UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE DOS RESÍDUOS GERADOS PELA BANANICULTURA COMO POSSÍVEL FONTE DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Autora: Carolina Sampaio Athayde

Orientadora: Erika Cristina Cren, Dra.

Belo Horizonte
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Carolina Sampaio Athayde

ANÁLISE DOS RESÍDUOS GERADOS PELA BANANICULTURA COMO POSSÍVEL FONTE DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Minas Gerais como pré-requisito para obtenção do título de Mestre

Área do conhecimento: Biomassa e energias renováveis

Orientadora: Erika Cristina Cren, Dra.

Belo Horizonte
2014

Athayde, Carolina Sampaio.
A865a Análise dos resíduos gerados pela bananicultura como possível fonte de geração de energia [manuscrito] / Carolina Sampaio Athayde . – 2014.
166 f., enc.: il.

Orientadora: Erika Cristina Cren.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f.109-166.

Bibliografia: f.99-108.

1. Engenharia química - Teses. 2. Banana -Teses. 3. Biomassa - Teses. 4. Energia – Fontes alternativas - Teses. 5. Combustíveis sólidos - Teses. I. Cren, Erika Cristina. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 66.0(043)

“Numa espécie não são os mais fortes e nem os mais inteligentes que sobrevivem e sim os que têm a melhor capacidade de adaptação.”

Charles Darwin

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me possibilitou a conclusão de mais uma etapa de minha vida.

Aos meus pais, Carla e Sérgio, que sempre estiveram ao meu lado, e me deram o apoio necessário para que eu pudesse concluir mais esta etapa.

A minha orientadora, Erika, pela paciência, persistência, habilidade em me orientar pessoal e academicamente e é claro, pelo conhecimento compartilhado.

Ao meu namorado, João, que esteve presente no período mais difícil da minha dissertação, me incentivando incessantemente.

Agradeço a todos os meus colegas de mestrado do Departamento de Engenharia Química, que me fizeram companhia nas horas mais cansativas, e que permaneceram comigo mesmo depois das luzes da universidade já terem se apagado. Fabiana, Regiane, Pedro, Lorena, Camila, Fabrício, Salvador: obrigada.

Ao Alexandre, pelo auxílio nos experimentos e por tantas dúvidas sanadas.

A professora Andrea Charbel pelas dicas e ideias trocadas.

As meninas do Laboratório de Ensaio de Combustíveis (LEC), pelo auxílio durante as pesquisas. Em especial a professora Vânia Paso e sua orientada Camila.

A professora Maria Irene Yoshida do laboratório de Análise Térmica.

A UNI-BH, e ao pessoal da planta piloto, por manter suas portas abertas a mim.

Aos professores e funcionários do departamento de Engenharia Química.

A CAPES, pela bolsa concedida.

E a todos que participaram de alguma forma desta minha jornada.

RESUMO

Athayde, Carolina Sampaio; Cren, Erika Cristina.

A cultura da banana (*musa sp.*) é responsável pela geração de grandes quantidades de resíduos de material vegetal, a saber: folha, pseudocaule, engaço, coração e fruto de descarte. O destino não adequado destes resíduos excedentes pode favorecer a ocorrência de problemas ambientais e fitossanitários. No entanto, os resíduos gerados pela cultura da banana apresentam grande potencial de uso como biomassa para diferentes aplicações, como a adubação, a alimentação animal, geração de material celulósico e geração de energia, a exemplo de outras culturas como a cana-de-açúcar, o café e o arroz. Acredita-se que estudos onde se valorize e utilize resíduos agroindustriais venham a contribuir para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, além do desenvolvimento regional e social. Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo investigar o potencial energético da biomassa gerada pela bananicultura. Cinco tipos de resíduos (folha, pseudocaule, engaço, coração e fruto), incluindo um blend de todos eles tiveram seu comportamento avaliado durante a secagem e foram caracterizados em relação às suas propriedades químicas e térmicas. A secagem de cada biomassa foi realizada empregando-se estufa com circulação forçada de ar, nas diferentes temperaturas de 70, 105 e 120°C. Seguiram-se as etapas de cominuição, briquetagem e avaliação das propriedades químicas (análises elementares e imediatas) e térmicas (avaliação do poder calorífico superior e análises termogravimétricas). A partir dos resultados destas análises, pôde-se inferir que todos os resíduos da cultura da banana estudados têm grande potencial de geração de energia. Dentre eles, o coração e o fruto geram as maiores quantidades de energia por unidade de volume, principalmente devido aos elevados teores de carbono fixo, carbono elementar e hidrogênio. Apesar disso, por conter baixas quantidades de lignina, o fruto não dispensa o uso de ligantes ao ser briquetado. Por fim, a porcentagem de cada resíduo pode ser ajustada na elaboração dos blends, objetivando alta capacidade energética aliada à sustentabilidade.

Palavras-chave: musa *sp.,* biomassa, energia renovável, combustíveis sólidos.

ABSTRACT

Athayde, Carolina Sampaio; Cren, Erika Cristina.

Banana crop (*musa sp*.) is responsible for generating large quantities of wastes, namely, leave, pseudostem, stalk, inflorescence and fruit. The wrong destination of those wastes can contribute to environmental and plant health problems. However, the waste generated by banana crop have great potential for use as biomass for different applications: fertilizer, animal feed, cellulosic material supply and power generation; like other crops such as sugar cane, coffee and rice. It is presumed that the recovery and use of agricultural residues may contribute to the development of sustainable technologies, in addition to regional and social development. In this sense, the present study aimed to investigate the energy potential of biomass generated by banana crop wastes. Five types of waste (leaves, pseudostem, stalk, inflorescence and fruit), including a blend of all of them had their behavior assessed during drying and were characterized chemically and thermally. The dry of each biomass was realized using an oven with forced air circulation, at different temperatures of 70, 105 and 120 ° C. The drying was followed by comminution, briquetting and evaluation of chemical (elementary and proximate analysis) and thermal properties (evaluation of higher calorific value and thermogravimetric analysis). From the results of these analyzes, it can be inferred that any residue studied at this work have great potential for power generation. Among them, the inflorescence and the fruit generate greater amounts of energy per unit of volume, mainly due to high fixed carbon, elemental carbon and hydrogen contents. Nevertheless, because of its low amounts of lignin, the fruit does not eliminate the need of binders while briquetted. Finally, the percentage of each residue can be adjusted during the preparation of blends, aiming high energy capacity combined with sustainability.

Keywords*: musa sp.,* biomass, renewable energy, solid fuels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Partes da bananeira..... 20
Figura 2: Briquetes em formato bolacha e cilindro. 31
Figura 3: Curva de secagem de teor de umidade versus tempo de secagem. 40
Figura 4: Curva de secagem de taxa de secagem versus teor de umidade. 41
Figura 5: Trituração da matéria-prima no campo 44
Figura 6: Calorímetro 47
Figura 7: Estufa de circulação forçada de ar 48
Figura 8: Anemômetro 49
Figura 9: Molde para briquetagem 52
Figura 10: Pressão sendo exercida sobre o molde com sistema de aquecimento 52
Figura 11: Aparelho de TGA 53
Figura 12: Prensa hidráulica estabilizada em cinco toneladas 55
Figura 13: Resíduos prensados in natura 56
Figura 14: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita da folha a 70°C. 62
Figura 15: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita da folha a 105°C. 63
Figura 16: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita da folha a 120°C. 63
Figura 17: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita da banana a 70°C. 64
Figura 18: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita da banana a 105°C. 65
Figura 19: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita da banana a 120°C. 65
Figura 20: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do pseudocaule a 70°C. 68
Figura 21: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do pseudocaule a 105°C..... 69
Figura 22: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do pseudocaule a 120°C..... 69
Figura 23: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do engaço a 70°C. 71
Figura 24: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do engaço a 105°C. 72

Figura 25: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do engaço a 120°C. 72
Figura 26: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do coração a 70°C. 74
Figura 27: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do coração a 105°C. 74
Figura 28: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do coração a 120°C. 75
Figura 29: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do blend a 70°C. 77
Figura 30: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do blend a 105°C. 77
Figura 31: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do blend a 120°C. 78
Figura 32: valores de *Def* ($m^2.s^{-1}$) para os resíduos da bananeira a diferentes temperaturas de secagem. 78
Figura 33: Resultado da briquetagem 81
Figura 34: Briquete do fruto da banana 81
Figura 35: DTG e TGA do pseudocaule 89
Figura 36: DTG e TGA do engaço 90
Figura 37: DTG e TGA do coração 91
Figura 38: DTG e TGA da banana 92
Figura 39: DTG e TGA da folha 93
Figura 40: DTG e TGA do blend 94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Oferta de biomassa por resíduo agrícola e agroindustrial no Brasil (10^6 toneladas/ano). 18
Tabela 2: Conteúdo energético por resíduo agrícola e agroindustrial no Brasil (10^6 bep/dia). 18
Tabela 3: Principais frutas produzidas no mundo em 2010 21
Tabela 4: Principais frutas produzidas no Brasil em 2012 21
Tabela 5: Composição química elementar de resíduos vegetais. 27
Tabela 6: Composição imediata de resíduos vegetais. 28
Tabela 7: Norma sueca para briquetes SS 18 71 21 33
Tabela 8: Parâmetros para estimativa dos coeficientes convectivos de transferência de massa e calor. 51
Tabela 9: Diferença de massa antes e após trituração. 54
Tabela 10: Teor de umidade antes e após prensagem 55
Tabela 11: Análises químicas imediatas 57
Tabela 12: Análises químicas elementares 60
Tabela 13: Densidade aparente de briquetes de diferentes biomassas 83
Tabela 14: Densidade aparente dos resíduos antes e após briquetagem 84
Tabela 15: Poder calorífico superior (PCS) dos resíduos antes e após briquetagem 85
Tabela 16: Densidade energética do resíduo e do briquete 87

