utilizando a bomba calorimétrica (IKA-WERNE C2000), o poder calorífico superior (PCS), o poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico útil (PCU), conforme descrito nos procedimentos

anteriores. As análises foram realizadas em triplicata para posterior tratamento estatístico dos dados. Os resultados serão apresentados no Capítulo IV.

### 3.10. Torrefação do Bagaço de Cana-de-Açúcar

Para esta etapa foram utilizados 10,02g de bagaço de cana com 0% de umidade e um cilindro metálico com tampa de massa conhecida (Fig. 3.5). Com o forno mufla previamente aquecida a uma determinada temperatura (em regime permanente), colocou-se a biomassa dentro do cilindro, que foi posteriormente fechado com a tampa e posicionado no interior da mufla. Em seguida, fechou-se a porta da mufla e iniciou-se o experimento. O cilindro com a biomassa permaneceu no interior da mufla por um período de tempo estabelecido no procedimento.

Em seguida, o forno cilíndrico foi retirado do interior do forno mufla e resfriado com ar comprimido até atingir a temperatura ambiente e colocado no interior do dessecador por 15 minutos. Passado este tempo, o conjunto (cilindro e amostra) foi pesado e os valores finais de massa foram anotados para posteriores cálculos de rendimento gravimétrico.

Com base nos artigos apresentados no item 2.3.2 do Capítulo II foram definidos os níveis de temperatura e o tempo de aquecimento para a torrefação da biomassa, conforme ilustra a Tabela 3.2

Tabela 3.2: Temperatura e tempo de aquecimento das amostras.

<b>Amostra</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Tempo de permanência no interior da mufla</b>	<b>Resfriamento do forno</b>
<b>Bagaço de cana-de-açúcar</b>	180°C		Ar comprimido
	200°C	10min; 20min; 30min e	
	220°C	40min	
	240°C		

Com o fim desta etapa, as amostras foram todas identificadas e armazenadas no interior da estufa à 105°C para a realização dos próximos experimentos.



a) Mufla com o cilíndrico metálico



b) Cilíndrico metálico com tampa

Figura 3.5: Equipamentos utilizados para torrefação

### 3.11. Rendimento Gravimétrico

Nesta etapa, o rendimento gravimétrico ou rendimento em massa foi calculado à partir dos dados retirados do experimento de torrefação, onde foi medido a perda de massa (já torrificado) em relação à quantidade de massa inicial de biomassa padrão, com 0% de teor de umidade. Os cálculos foram realizados segundo a Eq. (3.9):

$$\eta_m = \frac{M_{torr}}{M_{s,nat}} \cdot 100 \quad (3.9)$$

onde,  $\eta_m$  é o rendimento gravimétrico [%],  $M_{torr}$  é a massa torrificada [g] e  $M_{s,nat}$  é a massa seca do produto padrão [g].

### 3.12. Análise de Higroscopicidade do Bagaço de Cana-de-Açúcar

Após a torrefação do bagaço de cana-de-açúcar e cálculos de rendimento gravimétrico, foi realizada a análise de Higroscopicidade do produto final. É esperado nesta etapa encontrar o tempo e a temperatura ideal de torrefação para a obtenção de um produto com características hidrofóbicas, que consiste em um produto que reabsorva menos umidade que o produto padrão, quando submetido a tal condição.

Para o procedimento utilizou-se 1,5g de cada biomassa torrefeita. As amostras foram colocadas em um recipiente de massa conhecida e o conjunto foi introduzido no interior de uma câmara de umectação para o acondicionamento higroscópico. Os recipientes foram mantidos abertos em uma atmosfera com aproximadamente 100% de umidade e 18°C.

Durante os testes, os frascos foram retirados da câmara 3 vezes ao dia e levados até a balança analítica para a medição de suas massas. O procedimento durou 15 dias.

No final destes experimentos, foi removido o excesso de umidade no interior dos frascos e as biomassas foram conduzidas para a bomba calorimétrica para a análise de poder calorífico. Esta etapa consiste em comparar as características higroscópicas (ou hidrofóbicas) do produto torreficado àquelas obtidas com a biomassa padrão com teor de umidade de 0%.

### **3.13. Índice de Combustão**

Este experimento tem por finalidade analisar a biomassa durante a sua combustão. Segundo Pincelli (2011), quanto maior este índice, melhor a qualidade do combustível. Para este experimento, foram utilizados uma balança semi analítica, um soprador de ar, isolante térmico, álcool e um combustor.

Nos experimentos, considerou-se aproximadamente 3,5g de biomassa e aproximadamente 2,5g de etanol. A biomassa foi posicionada na parte superior do combustor e o etanol na parte inferior. O combustor se encontrava posicionado sobre a balança semi analítica. Em seguida, foi ateado fogo no etanol para dar início ao experimento. Após o etanol ser totalmente consumido, por meio do soprador injetou-se ar na parte inferior do combustor e iniciou-se o monitoramento da massa de amostra durante sua combustão. O experimento é concluído quando a biomassa é totalmente consumida, anotando-se os valores de massa mostrados na balança, a cada 5 segundos.

Definidos os procedimentos experimentais adotados neste trabalho, apresentam-se no Capítulo 4 os resultados obtidos.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados todos os resultados obtidos dos diversos experimentos realizados com o bagaço de cana-de-açúcar padrão e torreficados. O objetivo deste trabalho foi definir o potencial energético do bagaço de cana-de-açúcar e sua viabilização para a torrefação. Segue abaixo os resultados dos experimentos.

#### 4.1. Caracterização do produto padrão

Para a caracterização inicial do bagaço de cana padrão, primeiramente foi realizado a análise elementar, com a finalidade de se determinar a composição em massa dos constituintes da biomassa. A próxima etapa foi a realização da análise imediata, com a determinação do teor de umidade (TU), cinzas (CZ), materiais voláteis (MV) e carbono fixo (CF), prosseguindo com a determinação do poder calorífico superior, inferior e útil e finalizando com os resultados de densidade à granel e densidade energética. Os mesmos experimentos foram realizados para o produto torreficado, com exceção da análise elementar.

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados de análise elementar do bagaço de cana-de-açúcar padrão.

Tabela 4.1: Análise elementar das amostras padrão.

<b>Elemento</b>	<b>Média [%]</b>	<b>Desvio padrão [%]</b>	<b>Coefficiente de variação [%]</b>	<b>nº de repetições</b>
C	42,09	0,04	0,01	3
H	5,31	0,03	0,49	3
N	0,64	0,01	2,37	3
S	0,70	0,02	2,99	3
O	46,74	0,02	0,04	3

Foi verificado na Tabela 4.1 que não houveram variações superiores a 5%, nos valores do coeficiente de variação das análises efetuadas, sendo assim, os números de repetições foram suficientes para a caracterização do produto.

Observando a Tabela 4.2, foi verificado que os resultados obtidos para análise elementar estão em acordo com os resultados encontrados por diversos autores na literatura.

Tabela 4.2: Análise elementar de amostras padrão e comparação com os dados da literatura

<b>Elemento [%]</b>	<b>Bagaço de cana <i>sp</i> <sup>(1)</sup></b>	<b>Bagaço de cana <sup>(2)</sup></b>	<b>Casca de arroz <sup>(3)</sup></b>	<b>Serragem <sup>(4)</sup></b>
C	42,09	47,80	37,40	47,68
H	5,31	5,90	5,43	6,06
N	0,64	0,50	0,38	0,31
S	0,7	0,03	0,03	-
O	46,74	45,70	33,20	45,95

(1) Presente trabalho; (2) Horst (2013); (3) Souza (2011). (4) Resende (2003);

Analisando a Tabela 4.2, foi observado que as quantidades de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio encontrados no presente trabalho não possuem variações significativas quando comparados a outros trabalhos com diferentes tipos de biomassa. Já o teor de enxofre é 20 vezes maior que os valores dos demais trabalhos. Segundo os autores, essa diferença é devido a adubação e manejo da cultura.

Segundo McKendry (2002), a composição química da biomassa pode interferir na quantidade de calor gerado, pois, quanto maior a proporção de oxigênio e hidrogênio presentes, menor é o valor energético do combustível, isso é devido à baixa energia existente nas ligações carbono (C) – oxigênio (O) e carbono (C) – hidrogênio (H), do que em

ligações carbono (C) – carbono (C). Comparando os dados apresentados na Tabela 4.1 com os da literatura, é constatado que os resultados dos teores de hidrogênio e oxigênio pouco variaram, com exceção de Souza (2011) para os teores de oxigênio e carbono que são inferiores aos outros autores, porém as demais referências possuem maiores teores de carbono e, conseqüentemente, um maior valor energético em seu combustível.

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados referentes à análise imediata realizada nas amostras de bagaço de cana-de-açúcar padrão. Esta análise forneceu dados sobre o teor de umidade, materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo.

Tabela 4.3: Análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar padrão.

Parâmetro	Média [%]	Desvio padrão [%]	Coefficiente de variação [%]	nº de repetições
Teor de umidade: TU (%)	44,35	0,27	0,60	5
Teor de Cinzas: CZ (%)	4,55	0,16	3,42	5
Materiais Voláteis: MV (%)	79,29	0,71	0,89	5
Carbono Fixo: CF (%)	16,14	0,84	5,24	5

Observando os resultados da Tabela 4.3, foi verificado que os valores do coeficiente de variação estão dentro da faixa estipulada pela norma utilizada no experimento, representando que o número de repetições foi suficiente para a caracterização do produto.

A Tabela 4.4 apresenta uma comparação entre os valores da Tabela 4.3 com dados da literatura para diferentes tipos de biomassa utilizadas como combustível.

Tabela 4.4: Comparação dos resultados de análise imediata da amostra de bagaço de cana-de-açúcar padrão com resultados da literatura.

Parâmetro	Bagaço de cana <sup>(1)</sup>	Bagaço de cana <sup>(2)</sup>	Casca de Arroz <sup>(3)</sup>	<i>Eucalyptus grandis</i> <sup>(4)</sup>
Teor de umidade: TU (%)	44,35	9,24	9,19	10,4
Teor de Cinzas: CZ (%)	4,55	2,92	18,43	0,98
Materiais Voláteis: MV (%)	79,29	88,67	66,01	81,9
Carbono Fixo: CF (%)	16,14	8,39	15,56	16,7

(1) Presente trabalho; (2) Resende (2003); (3) Souza (2011); Pincelli (2011).

Comparando os resultados apresentados na Tabela 4.4, observa-se que a biomassa analisada neste trabalho apresentou um teor de umidade bastante significativo quando

comparado aos valores relatados pelos demais autores. Além disso, considerando o *Eucalyptus grandis* como referência – haja vista sua vasta aplicação como combustível para fornos e caldeiras - foi constatado um maior teor de cinzas para o bagaço de cana-de-açúcar e valores bastante similares no que se refere aos materiais voláteis e o teor de carbono fixo, no presente trabalho.