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIAÇÕES

± - aproximadamente

A_w - Atividade de água

bep - Barris equivalentes de petróleo

C - calor específico

D_{ef} - Difusividade efetiva

DTG – Termogravimetria derivada

h - umidade absoluta do ar de secagem

h_c - Coeficiente convectivo de calor

h_w - umidade absoluta do ar na temperatura de bulbo úmido

IDE - Índice de Desempenho Energético

k_m - Coeficiente convectivo de massa

ρ - Pressão de vapor de água do alimento

ρ_0 - Pressão de vapor de água pura

PCI - Poder Calorífico Inferior

PCS - Poder Calorífico Superior

Q_R - calor absorvido no calorímetro

R - velocidade de secagem

R_c - velocidade constante

T - temperatura de bulbo seco

TGA - Análise termogravimétrica

t_c - teor de cinzas

t_{cf} - Teor de carbono fixo

t_v - Teor de voláteis

T_w - temperatura de bulbo úmido

URE - Umidade relativa de equilíbrio

X_c - umidade crítica

λ_w - calor latente de vaporização na temperatura de bulbo úmido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

2 OBJETIVOS 16

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 16

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17

3.1 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS E AGRÍCOLAS 17

3.2 BANANICULTURA 19

3.3 BIOMASSA 22

3.3.1 Definição para fins energéticos 22

3.3.2 Consumo e sustentabilidade da biomassa 23

3.3.3 Biomassa como combustível sólido: Pesquisas mais recentes 25

3.3.4 Caracterização da biomassa 25

3.3.4.1 Composição elementar 26

3.3.4.2 Composição Imediata 27

3.3.4.3 Poder Calorífico 28

3.3.4.4 Análise termogravimétrica 29

3.3.5 Torrefação da biomassa 29

3.4 PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS – BRIQUETES. 30

3.4.1 Definição e Normatização 30

3.4.2 Fatores que influenciam o processo de briquetagem: Condições ideais 33

3.4.2.1 Efeito da Temperatura e tempo de compactação 33

3.4.2.2 Efeito da Pressão 34

3.4.2.3 Efeito da Umidade 34

3.4.2.4 Efeito do tamanho das partículas 34

3.4.2.5 Efeito dos ligantes 35

3.4.3 Importância da escolha do resíduo 36

3.5 PRÉ-TRATAMENTO PARA BRIQUETAGEM 36

3.5.1 Umidade e Aw 36

3.5.2 Secagem 38

3.5.2.1 Curva de secagem e Taxa de secagem 40

3.5.2.2 Modelo cinético de secagem 42

4 MATERIAIS E MÉTODOS 43

4.1 MATERIAIS 43

4.2 METODOLOGIA 43

4.2.1 Trituração dos resíduos 43
4.2.2 Prensagem 44
4.2.3 Caracterização dos resíduos e análise de amostras secas 44
4.2.3.1 Análise química imediata 45
a- Determinação do teor de umidade 45
b- Determinação do teor de voláteis 45
c- Determinação do teor de cinzas 46
d- Determinação do teor de carbono fixo 46
4.2.3.2 Análise química elementar 46
4.2.3.3 Densidade aparente e Densidade Energética 47
4.2.3.4 Poder calorífico 47
4.2.4 Experimentos de secagem 48
4.2.4.1 Obtenção das curvas de secagem 49
4.2.4.2 Obtenção e estudo das curvas de taxa de secagem 49
4.2.5 Experimentos de briquetagem 51
4.2.5.1 Distribuição Granulométrica 51
4.2.5.2 Confecção dos briquetes 51
4.2.5.3 Análise de Poder calorífico dos briquetes 53
4.2.5.4 Análise termogravimétrica dos briquetes 53
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 54
5.1 TRITURAÇÃO DOS RESÍDUOS NO CAMPO 54
5.2 PRENSAGEM DOS RESÍDUOS IN NATURA 54
5.3 ANÁLISES QUÍMICAS 56
5.3.1 Análises Químicas Imediatas 57
5.3.2 Análises químicas elementares 60
5.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SECAGEM 62
5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA BRIQUETAGEM 80
5.5.1 Avaliação da densidade dos resíduos antes e após briquetagem 82
5.5.2 Análises térmicas 85
5.5.2.1 Avaliação do poder calorífico superior dos resíduos antes e após briquetagem 85
5.5.2.2 Avaliação da Densidade Energética dos resíduos antes e após briquetagem 87
5.5.2.3 Análises termogravimétricas (TGA) 88
6 CONCLUSÃO 96

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 98

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 99

1 INTRODUÇÃO

A banana (*musa sp.*), fruta consumida em quase todas as regiões do mundo, é cultivada na maioria dos países tropicais. Além de saborosa, constitui uma importante fonte nutricional, contendo vitaminas (A, B e C), minerais (Ca, K e Fe) e fibras. Segundo dados de 2013 da FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO), em 2011 foram cultivados no mundo 5,16 milhões de hectares de banana e produzidas mais de 106,54 milhões de toneladas da fruta, o que representa um aumento de 12% na produção mundial no ano de 2011, em relação à última pesquisa feita no ano de 2008, onde a produção global foi de aproximadamente 93,39 milhões de toneladas.

No Brasil, a banana tem grande importância econômica, destacando-se como a segunda fruta em área colhida, quantidade produzida, valor da produção e consumo. Ainda segundo a FAO (2013), somente no ano de 2011 foram produzidas no Brasil 7,33 milhões de toneladas da fruta, o que representa 6,9% da produção mundial total, concedendo ao país a quinta colocação entre os maiores produtores de banana do mundo, sendo a Índia o maior produtor (27,8%), seguido da China (10,0%), Filipinas (8,6%) e Equador (7,0%).

Segundo dados disponibilizados pela Empresa de Alimentos Waldemar Ardnt (Tipikus), localizada no município de Garuva em Santa Catarina e produtora de banana passa e doces a base de banana; para cada tonelada de banana colhida, são gerados aproximadamente 4 toneladas de resíduos, incluindo cascas, engaços, folhas, pseudocaules e frutos rejeitados. Estes resíduos possuem em sua composição aproximadamente 90% de sólidos voláteis e em torno de 10% de sólidos totais, representados em sua fração orgânica por açúcares, hemicelulose, celulose e lignina. Em função de suas características físicas e químicas, principalmente os altos teores de material orgânico volátil e os baixos teores de cinzas, nitrogênio e enxofre, os resíduos da bananicultura possuem um alto potencial para geração de produtos combustíveis, assim como ocorre com outras biomassas com composição semelhante, como o bagaço da cana, a casca de arroz, a palha do milho e a palha de soja, que hoje já se encontram inseridos dentro da matriz energética brasileira (FERNANDES, 2012).

A produção de biomassa no Brasil tem grande potencial de aproveitamento, tanto para a geração de energia elétrica, quanto para outras formas de produção de energia derivada da biomassa celulósica. Torna-se então relevante o desenvolvimento de uma indústria tecnológica voltada para o aproveitamento destes potenciais. Além do potencial energético, outros fatores que se destacam na utilização de biomassa é a redução do uso de combustíveis fósseis, o aproveitamento e/ou reaproveitamento dos recursos naturais e humanos, e as possibilidades de geração de emprego, renda e qualidade de vida (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007).

Apesar de ser uma alternativa mais ecologicamente viável que a utilização de combustíveis fósseis, a queima pura e simples da biomassa pode gerar vários problemas, tanto de caráter operacional quanto de caráter econômico e ambiental.

Faz-se então necessária a aplicação de métodos de conservação e preparo da biomassa, a exemplo da secagem e briquetagem, que oferecem vantagens importantes na reutilização ou no tratamento desses resíduos. A secagem promove a redução da atividade de água no produto, diminuição da carga microbiana, redução do volume ocupado e consequente facilidade de manuseio e transporte. A briquetagem por sua vez, compacta esses resíduos (em geral suas partículas), dando origem ao que se denomina briquetes, com qualidade bastante superior a do material antes de ser briquetado (1,00 m³ de briquetes contém pelo menos 5 vezes mais energia que 1,00 m³ de resíduos) (QUIRINO e BRITO, 1991).

Avaliar a influencia de diferentes parâmetros, como: granulometria, composição química, pressão de compactação e temperatura de briquetagem é de grande relevância para o desenvolvimento de um processo adequado de produção de briquetes com alto desempenho durante a combustão. Além disso, as análises dos componentes químicos, a avaliação do comportamento dos materiais vegetais durante a secagem e a avaliação do poder calorífico do produto gerado (briquete) são essenciais aos estudos de modelagem e otimização dos processos de conversão termoquímica em escala industrial, o que viabiliza a implantação e uso da tecnologia de aproveitamento da biomassa.

Ao investigar a composição química dos diferentes resíduos da bananicultura (folha, pseudocaule, engaço, fruto e coração) o presente trabalho buscou correlacionar estas informações com a capacidade térmica dos materiais estudados. Através do estudo das curvas de secagem e modelagem matemática, foi possível estimar parâmetros importantes para a otimização do processo de secagem, como coeficientes de transferência de massa e calor, e que contribuem para a implantação de processos industriais de aproveitamento de biomassa.

Por fim, ao promover a investigação da metodologia para produção de briquetes a partir dos diferentes resíduos da bananicultura, com avaliação de suas propriedades térmicas, o trabalho propõe uma alternativa para o aproveitamento e agregação de valor aos resíduos, destacando seu potencial como biomassa para geração de energia, viabilizando assim a consolidação de um sistema agro econômico sustentável.

2 OBJETIVOS

Foi objetivo geral deste trabalho avaliar a possibilidade de utilização dos resíduos da bananicultura (folha, pseudocaule, engaço, fruto e coração) como fonte alternativa para geração de energia, através da investigação das propriedades químicas e termoquímicas dos materiais, assim como do preparo da biomassa e emprego da tecnologia de briquetagem.