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados referentes ao poder calorífico das amostras de bagaço de cana padrão.

Tabela 4.5: Poder calorífico das amostras de bagaço de cana padrão.

Parâmetro	Média [%]	Desvio padrão [%]	Coefficiente de variação [%]	nº de repetições
PCS (Base seca) [kcal/kg]	4483,00	16,82	0,37	3
PCI (Base seca) [kcal/kg]	4200,76	-	-	
PCS (TU: 44,35%) [kcal/kg]	2405,95	35,00	2,09	3
PCU (TU: 44,35%) [kcal/kg]	2077,76	-	-	-

Analisando os resultados para o poder calorífico apresentados na Tabela 4.5, foi observado que para o PCS com teor de umidade de 44,35% não houve uma boa repetibilidade dos experimentos, pois os valores de desvio padrão ultrapassaram os valores estabelecidos pela norma ABNT NBR 8633/1984 que é de 28,662 [kcal/kg]. Já os valores de PCI e PCU foram calculados segundo as Eqs. 3.6 e 3.7, respectivamente.

A seguir, na Tabela 4.6, são apresentados os resultados de poder calorífico do bagaço de cana-de-açúcar do presente trabalho, comparados com resultados da literatura.

Tabela 4.6: Resultados de poder calorífico das amostras padrão comparados com dados da literatura.

Parâmetro	Bagaço de cana <sup>(1)</sup>	Bagaço de cana <sup>(2)</sup>	Casca de Arroz <sup>(3)</sup>	<i>Eucalyptus grandis</i> <sup>(4)</sup>
PCS (Base seca) [kcal/kg]	4483,00	3929	3450,71	4663
PCI (Base seca) [kcal/kg]	4200,76	3570	-	-
PCS [kcal/kg]	2405,95*	-	-	-
PCU [kcal/kg]	2077,76*	3185,97**	-	-

(1) Presente trabalho; (2) Resende (2003); (3) Souza (2011); Pincelli (2011).

\*PCS para 44,35% de teor de umidade; \*\*PCS para 9,24% de teor de umidade.

Dos resultados apresentados na Tabela 4.6, foi verificado que há uma certa diferença nos valores obtidos entre o presente trabalho e aqueles obtidos por Resende (2003) no estudo também do bagaço de cana. O resultado para o PCS é 12% maior neste trabalho devido a maior quantidade de carbono fixo. No entanto, para o poder calorífico útil os valores de Resende (2003) excedem em quase 35% este trabalho. Tal discrepância deve-se ao fato do baixo teor de umidade presente na biomassa, conforme apresentado na Tabela 4.4.

Na comparação dos valores de poder calorífico com os disponíveis na literatura, Souza (2011), na análise de casca de arroz, encontrou 3450,71 kcal/kg para os valores de poder calorífico superior. Já Pincelli (2011), obteve 4663 kcal/kg para a quantidade de energia em suas análises de resíduos de eucaliptos. Quando comparado os resultados deste trabalho com os de Pincelli (2011), para a madeira de *Eucalyptus Grandis*, é observado valores muito semelhantes entre os dois tipos de biomassa. E estes resultados tornam o bagaço de cana-de-açúcar bem competitivo frente a madeira de eucalipto que é a biomassa mais comercializada quando se fala em produção de energia.

Na Tabela 4.7, são apresentados os valores de densidade para o bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 4.7: Densidade das amostras padrão de bagaço de cana.

Parâmetro	Média [kg/m <sup>3</sup> ]	Desvio padrão[%]	Coefficiente de variação [%]	nº de repetições
D <sub>granel</sub> (TU: 0%)	84,25	0,01	0,01	5
D <sub>granel</sub> (TU: 44,35%)	88,78	0,01	0,01	5

Na Tabela 4.7 são apresentados os valores de densidade à granel, cujo resultado obtido foi de 84,25 kg/m<sup>3</sup> para a biomassa com 0% de umidade, e de 88,78 kg/m<sup>3</sup> para a biomassa com teor de 44,35% de umidade. Essa pequena diferença entre a biomassa seca e a com teor de umidade de 44,35% é devido a quantidade de água presente no bagaço de cana-de-açúcar. E os baixos resultados de densidade a granel é devido a biomassa em estudo ser extremamente leve.

Baquerotto (2010) explica que para a utilização do bagaço de cana na fabricação de briquetes, a biomassa deve possuir teor de umidade próximo a 15%. Testes realizados indicaram que bagaço com teores de umidade menores que 12%, dificultam a operação da prensa compactadora e o briquete produzido apresenta baixa resistência mecânica. Já com umidade acima de 20%, os briquetes desintegram-se logo após a compactação.

Já a densidade energética é obtida através da multiplicação da densidade à granel pelo poder calorífico superior. Neste trabalho, considerando o bagaço de cana comercial padrão, com umidade de 44,35%, a densidade energética resultou em 184,46 Mcal/m<sup>3</sup>.

A Tabela 4.8 apresenta o comparativo da densidade energética do bagaço de cana com dados da literatura

Tabela 4.8: Comparação da densidade energética do bagaço de cana padrão e dados da literatura.

Biomassa	Densidade Energética [Mcal/m <sup>3</sup> ]
Bagaço de cana <sup>(1)</sup>	184,46
Casca de arroz <sup>(2)</sup>	351,97
Capim Brachiária a granel <sup>(3)</sup>	1164,55
<i>Eucalyptus grandis</i> <sup>(4)*</sup>	902,29
Bagaço de cana <sup>(5)**</sup>	227,50

(1) Presente trabalho; (2) Souza (2011); (3) Pessoa Filho (2013); (4) Pincelli (2011); (5) Souza et al (2008). \*9,19% de umidade; \*\*50% de umidade.

De acordo com a Tabela 4.8, ao se comparar os resultados da literatura com os do presente trabalho, é observado que todos possuem valores de densidade energética superiores. Isto deve-se ao fato da grande heterogeneidade dos combustíveis estudados e também das técnicas de plantio e adubação, de acordo com Filippetto (2008). Porém, comparando-se com o trabalho de Souza et al (2008), a diferença é de apenas 18%. Destaque para o valor encontrado por Pessoa Filho (2013) em seus estudos com capim brachiária em comparação a todos os trabalhos apresentados.

#### 4.2. Influência do teor de umidade no poder calorífico do bagaço de cana-de-açúcar padrão.

O poder calorífico nada mais é que a quantidade de energia liberada por unidade de massa do combustível. Do ponto de vista energético, o teor de umidade é como uma impureza que acaba diminuindo a quantidade de energia liberada.

A Tabela 4.9 apresenta os resultados do estudo da influência do teor de umidade no poder calorífico superior do bagaço de cana-de-açúcar padrão.

Tabela 4.9: Poder calorífico superior em função do teor de umidade para o bagaço de cana padrão.

Umidade [%]	PCS				PCU [kcal/kg]
	Média [kcal/kg]	Desvio Padrão [kcal/kg]	Coefficiente de variação [%]	nº de repetições	
0,000	4483,00	16,82	0,37	3	4200,76
10,000	4119,33	25,42	0,61	3	3722,07
20,000	3937,67	39,52	1,00	3	3243,38
30,000	3374,00	43,86	1,30	3	2764,69
40,000	2903,33	68,07	2,34	3	2285,99
50,000	2141,33	55,77	2,46	3	1807,30
60,000	1637,00	35,00	2,09	3	1328,61

Analisando os resultados da Tabela 4.9, para o poder calorífico superior, nos diferentes teores de umidade, foi observado uma boa confiabilidade devido aos baixos valores de coeficiente de variação apresentados. Analisado os valores de poder calorífico superior (PCS - medido a partir de bomba calorimétrica) e útil (PCU - calculado pela Eq. 3.7), foi observado que, à medida que o teor de umidade aumenta, o poder calorífico diminui, ou seja, há uma tendência inversamente proporcional entre esses dois fatores. Tal fato é comprovado por dados da literatura, como por exemplo, em Lima et al (2008), em seus estudos verificando a influência da umidade no poder calorífico da madeira de *Eucalyptus benthamii*, concluindo que o poder calorífico é inversamente proporcional ao teor de umidade. Ainda segundo o mesmo autor, foi observado que à partir de 60% de umidade, não há combustão da madeira devido a elevada quantidade de água presente no combustível.

Na Figura 4.1 são apresentados os resultados de poder calorífico superior e poder calorífico útil, todos em função da umidade para amostras de bagaço de cana-de-açúcar.