2.1 Objetivos Específicos

Foram objetivos específicos deste trabalho:

- Caracterizar os diferentes tipos de resíduos gerados pela bananicultura (folha, pseudocaule, engaço, fruto e coração), a fim de avaliar o potencial de aplicação dos mesmos como combustível sólido. Determinação de composição química elementar, composição química imediata e poder calorífico.
- Estudar a secagem de cada parte da bananeira em diferentes condições de temperatura (70, 105 e 120°C), empregando estufa de circulação forçada de ar, como pré-tratamento da biomassa para briquetagem. Obtenção das curvas de secagem.
- Realizar modelagem matemática utilizando os dados experimentais de secagem para determinação de parâmetros que descrevem o comportamento de secagem como: difusividade (D_{ef}), coeficientes convectivos de transferência de massa (k_m) e calor (h_c).
- Avaliar metodologia de preparo da biomassa para produção de briquetes, a saber:

  a) Prensagem do material in natura triturado;

  b) Secagem do material prensado (5 a 12% de umidade final);

  c) cominuição do material seco (5 a 10mm de granulometria final);

  d) formulação de blend;

  e) briquetagem dos materiais.
- Caracterizar os diferentes briquetes produzidos quanto seu potencial térmico, a saber: poder calorífico e análise de TG.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos agroindustriais e agrícolas

O Brasil possui uma série de vantagens que o qualificam a liderar a agricultura em escala mundial. Pelo fato de o país se localizar predominantemente nas faixas tropical e subtropical, possui as regiões mais propensas à produção de biomassa do mundo, recebendo durante todo o ano intensa radiação solar. Além disso, o país tem ampla biodiversidade e ainda possui um quarto das reservas de água doce do planeta (OLIVEIRA e RAMALHO, 2006).

Pelos motivos supracitados, o Brasil lidera a produção e exportação de vários produtos agropecuários. É o primeiro produtor e exportador de café, açúcar, etanol de cana-de-açúcar e suco de laranja. O país ainda lidera o ranking das vendas externas do complexo da soja, que são o farelo, o óleo e o grão (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA). A exemplo da aplicação industrial do produto agrícola está a cadeia produtiva do etanol, reconhecida como a mais eficiente do mundo, inclusive devido ao aproveitamento dos resíduos gerados do processamento da cana de açúcar como combustível de queima (OLIVEIRA e RAMALHO, 2006).

Neste contexto, as definições de resíduos agrícolas e agroindustriais se tornam importantes uma vez que são, respectivamente, os materiais restantes das colheitas e das produções agrícolas que ocorrem no campo e restos do beneficiamento e processamento industrial das matérias primas agropecuárias.

No caso dos resíduos agrícolas, sua retirada do terreno deve ser feita de maneira racional, uma vez que contribuem para a proteção do solo, fornecendo nutrientes e evitando perda de umidade e erosão. Por outro lado, seu acúmulo pode causar problemas ambientais. A quantificação dos resíduos agrícolas é feita com base nos “índices de colheita”, que é a relação entre a biomassa gerada por hectare plantado de uma determinada cultura e a quantidade de produto economicamente aproveitável (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007). A **Tabela 1** ilustra a disponibilidade de biomassa associada a diferentes tipos de resíduos gerados no Brasil.

Segundo o MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2007), a oferta de biomassa deve dobrar até 2020 e quase triplicar até 2030, Isso demonstra não só o potencial para aproveitamento destes resíduos, mas também a necessidade de desenvolvimento, no campo, de manejo economicamente viável para utilização destes resíduos.

Os resíduos agrícolas por serem aqueles que ainda se encontram no campo necessitam de investimentos em exploração, produção, transporte e maquinário para a recuperação da biomassa, viabilizando a sua transformação em energia. Já os resíduos agroindustriais como o bagaço de cana-de-açúcar e a casca de arroz, já se encontram

concentrados em unidades industriais, sendo assim mais facilmente aproveitados para gerar energia de forma eficiente.

Tabela 1: Oferta de biomassa por resíduo agrícola e agroindustrial no Brasil (10^6 toneladas/ano).

	2005	2010	2015	2020	2030
Total	538	706	868	1023	1354
Resíduos agrícolas	478	634	768	905	1,196
Soja	185	251	302	359	482
Milho	176	251	304	361	485
Arroz (palha)	57	59	62	66	69
Cana-de-açúcar (palha)	60	73	100	119	160
Resíduos agroindustriais	60	72	100	118	158
Cana-de-açúcar (bagaço)	58	70	97	115	154
Arroz (casca)	2	2	3	3	3

Fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2007).

Com o intuito de demonstrar a importância do conteúdo energético primário dos resíduos agrícolas e agroindustriais dentro da matriz energética brasileira, a **Tabela 2** apresenta estes dados em milhões de barris equivalentes de petróleo por dia (bep/dia).

Tabela 2: Conteúdo energético por resíduo agrícola e agroindustrial no Brasil (10^6 bep/dia).

	2005	2010	2015	2020	2030
Total	4,02	5,27	6,49	7,63	10,11
Resíduos agrícolas	3,54	4,7	5,71	6,71	8,88
Soja	1,25	1,69	2,03	2,41	3,24
Milho	1,43	2,05	2,48	2,94	3,95
Arroz (palha)	0,42	0,43	0,46	0,48	0,51
Cana-de-açúcar (palha)	0,44	0,53	0,74	0,88	1,18
Resíduos agroindustriais	0,48	0,57	0,78	0,92	1,23
Cana-de-açúcar (bagaço)	0,46	0,55	0,76	0,9	1,21
Arroz (casca)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2007).

Pode-se observar pela **Tabela 2**, que a previsão de energia gerada para 2015 somente utilizando os resíduos agrícolas produzidos neste ano pode chegar ao equivalente a 5,7 milhões de bep/dia, valor altamente expressivo uma vez que ultrapassa em mais de duas vezes a quantidade de barris de petróleo produzidos diariamente no Brasil em 2012 (2,2 milhões de bep/dia). Entretanto, esses valores representam os resíduos que ainda estão no campo, sendo, portanto, necessários os investimentos em transporte e processamento para sua aplicação como combustível (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007).

Estes dados refletem a importância e a necessidade de pesquisas mais aprofundadas em relação ao aproveitamento eficiente destes resíduos, que podem vir a ter uma participação significativa e importante na matriz energética brasileira. A existência de poucos estabelecimentos que viabilizem e impulsionem a utilização e o reaproveitamento dos resíduos agrícolas para fins energéticos são principalmente decorrentes da inviabilidade tecnológica, devido a fatores como falta de equipamentos, dificuldade de transporte e localização descentralizada das culturas. No entanto, estudos específicos podem contribuir e impulsionar a inclusão desse tipo de biomassa como fonte renovável de energia no país.

A biomassa gerada pela cultura da banana é um exemplo de resíduo de grande volume no Brasil, e que ainda pode ser estudado mais detalhadamente, uma vez que não são encontrados na literatura muitos dados referentes ao potencial de uso deste tipo de resíduo como biomassa energética (OLIVEIRA e RAMALHO, 2006).

Segundo KIST et. al. (2012), no ano de 2010 o país possuía uma área de 494,960 hectares de plantação de banana, a segunda fruta mais cultivada no Brasil, atrás apenas da laranja. De acordo com ROSA et. al. (2011), só de pseudocaule são produzidos de 50 a 150 toneladas/hectare/ano, dependendo da variedade plantada. Estes dados apontam a importância da bananicultura em relação ao seu potencial gerador de biomassa, que pode ser utilizado para fins energéticos. Diante disto, a investigação dos diferentes tipos de resíduos gerados por esta cultura, assim como seu potencial gerador de energia, se tornam extremamente relevantes para o aproveitamento adequado destes materiais residuais.

3.2 Bananicultura

A banana é a segunda fruta mais consumida no mundo, com 10,38 kg/hab/ano, atrás apenas da laranja, com 12,83 kg/hab/ano. A população da América do Sul é a maior consumidora, com 21,13 kg/hab/ano, seguida pela da América Central, com 13,9 kg/hab/ano, e da Oceania, com 11,26 kg/hab/ano (FAO, 2013).

Em relação à produção, a fruta constitui o quarto produto alimentar mais produzido no planeta, precedido pelo arroz, trigo e milho, sendo em muitos países, como na Costa Rica, Honduras e Panamá, a principal fonte de renda e geração de emprego para parte expressiva da população (CENTRO DE SOCIOECONOMIA E PLANEJAMENTO AGRÍCOLA, 2009).

Consumida amplamente por ser um alimento saboroso, a banana ainda é uma fonte importante de nutrientes tais como vitaminas (A, B e C) e minerais (Ca, K e Fe), além de possuir baixos teores calóricos (de 90 a 120 kcal/100g) e de gordura (0,37 a 0,48 g/100g). Seu material sólido é formado principalmente de carboidratos (23 a 32 g/100g), proteínas (1,0 a 1,3 g/100g) e gorduras, tendo ainda aproximadamente 70% de água em sua composição (BORGES e SOUZA, 2004).

Alguns aspectos contribuem para que a banana continue sendo uma das frutas mais comercializadas no mundo: a facilidade de propagação, o bom rendimento por hectare, o fato de ser uma cultura de ciclo curto, de produção contínua, de fácil manipulação quando verde, além do fácil armazenamento e da maturação acelerada (CENTRO DE SOCIOECONOMIA E PLANEJAMENTO AGRÍCOLA, 2009).

A bananeira é um vegetal herbáceo completo, pois, como mostra a **Figura 1**, apresenta caule, raízes, folhas, flores, frutos e sementes (SOFFNER, 2001).

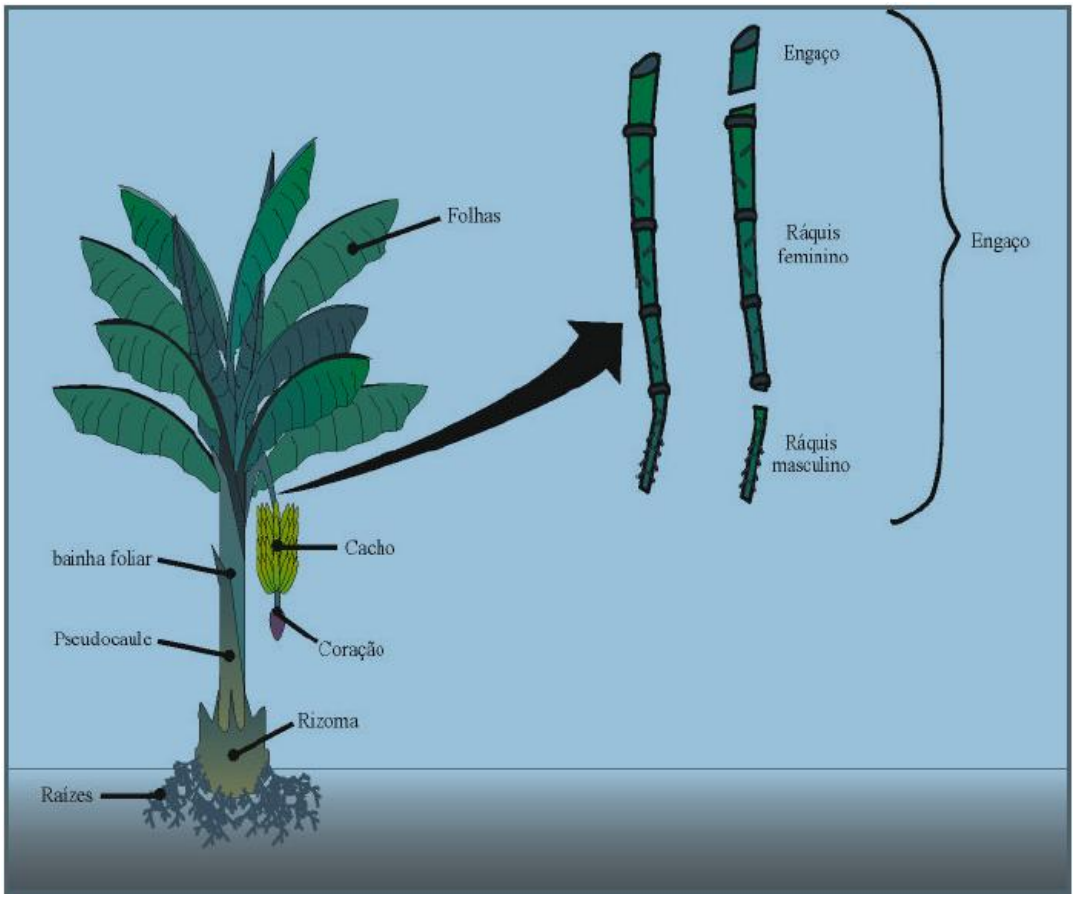


Figura 1: Partes da bananeira

Fonte: SOFFNER (2011)

Como todas as plantas, tem um ciclo de vida definido. Após a colheita do cacho costuma-se cortar o pseudocaule que deu o fruto, retirando a bananeira mãe e dando espaço para o crescimento dos filhotes, que produzirão novos frutos. Sendo assim, toda planta nasce, cresce, produz o fruto e então morre (BASTOS, 2010).

A bananeira é uma planta tipicamente tropical, exigente em temperaturas elevadas e em água, necessitando assim de precipitação bem distribuída ou algum método de irrigação, além de disponibilidade de umidade no solo, o que influencia na produtividade da cultura (GOMES et. al.; 2009).

As variedades de bananeira mais difundidas no Brasil são a Prata, Pacovan, Prata Anã, Maçã, Mysore, Terra e D'Angola distribuídas somente ao mercado interno. A Nanica, Nanicão e Grande Naine são usadas principalmente para exportação e são preferencialmente utilizadas na industrialização. Dentre elas, a Prata, a Prata Anã e a Pacovan são responsáveis por aproximadamente 60% dos hectares cultivados em todo o país (GOMES et. al; 2009).

No ano de 2010, a banana foi a fruta mais produzida no mundo, com 138,8 milhões de toneladas. A **Tabela 3** classifica as principais frutas produzidas no mundo, onde se destacam a banana, melancia, maça, laranja e a uva, que juntas corresponderam a 60,8% do volume total da fruticultura mundial, o equivalente a 728,4 milhões de toneladas (ANDRADE, 2012).

Tabela 3: Principais frutas produzidas no mundo em 2010

Frutas	Produção (milhões toneladas)	Produção (%)
Banana	138,8	19,0
Melancia	99,2	13,6
Maça	69,5	9,5
Laranja	68,3	9,4
Uva	67,1	9,2
Demais Frutas	285,9	39,2
TOTAL	728,4	100,0

Fonte: Andrade (2012)

No Brasil, a banana é a segunda fruta mais cultivada, ficando atrás somente da Laranja. Como pode ser observado na **Tabela 4**, o volume de produção da fruta no ano de 2012 foi de aproximadamente 6,9 milhões de toneladas segundo projeções da ANDRADE (2012). O país é atualmente o quinto maior produtor mundial, após Índia, Filipinas, China e Equador (FAO, 2013).

Tabela 4: Principais frutas produzidas no Brasil em 2012

Frutas	Produção (toneladas)	Produção (%)
Laranja	19,032,285	45,07
Banana	6,943,404	16,44
Abacaxi	3,176,593	7,52
Uva	1,455,081	3,45
Maça	1,338,270	3,17
Demais Frutas	11,982,518	28,38
TOTAL	42,223,871	100

Fonte: ANDRADE (2012)

Segundo o INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2012), a região Nordeste é a principal produtora, com 38,5% da produção do ano de 2011 e o estado de Minas Gerais o quarto maior produtor, atrás de São Paulo, Bahia e Santa Catarina, assumindo a primeira, segunda e terceira posição respectivamente.

No entanto, devido à falta de cuidados durante a comercialização, as perdas chegam a 40% do total de bananas produzidas nas regiões Norte e Nordeste do país, onde a estrutura de colheita, transporte e embalagem são menos desenvolvidas. Nas regiões sul e sudeste as perdas são menores, estando em torno de 5% na lavoura, mais de 2% no processo de embalagem, de 6 a 10% no varejo e 5 a 8% de perda no consumo final (CORDEIRO, 2003).

O maior problema da produção da banana não se encontra somente nas perdas de produção, mas principalmente nos resíduos gerados por ela. Segundo FERNANDES et. al. (2011), em uma empresa de alimentos, para cada tonelada de banana colhida, 4 toneladas de resíduos lignocelulósicos são gerados, aproximadamente. Ainda segundo FERNANDES et. al. (2011), o psedocaule representa a maior parte desse total, gerando em torno de 3 toneladas de resíduos. As folhas geram aproximadamente 480 kg de resíduos, as cascas 440 kg, o engaço 160 kg e os frutos rejeitados 100 kg.

Esse grande volume de resíduo que tem alto potencial fibroso pode ser utilizado no solo como cobertura morta para manter sua umidade e evitar a erosão, retornando ainda nutrientes às plantas e minimizando custos com adubação. No entanto, o que não é utilizado, além de acarretar custos com transporte, pode acabar contribuindo para a geração de problemas ambientais e fitossanitários, como a proliferação de insetos e desenvolvimento de microrganismos biodegradadores (SOFFNER, 2001).

Diante do exposto, nota-se que a cultura da banana é uma fonte abundante de biomassa, pela composição e volumes gerados dos resíduos. Sendo assim, estudos e pesquisas que proponham definir aplicações através da valorização desses resíduos são de grande relevância para o estabelecimento de uma agricultura sustentável.

3.3 Biomassa

3.3.1 Definição para fins energéticos

Biomassa é qualquer matéria orgânica passível de ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica, pois esses resíduos ainda mantêm algum potencial energético. A biomassa pode ser de origem florestal, se derivada da pós-colheita da madeira, de origem agrícola, se derivada da colheita de soja, arroz, cana-de-açúcar, e outros resíduos, ou de origem de rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos), como o lixo (AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008). No entanto se estes resíduos

forem dispostos na natureza sob a forma bruta, podem gerar sérios impactos à natureza devido à liberação de altas cargas carbonáceas (BLEY JR. et. al., 2009).

Existe um grande número de tecnologias de conversão energética da biomassa adequadas para aplicações em pequena e grande escala. Uma dessas tecnologias inclui a utilização da energia do biogás da degradação anaeróbica em aterros sanitários, estações de tratamento de esgoto, e terrenos de tratamento de estrume. Outra tecnologia utiliza a biomassa para produção de biocombustíveis (etanol e biodiesel) e solventes para diferentes aplicações. O etanol no Brasil é obtido através da cana-de-açúcar, sendo também produzido em escala comercial a partir do milho nos Estados Unidos. Outros métodos de produção de energia incluem a combustão de biomassa e de produtos derivados da recuperação desses resíduos (GOLDEMBERG, 2009).

Sendo assim, a biomassa pode gerar combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. Todas estas formas de energia têm demonstrado sua importância no desenvolvimento econômico e social, estando intimamente ligadas a muitos aspectos da vida moderna (COUTO et. al., 2004).

Logo, o estudo para a utilização dos resíduos da bananicultura como biomassa para geração de energia mostra-se relevante, sendo objetivo deste trabalho contribuir para o desenvolvimento de tecnologia que viabilize o emprego dos resíduos da banana como combustíveis sólidos para geração de energia.

3.3.2 Consumo e sustentabilidade da biomassa

Segundo o BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (2012), a energia gerada pelas fontes renováveis, no ano base de 2011, estava distribuída entre a biomassa da cana (15,7%); a energia hidráulica e a eletricidade (14,7%); a lenha e o carvão vegetal (9,7%) e outras fontes renováveis (4,1%). Enquanto dentre as fontes não renováveis se encontravam o petróleo e derivados (38,6%); o gás natural (10,1%); o carvão mineral (5,6%) e o urânio (1,5%). É inegável a demanda mundial pela substituição dos combustíveis fósseis como matriz energética, não só pela escassez futura dos mesmos, mas também pela necessidade de tornar a industrialização mais sustentável.