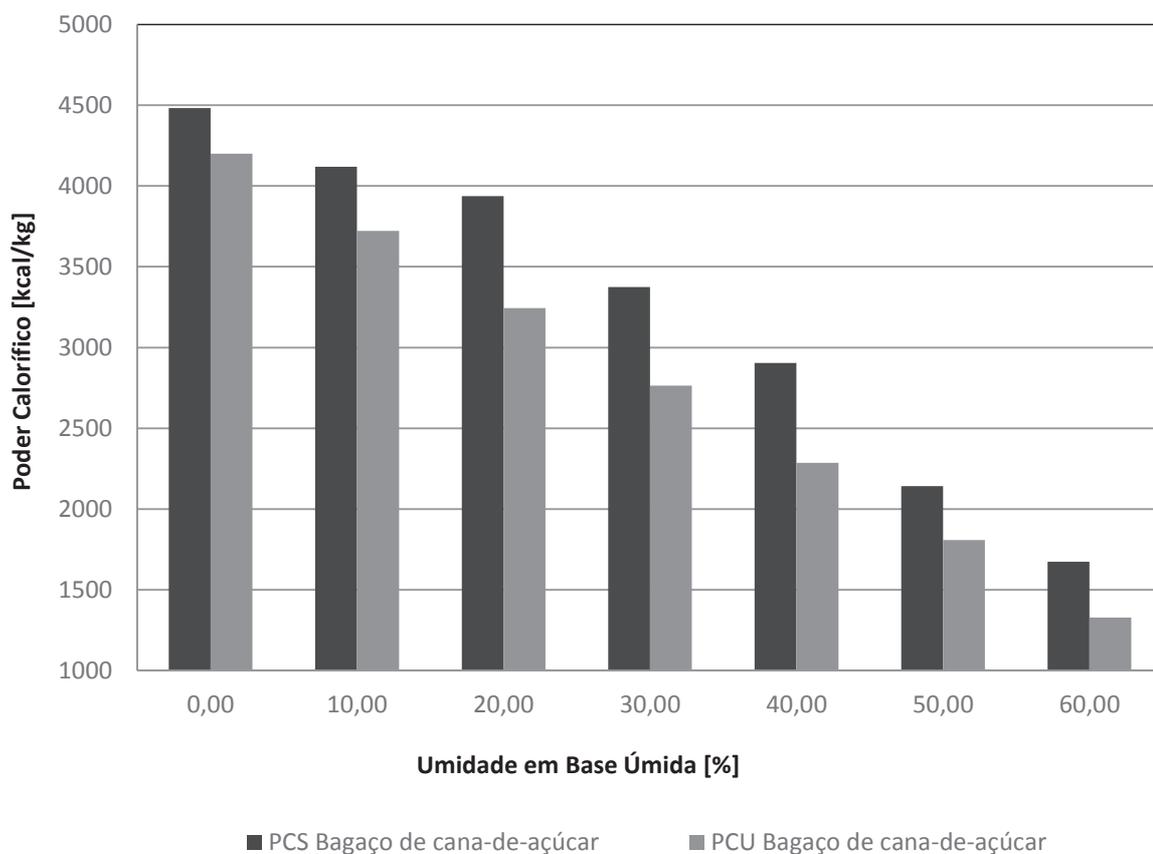
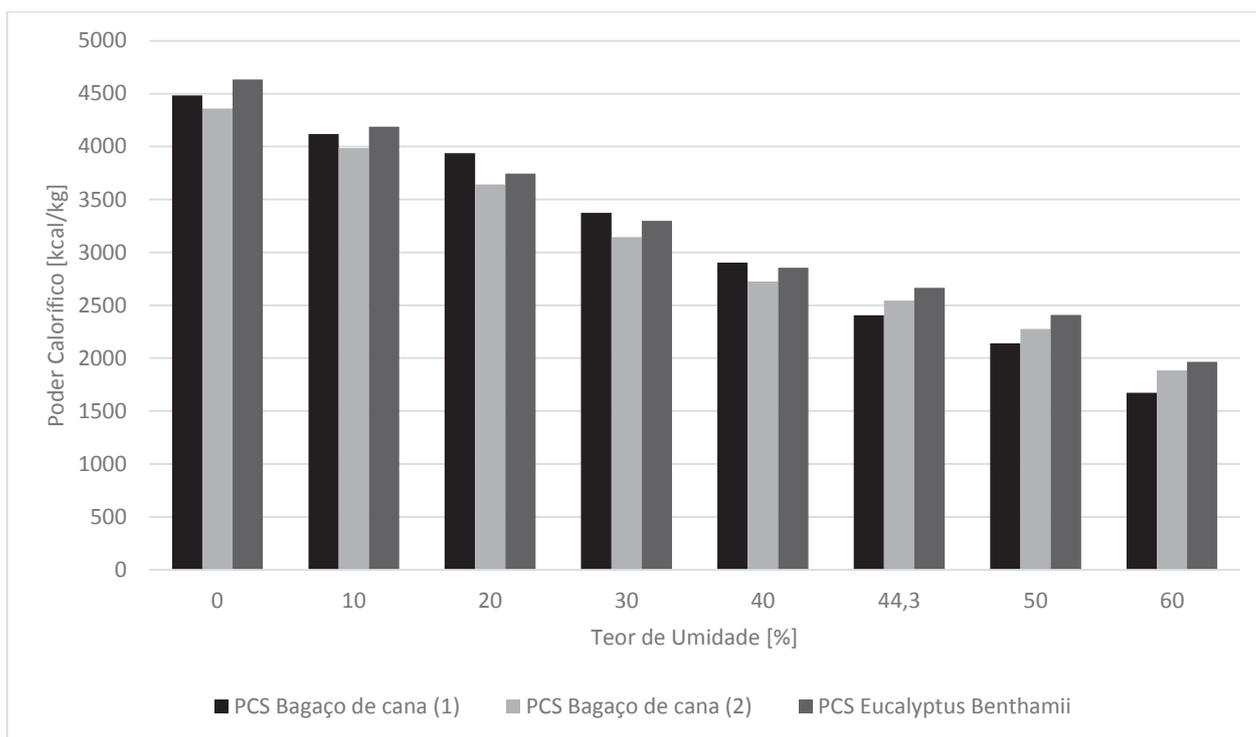


Figura 4.1 – Poder calorífico em função da umidade para amostras de bagaço de cana.

Segundo Paoliello (2006), o bagaço de cana com teor de umidade em 50% diminui a eficiência térmica das caldeiras, devido a queima irregular da biomassa.

A Figura 4.2 mostra a comparação dos poderes caloríficos superiores, em função da umidade, para o bagaço de cana (presente trabalho), capim braquiária (PESSOA FILHO, 2013) e outra amostra de bagaço de cana (SILVA et al, 2008).



(1) Presente Trabalho; (2) Silva et al (2008); (3) Lima et al (2008).

Figura 4.2 – Comparação do poder calorífico do bagaço de cana (1), bagaço de cana (2) e madeira de *Eucalyptus Benthamii*.

Analisando a Figura 4.2, é observado que a redução nos valores de poder calorífico, para os três tipos de biomassa são muito semelhantes, oscilando à partir do teor de umidade de 20%.

Segundo Silva et al (2008), ao término da extração de sacarose, o bagaço de cana sai das moendas com um teor de umidade entre 45 e 50%. A estocagem do bagaço por longos períodos de tempo pode reduzir o teor de umidade para valores inferiores à 20% na superfície das pilhas. Já no interior das pilhas a umidade pode aumentar muito. E, no entanto, em regiões de clima muito seco há o risco da biomassa entrar em combustão durante a estocagem, devido ao acúmulo de gases em seu interior e gerar grandes prejuízos para a usina.

De acordo com a Figura 4.2, há uma grande semelhança na influência que o teor de umidade exerce sobre o Poder calorífico de as ambas biomassas. Comparando a biomassa do presente trabalho (44% de umidade e PC de 2406 kcal/kg) com a madeira de eucalipto (comercializada com 40% de teor de umidade e PC de 2855 kcal/kg), o bagaço de cana deste trabalho apresenta um grande potencial de geração de energia quando comparado a

biomassa mais utilizada comercialmente, pois seu PC é apenas 18% inferior ao da madeira de eucalipto.

Conforme dados da Fig. 4.2 e considerando o bagaço de cana do presente trabalho com 44,3% de umidade, é constatado que a redução no teor de umidade agrega potencial energético significativo à biomassa. Todavia, os processos de secagem forçada são muito onerosos e o custo de energia para sua realização pode talvez inviabilizar a prática.

Uma alternativa para a redução da umidade de trabalho da biomassa, ou melhor, para um aumento de sua hidrofobia, e conseqüente aumento no poder calorífico, é o processo de torrefação.

#### **4.3 – Torrefação do bagaço de cana-de-açúcar**

Com o término da caracterização do bagaço de cana padrão e o estudo da influência negativa que a umidade tem sobre o poder calorífico do mesmo, foi realizado um tratamento térmico na biomassa. Para este trabalho foi adotado um tratamento chamado de torrefação, que consiste na valorização energética do bagaço. O tratamento térmico foi realizado conforme metodologia descrita no Cap. 3.10. Ao término do processo de torrefação, foram analisados o rendimento gravimétrico, a higroscopicidade e a densidade à granel das amostras torrificadas.

A Figura 4.3 exemplifica as amostras de bagaço de cana após o processo de torrefação.

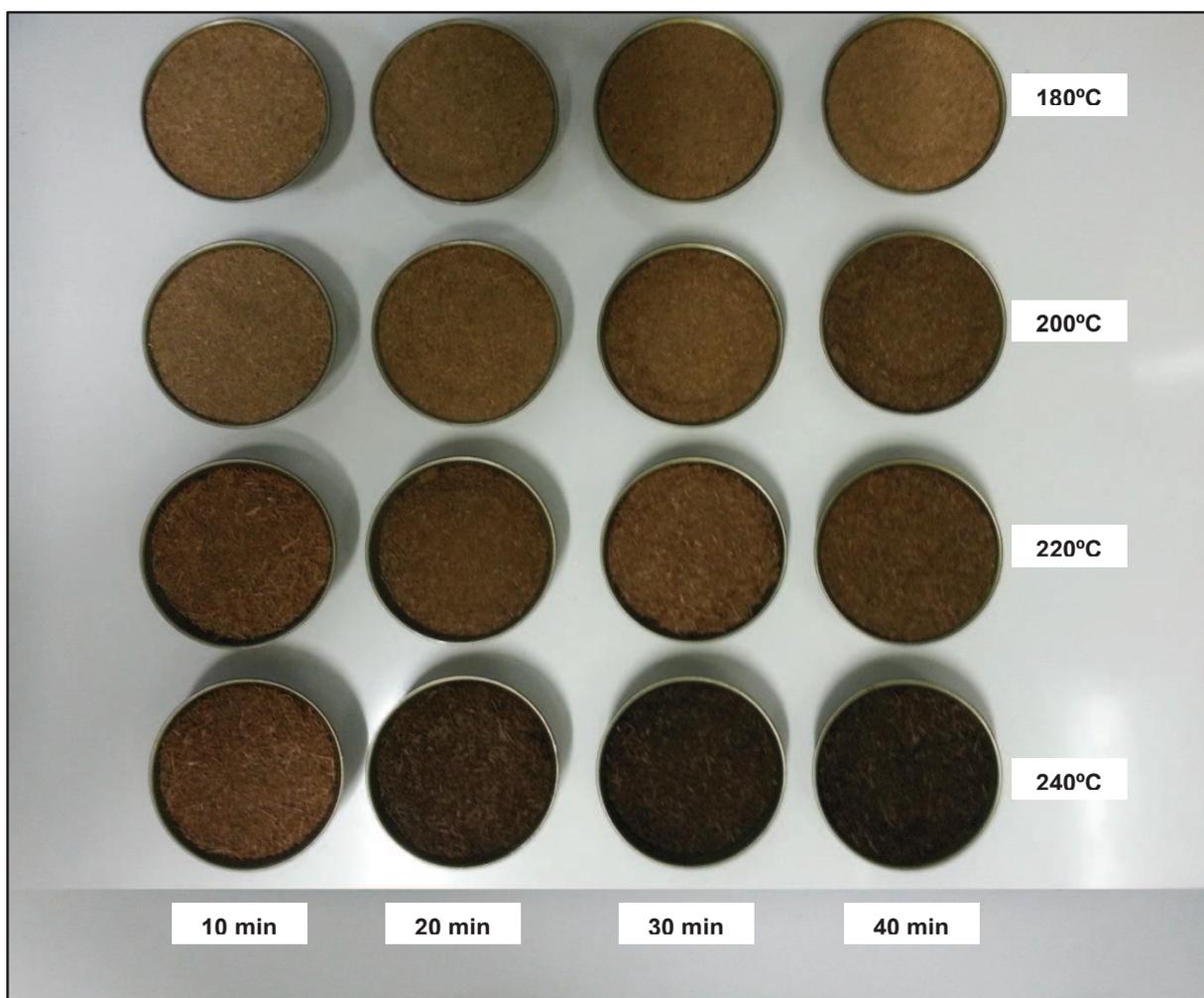


Figura 4.3: Amostras de bagaço de cana torreficados

Analisando a Figura 4.3, foi observado que houve uma variação na tonalidade das amostras, de acordo com o tempo de sua permanência dentro do forno e a temperatura de cada tratamento. Sendo assim, as características do produto torrefeito tendem a se aproximar das características do carvão vegetal. E, em seguida, as amostras foram submetidas à análise de poder calorífico.