Sendo assim, caminhando em direção à tendência, no Brasil, pesquisas nesta área estão sendo feitas, não só para produção de biocombustíveis líquidos como o biodiesel e o etanol, mas também a fim de viabilizar a produção de biocombustíveis sólidos, como os briquetes. Dentre estas pesquisas, pode-se citar a utilização de diversos tipos de biomassa para a produção de briquetes, dentre elas: Acícula de araucária (Araucaria angustifolia), acícula de pinus (Pinus sp.), folha do coqueiro (Cocos sp.), serragem nativa (resíduos de diversas espécies nativas), serragem de pinus (Pinus sp), serragem de eucalipto

(Eucalyptus sp.); bagaço de cana de açúcar (Saccharum officinarum) e capim elefante (Pennisetum sp) (YAMAJI et. al., 2013).

Apesar de alguns avanços, ainda são necessários estudos sobre a utilização dos diferentes resíduos de biomassa produzidos no Brasil, para avaliar se seu potencial de recuperação é economicamente viável. É preciso também realizar análises completas de seus ciclos de vida como produtos energéticos. Além disso, é preciso limitar os impactos negativos advindos dessa nova tecnologia. Não se tem muita informação sobre estes parâmetros, uma vez que, até agora, o interesse pela utilização da biomassa residual como produto energético não tem sido muito grande e nem diversificada. Porém, estudos neste sentido devem ser desenvolvidos frente às expectativas da valorização destes resíduos para diversas aplicações sustentáveis (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007).

Nos países em desenvolvimento, a biomassa é a fonte de energia mais importante, representando aproximadamente 33% do total da energia consumida, os habitantes desses países representam nada menos que três quartos da população mundial. Sendo assim, o fato de que, no ano de 2050, aproximadamente 90% da população mundial estará vivendo em países em desenvolvimento sugere grande presença da biomassa como fonte de obtenção de energia (ROSILLO-CALLE et. al, 2005).

No cenário nacional, houve pequena redução na participação das energias renováveis na matriz energética brasileira em 2012, refletindo a queda na safra de cana-de-açúcar. Ainda assim, a porcentagem de energias renováveis manteve-se no alto patamar de 44,1%, entre as mais elevadas do mundo e estando muito acima da média mundial de 13,3% (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2012). Estes dados mostram o quanto necessita-se aprimorar e aplicar de forma eficiente os resíduos agroindustriais como opção de biomassa para fins energéticos. A dependência da biomassa de cana claramente limita o potencial energético renovável que o país possui.

Sendo assim, a investigação por diferentes resíduos gerados no país, com potencial aplicação como biomassa é de extrema relevância.

Tanto no mercado interno quanto no externo a biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos, uma vez que vem reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, através da diversificação da matriz energética (AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Por isso, com intensidade variável, a grande maioria dos países, sejam eles desenvolvidos ou não, estão buscando formas de incluir as energias alternativas renováveis nas suas matrizes energéticas. O motivo é a necessidade de reduzir o uso de derivados do petróleo (combustíveis não renováveis), reduzindo a dependência energética em relação aos países exportadores de petróleo além de contribuir assim, para uma redução na emissão de gases promotores do efeito estufa (CRUZ et. al, 2004).

Ainda segundo CRUZ et. al (2004), outros benefícios gerados pela utilização da biomossa são a capacidade de gerar empregos no meio rural e o balanço próximo a zero entre o lançamento e a absorção de carbonos na atmosfera. Esses fatores beneficiam a sociedade em dois aspectos de grande relevância, o impacto ambiental e a inclusão social.

Diante disto, o estudo do aproveitamento dos resíduos da cultura da banana, como fonte de biomassa com potencial energético, se mostra relevante e atual para a diversificação e avanço no desenvolvimento da matriz energética sustentável do país.

3.3.3 Biomassa como combustível sólido: Pesquisas mais recentes

Nos últimos anos a pesquisa em torno da biomassa energética vem tomando cada vez mais importância, principalmente devido ao seu apelo sustentável aliado a geração de energia, um bem indispensável ao mundo de hoje. Uma das principais formas de geração de energia através da biomassa é a combustão direta da biomassa in natura ou densificada. Para tal, características químicas e térmicas dos mais variados tipos de biomassa vêm sendo estudadas.

Dentre estes estudos é possível apontar o trabalho de alguns autores como VASSILEV et. al. (2010), que estudou 86 diferentes biomassas, estabelecendo correlações e associações entre as características químicas destas biomassas.

Outros estudos, como o realizado por EROL et. al. (2009) relaciona a composição química aproximada de 20 diferentes biomassas ao seu poder calorífico, estabelecendo novas correlações entre o conteúdo de cinzas, voláteis, carbono fixo e umidade da amostra à quantidade de energia que pode vir a ser gerada pela mesma.

Outros estudos que vêm se destacando são a respeito da biomassa originária da extração de diversos tipos de óleos para a produção de briquetes. A torta da canola, da semente de algodão, da azeitona, da palma e do girassol são alguns exemplos de resíduos que estão sendo objeto destes estudos. Em alguns casos, a resistência dos briquetes originários destas biomassas é influenciada negativamente, devido à oleosidade ainda presente nas tortas. Em outros casos, essa questão pôde ser superada através da formulação de blends destes resíduos com biomassa livre de oleosidade, possibilitando assim o uso da mesma como briquetes para geração de energia (ALARU, 2011; COATES, 2000; HUSAIN, et. al., 2002; STOLARSKI et. al., 2013 e YAMAN et. al., 2000).

3.3.4 Caracterização da biomassa

Para se determinar o potencial de geração de energia de um combustível, deve-se conhecer suas características químicas e térmicas fundamentais. Essas características são a composição elementar (o conteúdo em porcentagem de massa de carbono, hidrogênio,

enxofre, oxigênio e nitrogênio), composição imediata (conteúdo em porcentagem de massa de carbono fixo, voláteis, umidade e cinzas) e poder calorífico (CORTEZ et. al., 2008).

3.3.4.1 Composição elementar

São poucas as espécies que possuem sua composição química precisa publicada na literatura principalmente devido à composição complexa da biomassa vegetal. Sendo assim, utiliza-se a análise elementar para obter os percentuais mássicos de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S) contidos na amostra da biomassa combustível (RENDEIRO E NOGUEIRA, 2008). A composição elementar é uma das características técnicas mais importantes da biomassa empregada como combustível, uma vez que os teores elementares estão intimamente relacionados com a capacidade energética de cada biomassa.

Segundo PROTÁSIO et. al. $(2011)_1$, altos teores de carbono e hidrogênio e baixos teores de oxigênio são desejáveis quando a biomassa é utilizada como fonte de energia devido às correlações existentes entre esses componentes elementares e o poder calorífico, se fazendo aí a importância da quantificação dos mesmos.

O carbono e o hidrogênio liberam grandes quantidades de energia durante a combustão, sendo assim, altos teores destes elementos são indicativos de uma boa capacidade térmica (PARIKH et. al., 2005; RAMOS e PAULA et. al., 2011).

Já elevados teores de nitrogênio não são desejáveis, já que quanto maiores estes teores, maior é a formação de compostos prejudiciais ao meio ambiente como os óxidos de nitrogênio tóxico, formado durante a combustão, que podem ainda reagir com compostos da atmosfera, aumentando o risco da formação de ácido nítrico, ocasionador da chuva ácida. Outra preocupação em relação ao teor de nitrogênio é que, este elemento pode interferir na capacidade térmica do material combustível, uma vez que compete com o carbono durante a combustão MANALULA e MEINCKEN (2009).

Baseando-se nestas informações, RAMOS e PAULA et. al. (2011) caracterizaram diferentes resíduos vegetais quanto a suas composições química imediata e elementar, além da quantificação de seus poderes caloríficos. Os resultados obtidos para a composição química elementar estão apresentados na **Tabela 5**.

De um modo geral, todos os resíduos estudados por este autor apresentaram potencial para serem utilizados como biomassa para a geração de energia, principalmente devido aos altos teores de carbono e hidrogênio e baixos teores de nitrogênio e enxofre. Segundo RAMOS e PAULA et. al. (2011), o teor de oxigênio tem uma correlação negativa com a capacidade energética do material, correlação essa que neste caso foi mais pronunciada somente para a casca de arroz.

Tabela 5: Composição química elementar de resíduos vegetais.

Material	Elementos (%)				
	C	H	N	S	O
Casca de arroz	39,1	5,8	0,3	0,1	54,7
Pergaminho do Grão de Café	47,2	6,9	0,5	0,2	45,1
Vagem de Feijão	41,8	6,5	0,9	0,3	50,5
Palha do milho	44,8	6,8	0,3	0,1	47,9
Serragem	48,2	6,5	0,1	0,2	45,1
Bagaço da Cana-de-açúcar	45,3	6,8	0,5	0,3	47,1

Fonte: RAMOS e PAULA et. al. (2011).

3.3.4.2 Composição Imediata

A análise imediata tem por objetivo identificar os seguintes componentes na amostra: carbono fixo, materiais voláteis e cinzas. Apesar de alguns trabalhos tratarem umidade de forma desvinculada, este estudo tratará o teor de umidade como um dos componentes imediatos, relacionando-os entre si. É importante mencionar que nos casos onde a umidade é desconsiderada na composição do combustível, os dados de composição são oferecidos em base seca (b.s.), e em base úmida (b.u.) quando se inclui o teor de umidade presente no combustível.