Como forma de estudar a influência do tempo de aquecimento no processo de torrefação do bagaço de cana-de-açúcar, foram realizados, para a temperatura de 240°C, experimentos adicionais com os tempos, de 60, 90 e 120 minutos. A Figura 4.4 ilustra o bagaço de cana após a realização do processo de torrefação.

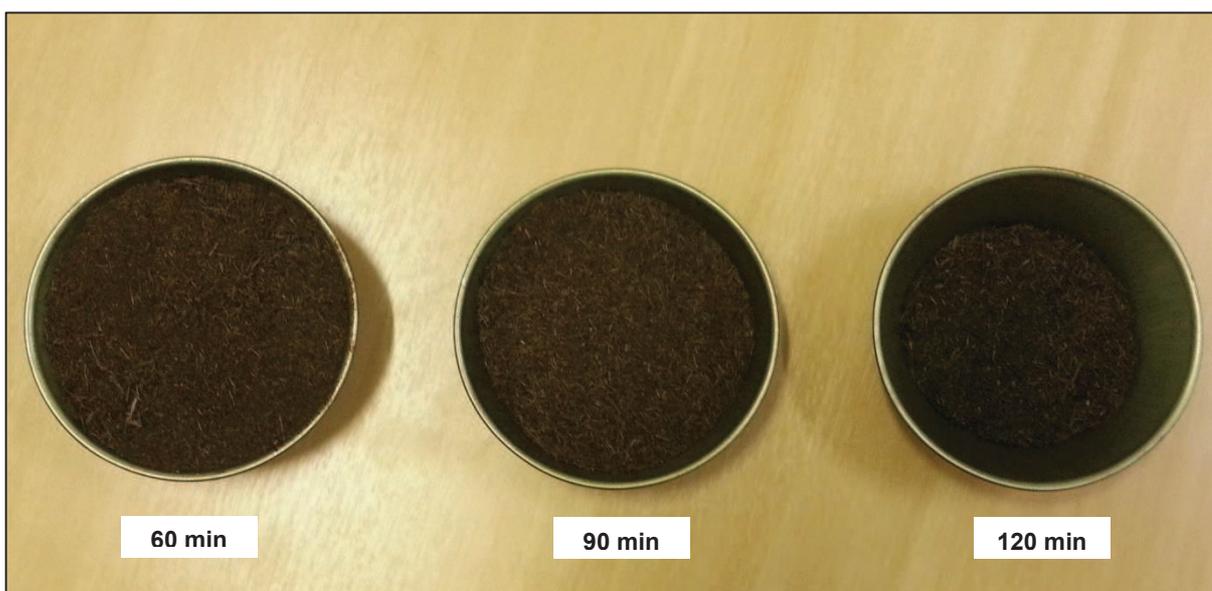


Figura 4.4: Amostras de bagaço de cana torrificadas a 240°C em 60, 90 e 120 minutos.

Analisando a Figura 4.4, foi observado novamente uma mudança na tonalidade das amostras, mediante o tempo de permanência do bagaço de cana no interior do forno mufla, sendo assim, aproximando ainda mais suas características com as do carvão vegetal. As características visuais apresentadas nas Figuras 4.3 e 4.4 para os produtos torrefeitos estão de acordo com Oliveira (2013), pois suas colorações variam de marrom a preto e ainda mantém sua aparência física (granulometria e textura) semelhante a apresentada pela biomassa padrão.

#### 4.3.1 – *Rendimento Gravimétrico*

Na Figura 4.5 são apresentados os resultados para o rendimento gravimétrico, de acordo com os tratamentos térmicos realizados. O rendimento gravimétrico é calculado conforme a Eq. 3.9, ou seja, a razão entre a massa torrificada e o bagaço de cana seco.

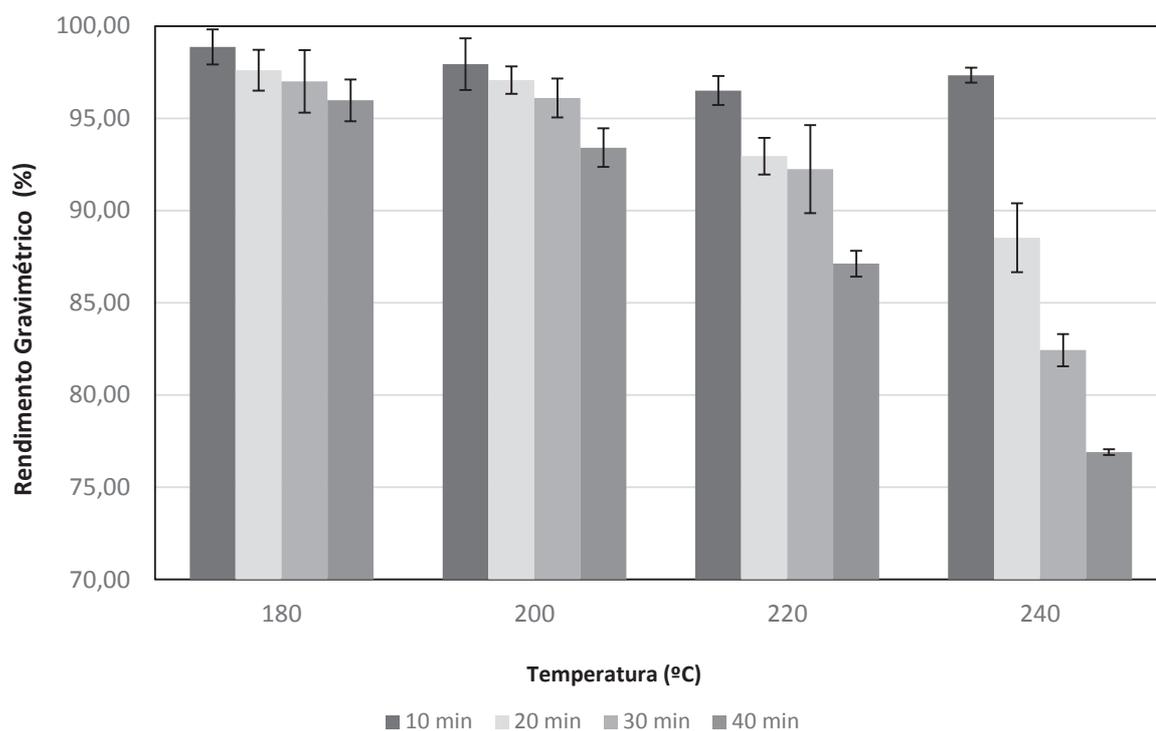


Figura 4.5: Rendimento Gravimétrico para o bagaço de cana em função da temperatura e tempo de torrefação.

Tabela 4.9: Resultados de Rendimento Gravimétrico em função dos tempos e temperaturas de torrefação.

Temperatura (°C)	Tempo (min)	Rendimento Gravimétrico (%)
180	10	98,87
	20	97,60
	30	97,01
	40	95,67
200	10	97,94
	20	97,07
	30	96,11
	40	93,41
220	10	96,51
	20	92,95
	30	92,25
	40	87,13
240	10	97,34
	20	88,52
	30	82,44
	40	76,91

Os baixos valores de coeficiente de variação, que ficaram entre 0,19% e 2,58%, mostraram a homogeneidade em todos os tratamentos térmicos realizados, demonstrando a eficiência do sistema de torrefação.

Avaliando a perda de massa dentro do processo de torrefação, para a temperatura de 180°C a perda foi de 2,93%, para 200°C a perda de massa foi de 4,62%, na temperatura de 220°C a perda foi de 9,72% e em 240°C o decréscimo foi de 20,98%,

Fonseca Felfi (2003) relata que o rendimento gravimétrico varia entre 60% e 80%, conforme as condições de tempo e temperatura em que se realiza o processo. Nesse sentido, foram realizados experimentos adicionais mantendo a temperatura em 240°C, porém variando o tempo para 60, 90 e 120 minutos.

A Figura 4.6 exemplifica os testes de torrefação a 240°C realizados para o bagaço de cana nos tempos de 20, 30, 40, 60, 90 e 120 minutos.

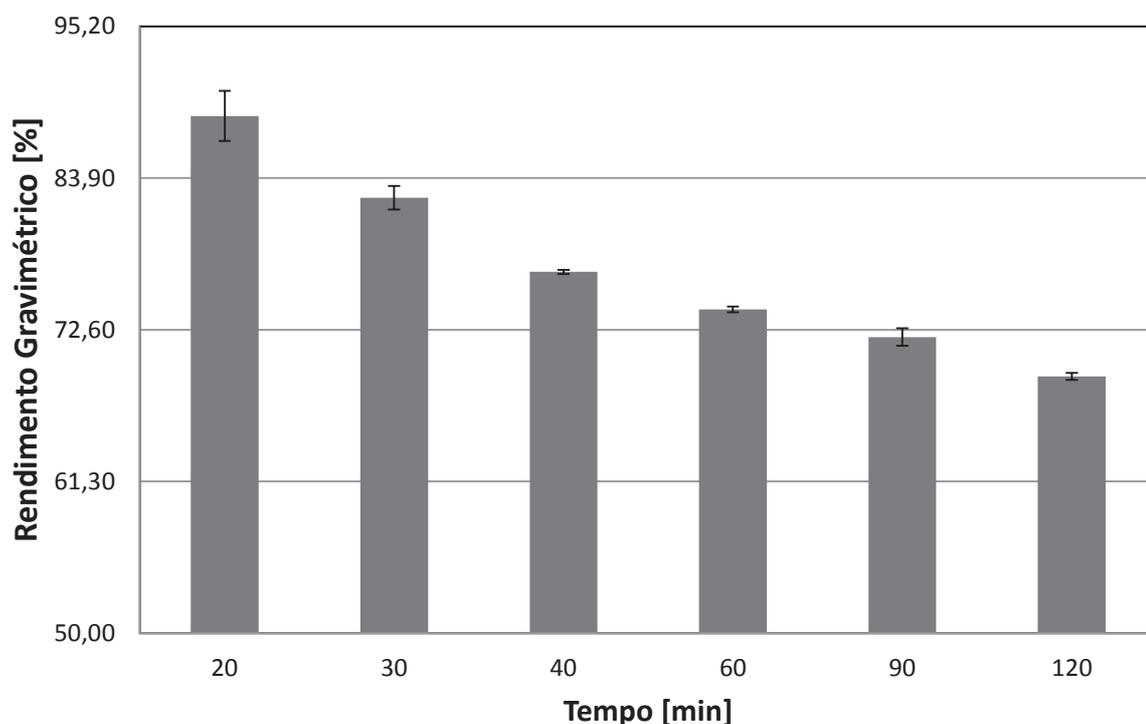


Figura 4.6: Rendimento gravimétrico do bagaço de cana torreficada na temperatura de 240°C.