Segundo CAPOTE (2012), o poder de queima do biocombustível está intimamente ligado aos teores de umidade e cinzas do mesmo, uma vez que quanto menor o teor de umidade e cinzas, maior o poder de queima. Segundo PARIKH et. al. (2005), apesar de as cinzas serem materiais inertes durante a combustão, podem agir com um efeito diluente no poder calorífico quando se encontram em altas quantidades. Já o carbono fixo, além de contribuir para o aumento da capacidade energética prolonga ainda o tempo de combustão, já que quanto maior o teor de carbono fixo, mais vagarosa é a queima (RAMOS e PAULA, 2011). Outro componente de grande importância são os materiais voláteis, que têm papel fundamental na ignição e combustão da biomassa (VAMVUKA e SFAKIOTAKIS, 2011).

Ainda tomando como base os estudos feitos por RAMOS e PAULA et. al. (2011), a **Tabela 6** apresenta os valores da composição imediata para alguns resíduos vegetais.

Neste estudo todos os resíduos mostraram um bom potencial gerador de energia, sendo que a casca de arroz demonstrou ter o menor potencial calorífico, provavelmente devido aos seus altos teores de cinza e relativamente baixos teores de carbono fixo (RAMOS e PAULA et. al. 2011).

Tabela 6: Composição imediata de resíduos vegetais.

Material	Análises Imediatas (%)		
	Cinzas (b.s.)	Voláteis (b.s.)	Carbono Fixo (b.s.)
Casca de arroz	16,30	66,36	17,30
Pergaminho do Grão de Café	1,46	79,14	19,90
Vagem de Feijão	6,65	76,65	18,10
Palha do milho	1,58	81,68	17,05
Serragem	0,18	78,89	21,03
Bagaço da Cana-de-açúcar	0,80	82,31	17,16

Fonte: RAMOS e PAULA et. al. (2011).

3.3.4.3 Poder Calorífico

O poder calorífico pode ser definido como a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa do combustível em questão (CORTEZ et. al., 2008).

O poder calorífico é classificado em dois tipos: Poder Calorífico Superior (PCS) que é aquele em que a combustão ocorre a volume constante, a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado (QUIRINO et. al., 2005 apud BRIANE & DOAT, 1985); e o Poder Calorífico Inferior (PCI), que só pode ser determinado se for conhecido o Poder Calorífico Superior do combustível e a relação entre as quantidades de átomos de hidrogênio-carbono (H-C) existentes no combustível (RENDEIRO e NOGUEIRA, 2008).

Segundo CAPOTE (2012), o poder calorífico líquido depende de diversos fatores, em especial do tipo de biomassa utilizada e do teor de umidade. Em seus estudos, PROTÁSIO$_1$ et. al. (2011) descrevem a relação direta e positiva entre o poder calorífico e os teores de hidrogênio e carbono, enquanto os teores de oxigênio e cinzas têm uma influencia negativa sobre este mesmo poder calorífico.

Sendo assim, biomassas de diferentes origens têm diferentes valores de poder calorífico. EROL et. al. (2009) estudou 20 diferentes resíduos e obteve valores para o poder calorífico entre 3681,00 e 4662,00 kcal.kg^{-1}. RAMOS e PAULA et. al. (2011), avaliou 7 biomassas de origem agrícola, obtendo valores entre 3812,00 e 4615,00 kcal.kg^{-1} para o poder calorífico superior. Dentre as biomassas mais comumente utilizadas para geração de energia através da combustão estão o bagaço de cana (4274,00 kcal.kg^{-1}), a casca de arroz (3812,00 kcal.kg^{-1}), a casca de café (4544,00 kcal.kg^{-1}) e a serragem (4435,00 kcal.kg^{-1}) (RAMOS e PAULA et. al., 2011).

Dessa forma, a quantificação destas características fundamentais pode ser utilizada na avaliação preliminar de vários tipos de biomassa, uma vez que é possível estabelecer, a partir destas informações, um índice de desempenho energético (IDE) para resíduos

lignocelulósicos (PROTÁSIO$_1$ et. al., 2011) Quanto maior o valor desse índice, melhor será o desempenho dos resíduos lignocelulósicos para produção de bioenergia. O índice de desempenho energético é representado pela **Equação (1)**.

$$\mathrm{IDE} = 0{,}580\mathrm{C} + 0{,}505\mathrm{H} - 0{,}639(\mathrm{O} + \mathrm{A}) \quad (1)$$

Onde O é o teor de oxigênio (% massa), C é o teor de carbono (% massa), H é o teor de hidrogênio (% massa) e A é o teor de cinzas (% massa). Dessa forma, esse modelo pode ser utilizado como uma estimativa para classificar a biomassa quanto seu potencial para produção energética.

3.3.4.4 Análise termogravimétrica

As técnicas termoanalíticas são definidas como métodos nos quais se mede a variação de uma determinada propriedade física de uma amostra em função do tempo ou da temperatura. A análise termogravimétrica é uma das técnicas termoanalíticas onde é medida a perda de massa da amostra em função do tempo, ou em função da temperatura (MARABEZI, 2009).

A partir desta técnica é possível descrever o comportamento térmico de materiais carbonosos, bem como da cinética das reações de decomposição térmica de diferentes combustíveis sólidos. É possível assim obter um “perfil de queima” do material analisado, através da perda do peso em função da temperatura em atmosfera oxidante (GEORGES, 2011).

Estudando quatro tipos de biomassa (Bagaço e Palha de Cana-de-Açúcar, Resíduos de Madeira e Capim Elefante), SEYE et. al. (2003) concluiram em seu trabalho que o método termogravimétrico pode ser utilizado para estimar o teor de lignina presente na biomassa, sendo que uma biomassa com alto teor de lignina pode vir a fornecer um maior rendimento de carvão vegetal.

Conhecer o perfil de queima de diferentes materiais com potencial de uso como biomassa energética é muito importante para definir aplicações mais adequadas, além de contribuir para uma melhor otimização do processo de obtenção de briquetes, por exemplo, com alto desempenho térmico.

3.3.5 Torrefação da biomassa

A torrefação é um tratamento térmico, ao qual a matéria-prima é submetida a temperaturas relativamente baixas, entre 200 e 300°C, na ausência de oxigênio (CHEW e DOSHI, 2011). Segundo BRIDGEMAN et. al. (2007), a torrefação promove o melhoramento das propriedades da biomassa em relação às técnicas de processamento para geração de energia termoquímica, como combustão, co-combustão com carvão ou gaseificação. Apesar

disso é um tratamento que ainda exige uma maior sinergia de resultados e processos mais otimizados.

ARIAS et. al. (2008) observa que na temperatura de torrefação, entre 200 e 300°C, ocorre uma importante perda de massa, primeiramente devido aos componentes mais reativos da hemicelulose, seguindo-se a decomposição dos componentes menos reativos da hemicelulose. Assim, a composição da biomassa é de grande importância e tem alta influência na quantidade final de produtos sólidos e voláteis resultantes após a torrefação. Em relação aos resíduos agrícolas, devido ao seu maior teor de hemiceluloses, sua taxa de conversão é comparativamente maior que a de biomassa lenhosa, resultando na produção de massa inferior (BRIDGEMAN et. al., 2007).

Se comparada com a biomassa não torrificada, a torrificada demonstra características que favorecem o processamento termoquímico, como uma maior friabilidade, um melhor comportamento hidrofóbico e o aumento do potencial energético em razão dos maiores teores de carbono fixo e elementar (CHEW e DOSHI, 2011; PROTASIO et. al., 2012 e STELT et. al., 2011). Apesar disso, briquetes produzidos a partir de biomassas torrificadas apresentam baixa resistência mecânica e densidade energética menor ou igual a de briquetes produzidos a partir de biomassa não torrificada, o que pode ser um indicativo importante da durabilidade e aplicabilidade destes briquetes para geração de energia (GILBERT et. al., 2009 e PROTASIO et. al., 2012).

A torrefação da biomassa é um pré-tratamento promissor, podendo contribuir para sua comercialização como fonte de geração de energia. Apesar disso ainda há necessidade de otimização do processo de torrefação, objetivando a eficiência técnica e econômica e satisfazendo assim as necessidades do mercado (BATIDZIRAI et. al., 2013). Sendo assim, apesar de aumentar consideravelmente os teores de carbono fixo e elementar, o que influencia direta e positivamente no poder calorífico do material em questão, a torrefação como pré-tratamento ainda necessita de estudos que discutam mais detalhadamente sua metodologia e comprovem o seu retorno econômico.

3.4 Produção de biocombustíveis sólidos – briquetes.

3.4.1 Definição e Normatização

A briquetagem é o nome dado ao processo de agregação de pequenas partículas com o uso de prensas de alta pressão, com ou sem aquecimento. As partículas geralmente são prensadas com a adição de ligantes adequados, a fim de formar sólidos de maior valor agregado chamados de briquetes. As prensas de briquetagem mais comuns são as de extrusão e as de rolos compressores (ROSILLO-CALLE et. al., 2005).

A briquetagem é uma forma bastante eficiente de se concentrar a energia disponível na biomassa. QUIRINO e BRITO (1991), consideram que 1,00 m³ de briquetes, contém pelo

menos 5 vezes mais energia que 1,00 m³ de resíduos, levando-se em consideração a densidade a granel e o poder calorífico médio desses materiais.

Sendo assim, a densificação da biomassa, ou seja, o aumento da densidade por compressão possui um reflexo positivo com relação à energia contida na biomassa.

Em estudos realizados por (SRIVASTA et. al., 2014) os briquetes produzidos a partir de resíduos vegetais tiveram sua densidade aparente aumentada entre 10 e 15 vezes, se comparados com os resíduos secos antes da briquetagem. Materias com densidade aparente entre 44,2 e 60 $kg.m^{-3}$, alcançaram valores de 509 a 747 $kg.m^{-3}$ após a briquetagem. Quanto maior a densidade, maior a concentração de energia contida por m^3.