Segundo a Figura 4.6, foi observado grandes variações no rendimento gravimétrico para os novos tempos de torrefação. Para o tempo de 60 minutos, o rendimento gravimétrico foi de 74,12%, para 90 minutos, o rendimento encontrado foi de 72,06% e, para 120 minutos o resultado foi de 69,13%. Para o bagaço de cana, o tempo de torrefação teve influência dominante nos resultados de rendimento gravimétrico, variando 29% com os novos tempos adicionados de 60, 90 e 120 minutos.

Com relação ao efeito da temperatura na perda de massa, um estudo realizado com três espécies de *Eucalyptus sp* tratados termicamente, Almeida et al (2009) relata perda de massa inferior a 5% para o tratamento realizado a 180°C, entre 5% e 17% para 220°C e para o tratamento térmico a 280°C a perda de massa foi superior a 25%.

Nas Figuras 4.4 e 4.5 nota-se que somente à partir da temperatura de 240°C e com tempo de superior a 90 minutos é que se obtém rendimentos gravimétricos na faixa de 60% e 80%. Portanto, segundo Fonseca Felfi (2003), para fins de análise de higroscopicidade somente as amostras com tratamento térmico de 240°C foram utilizadas.

Com relação à densidade a granel, não foram encontrados variações significativas quando comparado aos valores encontrados com o produto padrão.

#### 4.3.2. Análise de Higroscopicidade

Ao término da torrefação do bagaço de cana, foi realizada a análise de higroscopicidade para os produtos torreficados a 240°C em 20, 30, 40, 60, 90 e 120 minutos, juntamente com a biomassa padrão. A finalidade deste teste é encontrar o melhor tempo e temperatura de torrefação que resulte num produto menos higroscópio, ou seja, que tenha menor redução do poder calorífico decorrente da absorção de umidade, quando comparado ao bagaço padrão com a umidade de trabalho. Na Figura 4.7 são apresentados os valores de PCS para o produto padrão e os produtos torreficados, ambos em base seca.

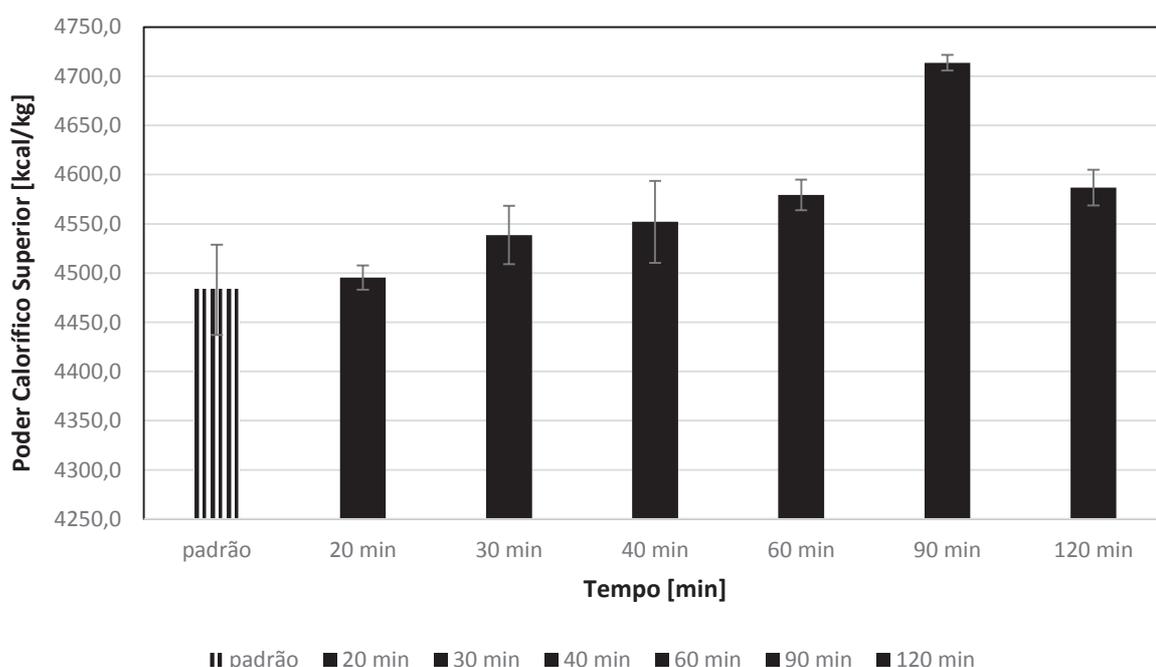


Figura 4.7: Comparação do PCS da biomassa padrão (base seca) e torreficada à 240 °C com diferentes tempos de aquecimento.

Analisando a Figura 4.7, foi verificado que em todos os tempos analisados para o bagaço de cana tratado termicamente, os valores de PC ultrapassaram o PC do bagaço de cana padrão, com 0% de umidade e também os valores de PC da madeira de eucalipto utilizada comercialmente. Para o tempo de 20 minutos o incremento energético foi menor que 1%, para 30 minutos o acréscimo foi de 1,22%, de 1,51% para 40 minutos, em 60 minutos 2,1%, já para 90 minutos ocorreu a maior variação com 4,88% e, por fim, para o tempo de 120 minutos a variação foi da ordem de 2,25%, quando comparados aos valores de PC da biomassa padrão.

Após a submissão das biomassas padrão e torrificadas ao teste de higroscopacidade, foi observado os seguintes resultados, conforme mostra a Figura 4.8.

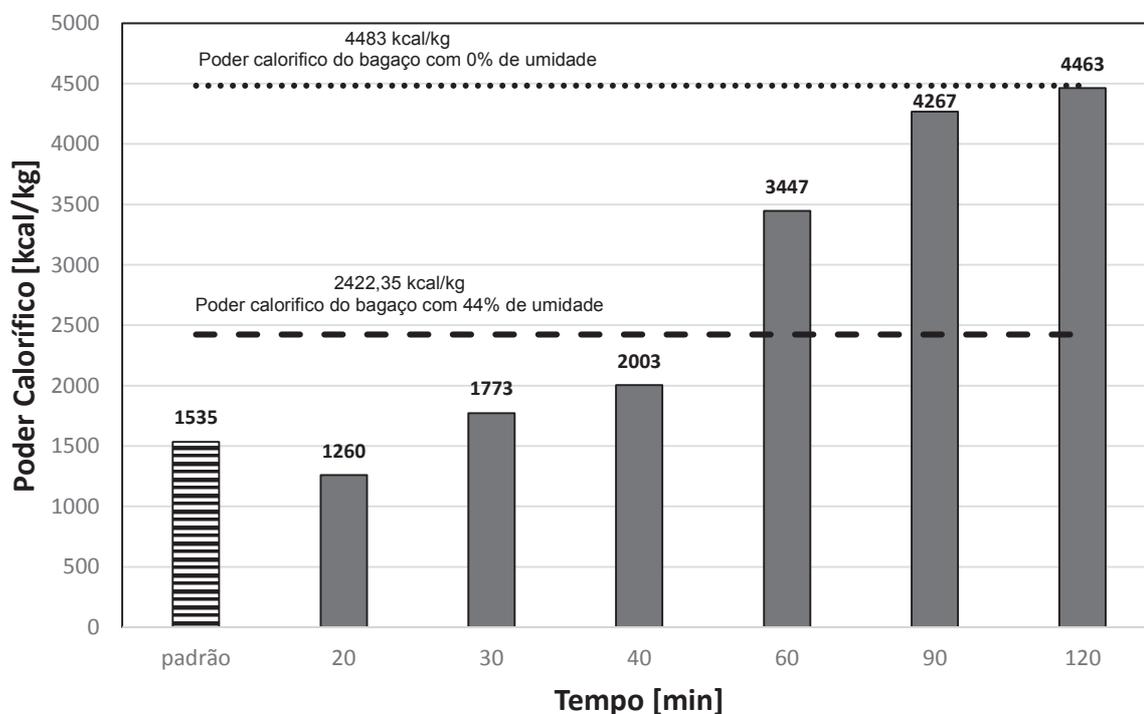


Figura 4.8: Comparativo entre bagaço de cana padrão e torrificado, ambos em condições higroscópicas.

Analisando a Figura 4.8 e comparados os resultados com aqueles obtidos para a biomassa padrão, observa-se uma pequena diminuição do PCS para a biomassa torrificada no tempo de 20 minutos. Já para os demais tempos de aquecimento foi observado um aumento do PCS, principalmente para os tempos de 60 a 120 minutos de tratamento. É observado também que para esses tempos é ultrapassado a faixa limítrofe da umidade de trabalho do bagaço de cana padrão (44% de umidade com um poder calorífico de 2422 kcal/kg). Especificamente para o tempo de torrefação de 120 minutos, é observado que o poder calorífico, além de ultrapassar a faixa de trabalho do bagaço de cana padrão,

praticamente se iguala ao valor de energia para o combustível em base seca, com 0% de umidade, produzindo uma biomassa com características semelhantes a biomassa padrão.

A análise de higroscopicidade tem por finalidade medir a quantidade de umidade absorvida pela biomassa e também verificar qual foi a redução no potencial energético da biomassa. A Figura 4.9 mostra em detalhes o quanto de umidade que foi absorvida pela biomassa quando exposta ao teste higroscópico. Além disso, demonstra o impacto negativo sobre o poder calorífico.

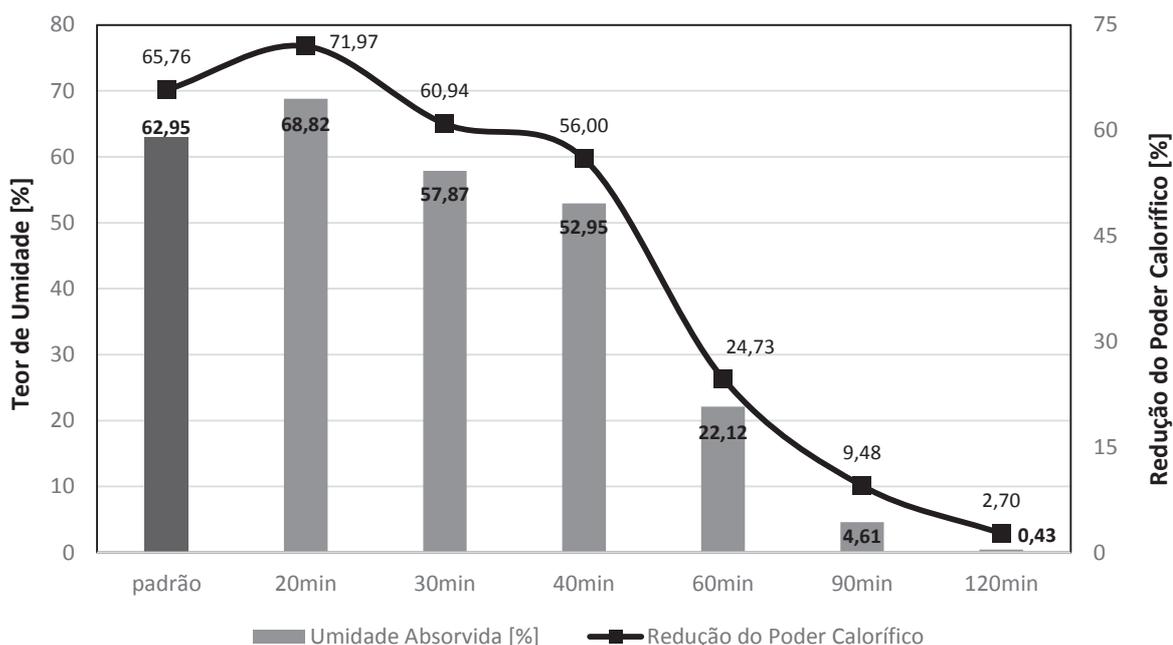


Figura 4.9: Absorção de umidade e redução do poder calorífico em função do tempo de torrefação a 240°C.

Analisando a Figura 4.9 é observado que a amostra seca padrão absorveu uma grande quantidade de umidade, quase 63%, proporcionando uma redução de aproximadamente 66% no poder calorífico. Para o primeiro tempo de torrefação, de 20 minutos, é verificado uma absorção maior ainda de umidade, cerca de 69%, quando comparado ao bagaço de cana padrão, com redução 72% no poder calorífico. Ao aumentar o tempo de torrefação é observado uma redução na absorção de umidade, onde no tempo de 30 minutos, a quantidade de água absorvida foi de quase 58%, com uma redução de 61% no PCS. Para o tempo de 40 minutos de tratamento térmico, foi constatado uma pequena redução na absorção de umidade, até 52% e uma redução no PCS para 56%. Porém, para o tempo de 60 minutos há uma grande redução na absorção de umidade, chegando a casa dos 22% e uma redução no PCS para 24%. Aumentando o tempo de torrefação para 90 minutos a umidade absorvida foi somente de 4,6% e uma pequena redução de 9,5% no PCS. E, para o tempo de 120 minutos, houve uma incrível redução na

quantidade de água absorvida, chegando a menos de 1% e uma redução de apenas 2,7% no poder calorífico superior.

Os valores de absorção de umidade mostrados na Figura 4.9, foram calculados segundo a Eq. 4.1, resultante dos dados experimentais apresentados na Tabela 4.9 para os teores de umidade e poder calorífico.

$$PCS = -46,833 * TU - 4483 \quad (4.1)$$

Para este caso, através de uma análise estatística de regressão linear, foi ajustado a expressão matemática (Eq. 4.2), para o cálculo da redução do PCS, segundo os dados experimentais.

$$ReduçãoPCS = \left( \frac{BT - BTH}{BT} \right) * 100 \quad (4.2)$$

em que BT é o valor do PCS para a biomassa torrificada e BTH é o valor de PCS da biomassa torrificada submetida as condições de higroscopicidade.

A partir das Figuras 4.8 e 4.7, conclui-se que o produto torrificado menos higroscópico é aquele proveniente da torrefação em 120 minutos a 240°C, onde o mesmo ultrapassou em muito a umidade de trabalho do bagaço de cana padrão com 44,35% de umidade e também, praticamente igualou o valor de PCS à biomassa padrão com 0% de umidade. Assim sendo, para o bagaço de cana torrificado a 240°C e tempo de aquecimento de 120 minutos, foi realizado os estudos de análise imediata.

Tabela 4.11: Análise imediata da biomassa torrificada a 240°C e tempo de aquecimento de 120 minutos.

<b>Parâmetro</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão [%]</b>	<b>Coefficiente de Variação [%]</b>	<b>Nº de repetições</b>
CZ [%]	6,45	0,10	1,27	3
MV [%]	66,74	0,31	0,47	3
CF [%]	27,14	0,44	1,70	3

Ao analisar os dados para o bagaço de cana torrificado apresentados da Tabela 4.10 e comparando com os dados da Tabela 4.3, para o bagaço de cana padrão, é observado um

aumento de 68% no teor de carbono fixo, uma diminuição de 15% no teor de materiais voláteis e um aumento de 40% no teor de cinzas. Apesar deste aumento no teor de CZ, os resultados encontrados confirmam a eficiência do processo de torrefação no incremento do potencial energético para o bagaço de cana. Sendo assim, para a confirmação dessas características, foi realizada a análise de combustão do bagaço de cana padrão com 0% e 44,35% de umidade e para o bagaço torreficado a 240°C e 120 minutos.

#### 4.3.3 – Comportamento do bagaço de cana durante a combustão

Para a avaliação do comportamento do bagaço de cana durante a combustão, foram utilizadas as metodologias de Pincelli (2011) e Pessoa Filho (2013). A bancada para a análise de combustão construída para o experimento foi baseada na bancada de Pessoa Filho (2013). É formada por um combustor, uma balança analítica, um soprador de ar para fornecimento de ar ao processo e uma placa de isolante térmico localizado entre a balança e o combustor. As análises foram realizadas conforme procedimento descrito no Capítulo 3.13. A Figura 4.10 mostra o esquema da bancada de análise (PESSOA FILHO, 2013).

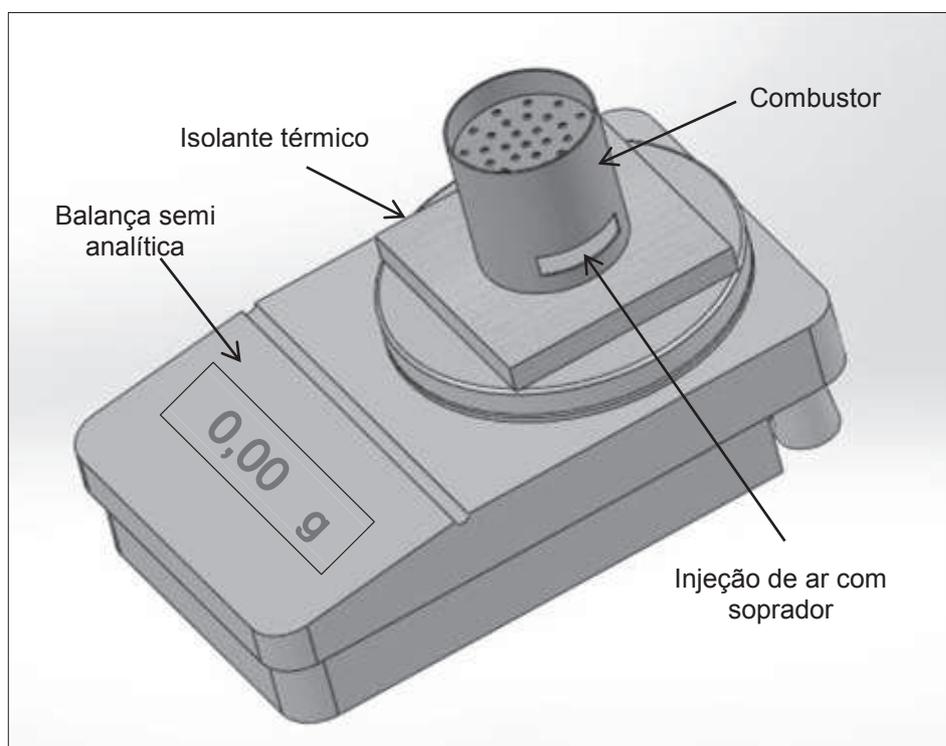


Figura 4.10: Bancada experimental para análise de combustão (PESSOA FILHO, 2013).

Primeiramente foi realizado a análise de combustão do bagaço de cana padrão com teor de umidade de 44,35% e 0%. Durante a combustão da biomassa com 44,35% de umidade não foi observada presença de chama durante o experimento, além disso houve

também a presença de gases e uma combustão irregular do combustível. A Figura 4.11 ilustra o ensaio de combustão da biomassa padrão.



Figura 4.11: Combustão do bagaço de cana padrão com 44,35% de umidade.

Em seguida foi realizado a análise de combustão para o bagaço de cana torreficado a 240°C e 120 minutos. A Figura 4.12 mostra o decaimento da massa de combustível do bagaço torreficado, a 0% e 44,35% de umidade, todos em função do tempo.

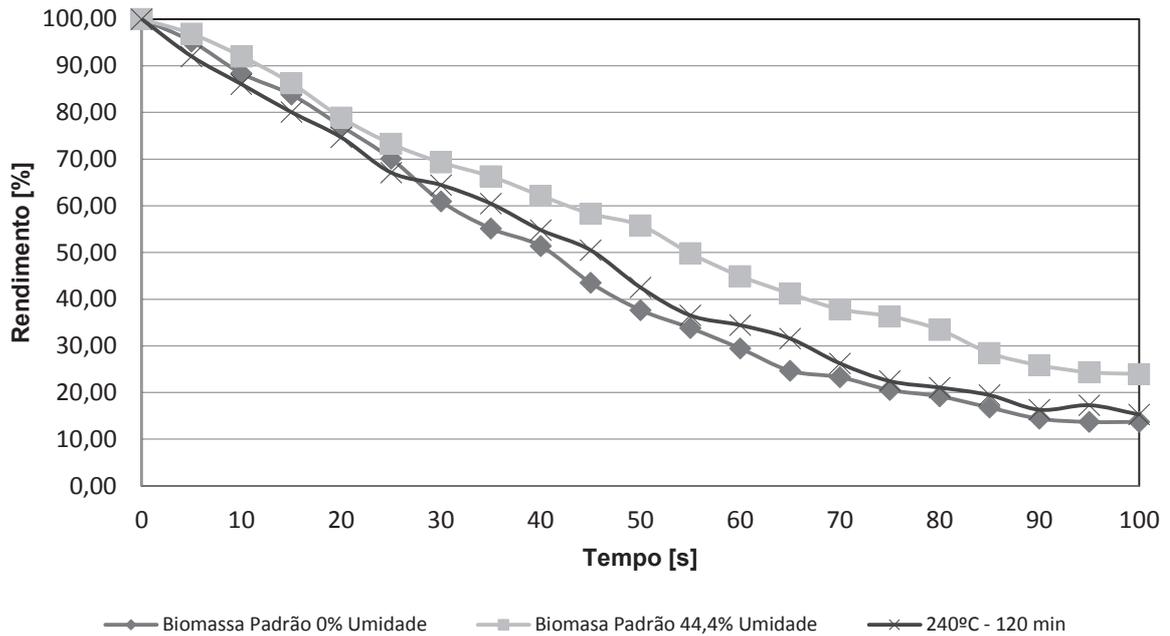


Figura 4.12: Perda de massa em função do tempo durante o processo de combustão do bagaço de cana.