Segundo (MANI et. al, 2006) a densidade do briquete é dependente principalmente da umidade da biomassa e da pressão exercida durante a briquetagem. Em seus experimentos a densidade aparente final dos briquetes variaram de 600 a 950 $kg.m^{-3}$, apenas com a variação destes dois parâmetros.

Segundo RENDEIRO e NOGUEIRA (2008) existem diversas vantagens na utilização dos briquetes para geração de energia, dentre elas:

- A homogeneidade de forma e a granulometria, que regularizam e melhoram a eficiência da queima;
- A redução do espaço necessário ao armazenamento;
- A facilidade de manuseio, transporte, e redução de custos, já que a capacidade integral do transporte passa a ser utilizada.
- Produção em tamanhos padrões: no formato de cilindros ou bolachas, conforme mostra a **Figura 2:**

Figura 2: Briquetes em formato bolacha e cilindro.

Fonte: RENDEIRO E NOGUEIRA (2008).

Fazendo um comparativo com os pellets, sua principal diferença em relação aos briquetes está nas dimensões. Os pellets, normalmente, têm diâmetro entre 6 e 16 mm e comprimento de 25 a 30 mm, enquanto os briquetes têm diâmetro entre 50 e 100 mm e comprimento entre 250 a 400 mm. Porém esses valores podem variar, de acordo com a

demanda do cliente, ou mesmo para atender especificações internacionais, uma vez que no Brasil não há normas específicas para produção e comercialização desse tipo de biocombustível sólido (CHIES, 2012).

Em teoria, os briquetes podem ser feitos de qualquer material orgânico, e por esse motivo a maioria dos produtos usam composições distintas. Pelo fato de a tecnologia ser relativamente nova e a variedade de matéria-prima usada ser grande, não existe uma fórmula certa para se determinar a composição de briquete viável para cada região e cada necessidade. Por isso, para cada novo produto testes abrangentes são necessários para definir a composição apropriada para cada situação (NYER e MATSUMURA, 2011).

Para a formulação do briquete, o ligante é muito importante; ele deve ser altamente aglometente, barato e de fácil manuseio, proporcionando uma intensa resistência mecânica ao briquete. Sua escolha depende ainda do destino final do briquete, sendo muito importante no custo final do produto, uma vez que o ligante é normalmente mais caro que a matéria-prima (ROSILLO-CALLE et. al., 2005).

A lignina, entre outros compostos ligantes já presentes na biomassa, pode começar a ceder suas ligações entre 100 e 190 ºC, nesse caso ela pode agir como uma cola entre as partículas, sendo ativada pela alta temperatura e altas pressões alcançadas nos processos de compactação (FILLIPPETO, 2008). Por este motivo materiais ricos em compostos celulósicos podem vir a dispensar a adição de um ligante durante a briquetagem.

Investigações a respeito da utilização da casca de banana como ligante têm tido êxito em pesquisas conduzidas em Ruanda, através da Universidade de Nottingham e no norte da Tailândia, pela Universidade de Naresuan. Estudos mais detalhados continuam sendo feitos a fim de compreender melhor a viabilidade potencial do estudo (NYER e MATSUMURA, 2011).

Segundo CAPOTE (2012) o desenvolvimento da normatização de briquetes no Brasil é recente, por isso a caracterização de briquetes para fins energéticos vem se tornando cada vez mais importante, o que vem a favorecer sua melhor aplicação doméstica ou industrial. Nesse aspecto, o mercado europeu se destaca, uma vez que em certas regiões já foram criadas normas oficiais, com o objetivo de garantir uniformidade em benefício ao consumidor. Essas normas oficiais foram elaboradas e implementadas isoladamente em países como Áustria, Alemanha e Suécia, porém já existe um movimento de uniformização das mesmas em todo o continente, através do Comitê Europeu de Normalização (CEN) (CHIES, 2012). Uma das principais normas Europeias é a norma Sueca SS 18 71 21, para briquetes de madeira. A **Tabela 7** demonstra especificações dessa norma com relação às principais propriedades desses compactados (GENTIL, 2008).

Além dos resíduos de madeira podem ser utilizados como biomassa para briquete o bagaço de cana de açúcar, a palha de milho, a casca de arroz, entre outros resíduos

florestais, urbanos e da agroindústria. Pode-se dizer que são características ótimas de um briquete em relação à composição, estrutura e capacidade de geração de energia: poder calorífico superior a 4585 kcal.kg $^{-1}$; densidade de 1,2 g.cm $^{-3}$; umidade de 12%; carbono fixo de 14%; sólidos voláteis de 84% e cinzas de 2% (RENDEIRO e NOGUEIRA, 2008).

Tabela 7: Norma sueca para briquetes SS 18 71 21

Propriedade	Unidade	Grupo1	Grupo2	Grupo3
Dimensão (diâmetro)	mm	min. 25	min. 25	min. 25
Dimensão (comprimento)	mm	max. 300	max. 100	-
Densidade a granel	kg.m^{-3}	>550	>450	>450
Teor de Umidade	%b.u.	≤12	≤12	≤15
Teor de Cinzas	%m.s.	≤15	≤15	-
Poder Calorífico Útil	kcal.kg^{-1}	≥3869	≥3869	-

Fonte: Adaptado pelo autor HISMARK (2002), citado por GENTIL (2008).

A determinação das propriedades de cada briquete pode facilitar sua utilização e evitar riscos, como por exemplo, o alto teor de cinzas em briquetes, que podem se fundir em caldeiras, formando incrustações, corrosão e consequentemente diminuir a potencialidade da produção energética e emitir poluentes (CAPOTE, 2012).

As variáveis que podem influir nas propriedades do produto compactado são tanto propriedades da matéria-prima, como tamanho das partículas, teor de umidade, densidade aparente, quanto as variáveis do processo de compactação, como pressão, temperatura e uso de ligantes (FILLIPPETO, 2008).

A temperatura de compactação exerce uma função relevante nas propriedades finais do produto e no consumo energético durante a compactação, uma vez que através do aquecimento é possível se obter um produto mais estável de menores dimensões. Já a aplicação de pressão, auxilia os ligantes naturais da biomassa, tais como amido, proteína, lignina e pectina, contribuindo para a interligação e coesão de suas partículas. Em relação ao ligante, sua principal função é garantir resistência mecânica à biomassa compactada, mas deve também, conferir resistência térmica ao produto final (CHIES, 2012).

3.4.2 Fatores que influenciam o processo de briquetagem: Condições ideais

3.4.2.1 Efeito da Temperatura e tempo de compactação

A temperatura de compactação exerce uma função relevante nas propriedades finais do produto. Segundo estudos realizados por RAMOS e PAULA et. al. (2011), o tempo e a temperatura de prensagem interferiram na resistência mecânica dos briquetes, sendo que o melhor tempo de prensagem foi de 8 minutos e a temperatura de 125°C para cascas de arroz, resíduos do milho, da cana-de-açúcar, do milho, da soja do feijão e do café.

3.4.2.2 Efeito da Pressão

Segundo MANI et. al. (2006), a densidade final do produto tende a aumentar consideravelmente com o aumento da pressão. O mesmo resultado foi encontrado por WILAIPON (2009) para briquetes feitos a partir de casca de banana.

O aumento da pressão tem influência contrária sobre o poder calorífico em materiais com maior conteúdo de extrativo voláteis, uma vez que em consequência do aumento da temperatura e da pressão durante o processo de briquetagem ocorre a perda de voláteis para o meio (FURTADO et. al., 2010).

No estudo feito por FURTADO et. al. (2010), avaliou-se a utilização de baixa, média e alta pressão de briquetagem. Para tanto, os briquetes foram confeccionados a uma temperatura constante de 120°C à pressão de 50 $kg.cm^{-2}$ durante os dez primeiros minutos; durante os últimos dois minutos as pressões utilizadas foram de nível baixo (65 $kg.cm^{-2}$), médio (95 $kg.cm^{-2}$) e alto (130 $kg.cm^{-2}$). Para o material estudado, biomassa florestal de *Pinus sp*., foi indicada a baixa pressão de briquetagem, pois demandou um menor dispêndio de energia com resultados satisfatórios.

3.4.2.3 Efeito da Umidade

Existe uma faixa ideal de umidade na qual o material pode ser compactado. Um excesso de umidade pode provocar explosões devido à formação de vapor. Ao mesmo tempo, se a umidade for muito baixa a transferência de calor será dificultada e a compactação não será adequada, podendo originar briquetes quebradiços (FILIPPETTO, 2008 e SILVA, 2007). Para GENTIL (2008), o teor de umidade do briquete de biomassa deve estar dentro de uma faixa de 8 a 15%, necessário para a aglomeração das partículas. Para MORAIS (2007), o valor ideal para o teor de umidade das matérias-primas esteve entre 8 e 12%. Já para LI e LIU (2000), o valor mais adequado esteve entre 5 e 12% de umidade para que houvesse eficiência no processo de briquetagem.

Para MANI et. al. (2006), que estudou resíduos da cultura do milho, uma porcentagem de umidade entre 5 a 10% aumentou a durabilidade e estabilidade dos briquetes produzidos, enquanto à 15% de umidade a durabilidade foi comprometida em todas as pressões estudadas. Para os mesmos autores, uma umidade maior que 15% atua lubrificando a biomassa e dificultando a atuação dos ligantes, o que desfavorece adesão das partículas e estabilidade do briquete.

3.4.2.4 Efeito do tamanho das partículas

Segundo MORAIS (2007), diferentes granulometrias facilitam o adensamento das partículas, contribuindo para a coesão. Segundo estudos feitos por GENTIL (2008), outro fator que contribui para a melhor solidificação do produto são pedaços de biomassa mais

longos e estreitos, os quais contribuem na coesão do particulado mais fino e da lignina decomposta no processo.

Em seus experimentos, MORAIS et. al. (2006) contou com granulometrias distintas, de 5 a 10 mm. Segundo FILIPPETTO (2008), a matéria prima ideal deveria ser composta por uma mistura de partículas de vários tamanhos, e a medida máxima depende do tipo de material e do diâmetro da matriz, sendo que geralmente é aceitável uma dimensão entre 8 e 10 mm.