Analisando a Figura 4.12, é observado que o bagaço de cana torreficado apresenta uma perda de massa muito semelhante ao bagaço de cana com 0% de umidade, durante o processo de combustão. E o bagaço de cana com 44,35% de umidade de trabalho apresenta uma perda de massa menor, quando comparado à combustão do bagaço de cana torreficado e ao bagaço de cana seco.

Durante a análise de combustão do bagaço de cana seco e do bagaço de cana torreficado, foi verificado a presença marcante de chama durante praticamente todo o processo, além disso, visualmente, constatou-se uma quantidade muito pequena de emissão de gases e uma combustão mais homogênea, como é observado na Figura 4.13.



Figura 4.13: Análise de combustão do bagaço de cana torreficado a 240°C em 120 minutos.

Analisando a Figura 4.13, é observado, de maneira geral, que o bagaço de cana torreficado queima de uma forma muito mais homogênea quando comparado ao bagaço de cana com umidade de trabalho de 44,35%. Na Figura 4.10 é verificado que há uma pequena quantidade de bagaço de cana iniciando a combustão e uma grande parcela ainda intocada. Já na Figura 4.13, é observado que rapidamente todo o bagaço de cana torreficado está em chamas e com formação de brasa.

Então, a partir de todos os resultados apresentados neste capítulo, é possível afirmar que o processo de torrefação agrega potencial energético ao bagaço de cana, além de reduzir muito a absorção de umidade pelo combustível e proporcionando uma combustão mais homogênea. Sendo assim, com todas essas características apresentadas pelo novo combustível, o excedente de bagaço de cana de uma usina produtora de açúcar e álcool, após ser tratado termicamente, pode ser vendido para restaurantes, indústrias e, principalmente, exportado para diversos países do mundo, aumentando de sobremaneira a lucratividade da empresa.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES

Este trabalho pode ser dividido em três etapas. A primeira etapa consistiu na caracterização e definição do potencial energético do bagaço de cana-de-açúcar padrão; a segunda etapa consistiu no tratamento térmico da biomassa, chamado de torrefação, como ferramenta para valorização energética e, conseqüentemente, uma valorização comercial do bagaço de cana padrão. E por fim, a terceira etapa consistiu na análise de combustão da biomassa.

No que diz respeito às análises dos combustíveis padrão e torreficado, esta etapa foi realizada através das técnicas de análise elementar, análise imediata, densidade à granel, análise de poder calorífico, densidade energética e, para finalizar, a análise de combustão, que consiste na perda de massa em função do tempo de queima da biomassa. Todos os resultados encontrados neste trabalho foram comparados com dados da literatura para diferentes tipos de biomassa como capim brachiária, eucalipto, casca de arroz, e também comparados com outros autores que utilizaram a cana-de-açúcar como matéria prima.

Para a análise elementar da biomassa padrão, foram obtidos os resultados de 42,09% de Carbono, 5,31% de Hidrogênio, 0,64% de Nitrogênio, 0,7% de enxofre e 46,74% de Oxigênio.

Para os parâmetros que compõem a análise imediata, sobre a biomassa padrão, foram obtidos os resultados de 44,35% para o teor de umidade, 4,55% para o teor de cinzas, 79,29% para Materiais Voláteis e 16,14% para o teor de Carbono Fixo. Sobre o poder calorífico superior quanto inferior, os resultados obtidos foram de 4483,00 kcal/kg e 4200,76 kcal/kg, respectivamente, ambos em base seca. Agora, para os resultados de poder

calorífico superior e útil, ambos com teor de umidade de 44,35%, os valores obtidos foram de 2405,95 kcal/kg e 2077,76 kcal/kg, respectivamente.

Sobre a influência do teor de umidade do bagaço de cana padrão no poder calorífico, foi constatado que o ambos são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a umidade, menor é o poder calorífico do combustível. Em relação aos resultados do presente trabalho, considerando uma faixa de umidade de 0% a 60%, foi verificado uma variação de 4483,00 kcal/kg a 1673 kcal/kg e 4200,76 kcal/kg a 1328,61 kcal/kg para os valores de poder calorífico superior e útil, respectivamente.

Para a densidade à granel, foi verificado que, quanto maior o teor de umidade, maior será o valor da densidade. Para o bagaço de cana, em base seca, foi obtido o resultado de 84,25 kg/m<sup>3</sup>, e de 88,78 kg/m<sup>3</sup> para a biomassa com 44,35% de umidade. Já para a densidade energética da biomassa em base seca, o valor encontrado foi de 377,69 Mcal/m<sup>3</sup> e para a umidade de trabalho, com 44,35%, o valor foi de 184/46 Mcal/m<sup>3</sup>.

Na busca por um melhoramento energético do bagaço de cana, foi adotado a torrefação. Durante a torrefação, a diferença na coloração encontrada nas amostras é devido a um aumento na temperatura e no tempo de permanência das amostras no forno. Isso mostra a tendência dos produtos torreficados se aproximarem das características do carvão vegetal.

Em relação ao rendimento gravimétrico, foi observado que a torrefação, na temperatura de 240 °C, proporcionou variações mais significativas, em torno de 97,34% a 69,13%, variando o tempo de permanência de 10 minutos a 120 minutos, respectivamente.

Já para a análise de densidade a granel dos produtos torreficados, não foram observadas variações significativas quando comparado aos resultados da biomassa padrão. Sendo assim, a torrefação não altera praticamente a densidade da biomassa.

Na análise de poder calorífico foi verificado que o processo de torrefação do bagaço de cana padrão, inicialmente, reduz o poder calorífico devido a liberação de frações mais leves e menos energéticas de materiais voláteis. Aumentando o tempo de torrefação, o poder calorífico aumenta, indicando assim reações de transformações físico-químicas que promovem o retorno e a fixação dos gases voláteis para a estrutura do bagaço de cana.

Para as amostras submetidas a análise de higroscopicidade, foi verificado que a amostra seca de bagaço de cana padrão absorve grande quantidade de umidade, cerca de 63%, acarretando numa redução de aproximadamente 66% no poder calorífico. Com aumento no tempo de torrefação até 120 minutos a 240 °C, a absorção de umidade diminuiu até próximo de 0,50%, mantendo o poder calorífico mais constante, variando apenas 2,7%. Com essas características, é possível afirmar que o bagaço de cana submetido um processo de torrefação adequado, torna-se mais hidrofóbico. Com o bagaço de cana

submetido a esta temperatura e tempo de torrefação, o poder calorífico encontrado foi de 4463,00 kcal/kg, ou seja, quase 46% superior ao poder calorífico da biomassa padrão com 44% de umidade (2422,35 kcal/kg) e, além disso, praticamente igualou ao valor de poder calorífico da biomassa padrão em base seca (4483,00 kcal/kg) e superou em 56% dos valores de PC (2851kcal/kg) da madeira de eucalipto, que é a biomassa mais utilizada comercialmente.

Comparando os resultados de análise imediata do produto menos higroscópico com a do produto padrão, foi verificado que o teor de carbono fixo aumentou em torno de 60%, o teor de materiais voláteis reduziu em torno de 16%. Com tais características, é possível confirmar que o processo de torrefação correto aumenta consideravelmente o potencial energético do bagaço de cana.

Avaliando do comportamento do bagaço de cana durante a combustão, foi observado uma perda de massa semelhante entre o bagaço de cana padrão, em base seca, e o bagaço torreficado no tempo de 120 minutos. Porém, para o bagaço de cana torreficado houve uma combustão mais regular e consistente, com formação de chamas, brasas e pouca emissão de gases, quando comparado ao bagaço de cana padrão, que houve emissão muito maior de gases, pequena formação de chamas e brasas e uma combustão bem mais irregular.

Analisando todos os resultados apresentados, foi constatado que o bagaço de cana-de-açúcar torreficado pode se tornar muito competitivo frente a madeira de eucalipto, visto os valores de PC e a baixíssima reabsorção de umidade apresentada pelo combustível.

Na sequência são apresentadas as seguintes propostas para a continuação deste trabalho:

- Construção de uma bancada, com alimentação automática de biomassa, para análise térmica e balanço de energia do processo de torrefação, verificando a quantidade de energia gasta no tratamento térmico;
- Definir o índice de combustão das amostras de bagaço de cana padrão e bagaço de cana torreficados para avaliação de desempenho durante a queima, pois tal índice é utilizado para a classificação e comparação da qualidade dos diferentes tipos de biomassa durante a combustão;
- Realização de uma análise termogravimétrica dos bagaços de cana padrão e torreficados;
- Realização da análise cromatográfica (CG-FID/TCD) dos gases emitidos durante a combustão, da biomassa padrão, e torreficada e verificar sua composição química para um possível reaproveitamento desses gases.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G.; BRITO, J. O.; PERRÉ, P. Changes in wood-water relationship due to heat treatment assessed on micro-samples of three *Eucalyptus* species. **Holzforschung**, Berlin, v. 63, p. 80-88, 2009.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica**. Cap 4. Biomassa. 2ed. Brasília, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6922: Carvão Vegetal - Ensaios Físicos Determinação da Massa Específica (Densidade à Granel)**. Rio de Janeiro, 1981. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 6923: Carvão Vegetal – Amostragem e Preparação da Amostra**. Rio de Janeiro, 1981. 15p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 8112: Carvão Vegetal - Análise Imediata - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 1986. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 8633: Carvão Vegetal – Determinação do Poder Calorífico – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

ASTM D 5373/1993 – Standard Methods for Instrumental Determination of carbon, hydrogen and nitrogen in laboratory samples of coal and coke, **American Society for Testing and Materials (ASTM)**: Pennsylvania, 1993.

BARCELLOS, D. C., **Forno Container para Produção de Carvão Vegetal: Desempenho, Perfil Térmico e Controle da poluição**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2002.

BARJA, G. J. A. **A cogeração e sua inserção no sistema elétrico**. 2006. 157f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

BARROS, R. **Energia para um novo mundo**. Rio de Janeiro: Monte Castelo Idéias, 2007. 160p.

BIOCANA – **Associação de Produtores de açúcar, etanol e energia**. Disponível em <http://www.biocana.com.br>. Acesso em julho de 2014.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal: fontes; propriedades energéticas; formas, viabilidade e eficiência na obtenção de energia**. 2010. 1 ed. Ed. Interciência, 2010 86p.

BRANDÃO, A. **cana-de-açúcar, Álcool e açúcar na historia e no desenvolvimento social do Brasil: Séc. 16-20**. Brasília, Ed. Horizonte INL, 269p. 1984 223-239p.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca**. IPEF, n.16, p. 63-70, 1978.

BRITO, J. O., **Princípios de Produção e Utilização de Carvão Vegetal de Madeira**. Documentos Florestais. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1990.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia**. Piracicaba, SP. IPEF, 1979. (Circular Técnica).

CIAMPI, G. J. SANTOS; **Desenvolvimento de um Calorímetro para a Determinação do Conteúdo Energético de Combustíveis Sólidos**. 1992. 84 p. Dissertação de Mestrado – Universidade de Campinas, Campinas.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Indicadores da Agropecuária**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em Julho de 2013.

COSTA, M. H. A. A. P. Viabilidade de Sistemas de Cogeração em indústria química. In: VII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas (ENCIT), 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** v.1, p358-363. Rio de Janeiro, 1998.

CORTEZ, L. A. B., LORA, E. E. S., GÓMEZ, E, G. **Biomassa para Energia**. 1 ed. Campinas. Editora Unicamp, Campinas, 2008. 728p.

DANTAS, D. N. **Uso da biomassa da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica**: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista. Dissertação de mestrado acadêmico. Universidade São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, SP, 2010.

DIAS, M. O. S.; ENSINAS, A. V.; NEBRA, S. A.; FILHO, R. M.; ROSEL, C. E. V.; MACIEL, M. R. W. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process. **Chemical engineering research & design**, v. 87, 1206-1216, 2009.

DPC BIOMASSA. **Utilização Da Biomassa Na Indústria Siderúrgica, 2012** Disponível em <http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/Processo%20DPC%20de%20Carvoejamento%20-%20Sidney%20Pessoa.pps> Acesso em ago 2013.

FARINHAQUE, R.; **Influência da Umidade no Poder Calorífico da Madeira de Bracatinga (*Mimosa scabrella*, Benth) e Aspectos Gerais da Combustão**. Curitiba: FUPEF, 1981. (Serie Técnica nº6).

FELFLI F., FELIX ELIECER. **Torrefação de Biomassa, Viabilidade Técnica e Potencial de Mercado**. [s.n.], 2003. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

FIGUEIREDO, C. K. F. **Análise Estatística do Efeito da Pressão na Carbonização da Madeira de *Eucalyptus Grandis***. 2009. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Brasília.

FIGUEIREDO, P. **Breve história da cana-de-açúcar e o papel do Instituto Agrônomo no seu estabelecimento no Brasil**. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; ANDRADE LANDELL, M. G. de. *Cana-de-açúcar*. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 31-45.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P.D. **Comportamento da Madeira a Temperaturas Elevadas**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v.9, n.4, p. 157-174, out./dez. 2009.

GALDINO, D. S., HIGUTI, K. A., ROSOLEM, V. H., NONOSE, V. M. R., **Produção de Carvão Vegetal**. Trabalho de Avaliação. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Itapeva, 2010.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e Energia. **Química Nova**, v. 32, n 03, p. 582-587, 2009.

GONÇALVES, J. E. **Avaliação Energética e Ambiental de Briquetes Produzidos com Rejeitos de Resíduos Sólidos Urbanos e Madeira de *Eucalyptus Grandis***. 2010. 104 f. Tese de Doutorado - Universidade Estadual Paulista, Botucatu

GONÇALVES, E. R. **Fotossíntese, osmorregulação e crescimento inicial de quatro variedades de cana-de-açúcar submetida à deficiência hídrica**. 2008. 66f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo.

HORST, D. J., **Avaliação da Produção Energética a partir de ligninas contidas em biomassas**. 2013. 106f. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.

INSTITUTO EUVALDO LODI. **Álcool Combustível**. Série Indústria em Perspectiva – Brasília: IEL/NC, 2008. 163f.

JURAS, I., A., G., M. Mecanismo de desenvolvimento limpo: Fundamentos, histórico e estatística. **Consultoria Legislativa**, 2007. 7f.

LENÇO, P. C. **Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para produção de energia**. 2010. 181f. Tese de Doutorado. – Universidade de Campinas, Campinas, 2010.

LIMA, J. L., **Estratégia de Melhoramento de *Eucalyptus ssp*, visando à produção de carvão**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2009.

LIPPEL. **Biomassa**. Disponível em: <<http://www.lippel.com.br/br/biomassa.html>>. Acesso em: jan. 2014.

LORA, E. E. S.; TEIXEIRA, F. N.; Energia e meio ambiente. In: Milton Marques; Jamil Haddad; André Ramos Silva Martins. (Org). **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**, v. 1, pp. 30-93, Itajubá: UNIFEI, 2001.

MACEDO, L. A. **Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis do processo de torrefação**. 2012. 49p. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Brasília.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, AGROPECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Relação das Unidades Produtoras Cadastradas no Departamento de cana-de-açúcar e agroenergia, 2012**. Disponível em: [www.agricultura.gov.br](http://www.agricultura.gov.br). Acesso em 05 ago. 2014.

MATTOS, A. R. **Açúcar e Alcool no Brasil**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1942.

McKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology. Elsevier**. v. 83. p. 37-46, 2002.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional 2012 – Resultados Ano Base 2011** Brasília, MME, 2011. p.57.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Matriz Energética Nacional 2030 / Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética**. Brasília, MME, EPE, 2007. p.354. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/spe/galerias/arquivos/Publicacoes/matriz\\_energetica\\_nacional\\_2030/MatrizEnergeticaNacional2030.pdf](http://www.mme.gov.br/spe/galerias/arquivos/Publicacoes/matriz_energetica_nacional_2030/MatrizEnergeticaNacional2030.pdf) > Acesso em mai. 2014.

MME – **Ministério de Minas e Energia**. Balanço Energético Nacional 2011. Brasília, 2011. p.267.

MORAIS, D. M. **Briquetes ligno-celulósicos como potencial energético para a queima de blocos cerâmicos: aplicação em uma indústria de cerâmica vermelha que abastece o distrito federal**. 2007. 229p. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, Brasília.

OLIVEIRA, G. C. C. **Avaliação do ciclo de vida da produção de biomassa torrefada para a gaseificação**. 2013. 78f. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Brasília.

OLIVEIRA, J. G. **Perspectivas para a cogeração com bagaço de cana-de-açúcar: potencial do mercado de carbono para o setor sucroalcooleiro paulista**. 2007. 160f. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

OLIVEIRA, R. L. M.; **Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão vegetal**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Minas Gerais, 2009.

PAOLIELLO, J. M. M. **Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira**. 2006. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2006.

PESSOA FILHO, J. S. **Análise Térmica e Energética de Capim *Brachiária***. 2013. 113f. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2013.

PIMENTA, A. S. **Curso de atualização em carvão vegetal**. Apostila, documento interno. – Viçosa: UFV/DEF, 2002.

PINCELLI, A. L. P. M. S. **Características dos Resíduos da Colheita de Madeira de Eucalipto e Pinus, Submetidos ao Tratamento Térmico, com Foco na Aplicação Energética**. 2011. 126p. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PINHEIRO, G. F., RENDEIRO, G., PINHO, J. T. Densidade Energética de Resíduos Vegetais, **Biomassa e Energia**, v. 2, n.2, p. 113-123, 2005.

PROTÁSSIO, T. P.; ALVES, I. C. N., TRUGILHO, P. F., SILVA, V. O., BALIZA, A. E. R. **Compactação de Biomassa Vegetal visando à Produção de Biocombustíveis Sólidos**. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v.31, n.68, p. 273-283, 2011.

RAMOS, R. A. V., MAIA, C. R. M., GASCHÉ, J. L., UCHÔA, T. B., BRANCO, F. P., FIOMARI, M. C., TAKAKI, A. T. Análise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira com sistema de cogeração de energia em expansão. In: V Congresso Latino americano de Geração e transmissão de energia elétrica, 2003. São Pedro. **Anais...**, São Pedro, SP, 2003.

REIN, P. **Cane sugar engineering**. Berlim: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2007. 768 p.

RENDEIRO, G., NOGUEIRA, M. **Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida**. (Soluções energéticas para a Amazônia). 1.ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. 193p.

REZENDE, M. E. **Tecnologia para produção de carvão vegetal**. Seminário Interno CAF – CARBONIZAÇÃO. Itabirito, Minas Gerais, 2007.

RIBEIRO, D. V.; MORELLI, M. R. **Resíduos Sólidos: Problema ou oportunidade?**. 1ª. Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2009. 158p.

RODRIGUES, L. D. **A cana-de-açúcar como matéria prima para a produção de biocombustíveis: Impactos ambientais e o zoneamento agroecológico como ferramenta para mitigação**. 2010. 64p. Especialização em Análise Ambiental – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

RODRIGUES, T. O. **Efeitos da Torrefação no Condicionamento de Biomassa para Fins Energéticos**. 2009. 71p. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Brasília.

SANTOS, S. F. O. M. **Produção de carvão vegetal em cilindros metálicos verticais: Alguns aspectos referentes à sustentabilidade**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa. Paraná, 2007.

SANTOS, M. L.; DE LIMA, O. J.; NASSAR, J.; CIUFFI, K. J.; CALEFI, P. S. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. **Química Nova**. v.34. n. 3. p 507-511, 2011.

SCHIRMER, F. **Comparação de indicadores de eficiência energética e exergética em duas indústrias do setor sucroalcooleiro**. 2006. 88f. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, PR, 2006.

SILVA, R. F.; **Análises energética e exergética de uma micro central de cogeração inserida em uma planta de carbonização de madeira reflorestada**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Minas Gerais, 2009.

SMITH, A. D. 1976 - **Wood as fuel**. Foster Wheeler Limited. Mimeograph. 32 p.

SOARES, P. A., ROSSELL, C. E. V. **Conversão de celulose pela tecnologia Organosolv**. NAIPPE - USP, Vol. 3 - Nova Série, São Paulo, 2007.

SOUZA, M. M., DA SILVA, D. S., ROCHADELLI, R. DOS SANTOS, R. C. Estimativa do poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **Revista Floresta**. v.42, n 2, p. 325-334, 2012.

SRIVASTAVA, P. K.; MAHESHWARI, R. C.; OJHA, T. P. **Biomass briquetting and utilization**. NewDelhi: Jain Brothers, 1995. 12 p

VALE ,A. T. **Caracterização da biomassa lenhosa de um cerrado sensu strictu, da região de Brasília, para uso energético**. 2000. 111f. Tese de Doutorado - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da Biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 2012. 72p. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Paraná.

VIEIRA, S.; OLIVEIRA JÚNIOR., S. Estudo de sistemas de cogeração e geração termoelétrica através da análise termoeconômica. In: Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences -Encit, 7., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** p 381-386. Rio de Janeiro. PUC, 1998.

VILAS BOAS, M. A. **Efeito do Tratamento Térmico da Madeira para Produção de Briquetes**. 2011. 65f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

WALKER, E.. **Estudo da Viabilidade Econômica na Utilização de Biomassa como Fonte de Energia Renovável na Produção de Biogás em Propriedades Rurais**. 2009. 107f. Dissertação de Mestrado – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.