3.4.2.5 Efeito dos ligantes

A principal função do ligante é garantir resistência mecânica à biomassa compactada, mas deve também, conferir resistência térmica ao produto final (CHIES, 2012). Temperaturas de briquetagem acima de 100°C permitem a fluidificação da lignina contida nas células da biomassa, que por consequência age como aglutinante, o que torna desnecessário o uso dos ligantes (FILIPPETTO, 2008 e GONÇALVES et. al., 2009).

Em estudos realizados com o pseudocaule da bananeira, durante o processo de briquetagem não houve necessidade da adição de ligantes, devido à elevação da temperatura promovida pela prensa hidráulica utilizada e consequente plastificação da lignina (MAIA , 2013).

A quantidade necessária à briquetagem varia de acordo com o tipo do aglutinante escolhido. No estudo realizado por GOUVÊA (2012), a adição da lignina Kraft a resíduos florestais, numa proporção de 20%, apresentou vantagens em relação à resistência mecânica dos briquetes, quando utilizado o mesmo ligante a uma concentração de 60%, foi observado que a qualidade físico-química dos briquetes foi prejudicada.

Matérias-primas de origem vegetal têm quantidades variáveis de lignina, que durante a briquetagem se plastificam, promovendo a aglutinação das partículas. RAMOS e PAULA et. al. (2011), durante a caracterização química de resíduos lignocelulósicos da serragem, encontrou valores de 9,37% de extrativo, 21,88% de lignina e 68,57% de holocelulose. Para a marvalha os valores foram de 5,60 de extrativo, 20,62 de lignina e 73,65 de holocelulose, sendo que todos os resíduos possuíam potencial para queima.

Materiais que já são utilizados na matriz energética brasileira como a casca do arroz, o café, a cana de açúcar, a serragem e os resíduos da produção de milho e feijão têm valores de lignina que variam de 9,29% para a palha do milho até 23,04% resíduos da cafeicultura (RAMOS e PAULA et. al., 2011).

Os diferentes resíduos da bananicultura, por apresentarem características diferentes, quando misturados podem apresentar composição adequada para formulação de briquetes de boa qualidade, assim, o estudo de blends pode auxiliar no processo de elaboração de briquetes com melhor desempenho de queima.

3.4.3 Importância da escolha do resíduo

Um dos aspectos mais críticos do processamento da biomassa para produção briquetes com função energética é a identificação dos resíduos apropriados. Os resíduos precisam ser confiáveis e disponívéis durante todo o ano em grandes quantidades. Eles necessitam, também, estar localizados perto do ambiente de produção, a fim de diminuir ou eliminar o custo de transporte (NYER e MATSUMURA, 2011).

Diante do exposto, a utilização dos resíduos da cultura da banana para produção de biomassa briquetada pode ser uma alternativa sustentável para produção de energia. A bananeira produz frutos durante todo o ano, gerando grandes volumes de resíduos que acabam servindo de adubo ao solo ou se tornando prejudiciais quando em excesso.

3.5 Pré-tratamento para briquetagem

A biomassa que vai ser compactada pode exigir um pré-tratamento antes de ser introduzida na prensa. Dependendo das condições iniciais da matéria-prima, pode ser necessária uma trituração para diminuir o tamanho das partículas e/ou a secagem para reduzir o teor de umidade (FILLIPPETO, 2008).

Devido ao alto teor de umidade presente nos resíduos da bananicultura, se faz necessário no presente trabalho tanto a eliminação de boa parte da água presente nas amostras estudadas quanto a cominuição das mesmas antes que o processo de briquetagem ocorra. A secagem será alvo de investigação para os diferentes resíduos gerados a fim de otimizar a briquetagem, além de gerar dados relevantes para o processamento adequado das diferentes biomassas.

3.5.1 Umidade e Aw

A água é um dos principais componentes da maioria dos alimentos, tendo influencia direta sobre sua estabilidade, ou seja, sua conservação. Muitas são as alterações que podem ocorrer em função do teor de água, dentre elas estão o crescimento de microrganismos, as reações enzimáticas, o escurecimento não enzimático, a oxidação de lipídios e vitaminas e alterações físicas como consistência, viscosidade e textura.

Em relação aos produtos estudados neste trabalho: folha, pseudocaule, fruto, engaço e coração, pode-se dizer que a folha é a única destas matérias-primas que não possui quantidade elevada de água, uma vez que após o processo de desfolhagem, as folhas da bananeira permanecem no solo expostas ao sol, perdendo grande parte da água retida no seu interior para o ambiente. Segundo MAIA (2013), quando a finalidade da biomassa é para o processo de queima, maiores teores de umidade geram combustíveis de qualidade inferior, uma vez que parte da energia do processo de combustão será utilizada para

desidratação da amostra, diminuindo o rendimento energético, se fazendo necessário assim o uso da secagem como tratamento prévio adicional.

O estudo feito por SILVA e MORAIS (2008), faz uma análise energética do bagaço de cana-de-açúcar em diferentes teores de umidade, o que, teoricamente, traz uma estimativa para diversos tipos de resíduos similares, como é o caso da matéria-prima estudada. Segundo este estudo, variando a umidade de 50% para 0%, consegue-se um incremento energético de 92%, o que demonstra a influência da umidade na eficiência energética do produto. Mas vale destacar que de acordo com os mesmos autores, variando a umidade de 50% para 20% consegue-se um incremento energético de 60%, o que é mais viável considerando que métodos de secagem são onerosos e podem inviabilizar o processo.

Ainda abordando o tema água, em um alimento ela pode se encontrar livre ou ligada. Diz-se água livre, quando a água se encontra fracamente ligada aos componentes não aquosos dos alimentos, podendo ser mais facilmente eliminada em processos como o de secagem, estando disponível para o crescimento microbiano e reações químicas. A água combinada está fortemente ligada aos componentes não aquosos dos alimentos, é mais difícil de ser eliminada e não se encontra disponível para o crescimento de microrganismos e reações químicas. Pode-se dizer ainda que a umidade é igual ao conteúdo de água total do alimento (água livre mais água ligada), enquanto a atividade de água (A_w) representa apenas a água livre ali contida (MELO FILHO e VASCONSELOS, 2011).

Por esse motivo a estabilidade de um alimento está mais relacionada à atividade de água, pois esta indica o grau de disponibilidade da água para participar de reações de degradação físicas, químicas e biológicas. Já a água ligada diretamente às moléculas constituintes do alimento corresponde a umidade de monocamada, e representa o menor teor de água contido em um produto (MARCINKOWSKI, 2006).

Ainda segundo MARCINKOWSKI (2006), a secagem tem o objetivo de remover grande parte da água livre presente no alimento através da evaporação da mesma, com a finalidade de prolongar a vida útil do produto.

A atividade de água está relacionada com parâmetros físico-químicos, como temperatura, pressão de vapor e nível energético do sistema. A A_w pode ser definida como a relação existente entre a pressão de vapor de água do alimento (ρ) e a pressão de vapor de água pura (ρ_0) a uma única condição de temperatura e pressão (**Equação 2)**.

$$a_w = \frac{\rho}{\rho_0} \qquad (2)$$

Assim sendo, a atividade de água é uma propriedade do alimento dependente da temperatura. Além disso, a A_w de um alimento e a umidade relativa do ambiente no qual se

encontram tendem sempre a equilibrar-se, e por isso, é comum expressar umidade também como umidade relativa de equilíbrio ou % URE (VÉLEZ, 2011).

3.5.2 Secagem

A secagem de alimentos é um dos mais antigos processos usados pelo homem e continua sendo empregado até hoje. Esse processo consiste na retirada de parte da umidade presente nos produtos através da evaporação da água, seja por métodos naturais ou artificiais (GAVA, 1984).

A velocidade de secagem depende da temperatura, da umidade relativa do ar e do fluxo de ar, do tempo de exposição a estas condições, do teor de água inicial e final e das características da biomassa que se deseja secar (RENDEIRO e NOGUEIRA, 2008).

Para a secagem ocorrer, o alimento absorve o calor do ar, ocorrendo então a evaporação da água de superfície. A temperatura do ar é chamada a temperatura de bulbo seco, e é medido por um termômetro de bulbo. Se o bulbo é coberto por um pano úmido, a evaporação deste material retira calor e a temperatura diminui, esta temperatura mais baixa é chamada de temperatura de bulbo úmido. A diferença entre as duas temperaturas é utilizada para determinar a umidade relativa. O aumento da temperatura do ar ou a redução da umidade relativa faz com que a água se evapore mais rapidamente a partir de uma superfície molhada, que por sua vez provoca nova redução da temperatura (FELLOWS, 2000).

Ainda segundo FELLOWS (2000), quando o ar quente passa através de um alimento úmido, o vapor de água se difunde através de uma camada limite de ar que rodeia o alimento, para então ser arrastado pela corrente de ar. Estabelece-se então um gradiente de pressões de vapor desde o interior do alimento úmido até o ar seco. Este gradiente constitui a força impulsora para a eliminação de água do alimento, e a camada de ar age como barreira, tanto á transmissão de calor quanto à eliminação de vapor durante a secagem. Sendo assim, quanto maior a velocidade do ar, menor será a espessura da camada limite e, consequentemente, maior será a velocidade de secagem. Em suma, as três características necessárias a uma boa secagem são:

- uma temperatura de bulbo seco moderadamente elevada;
- uma umidade relativa moderadamente baixa;
- uma velocidade de ar elevada.

No estudo de secagem de Pêra em fatias, a 50, 60 e 70°C, ocorreu um aumento dos valores da difusividade com o aumento da temperatura do ar de secagem (estes valores variam de 10^{-9} até 10^{-8} $m^2.s^{-1}$), demonstrando assim a diminuição das resistências internas de secagem com o aumento da temperatura. Com o aumento da velocidade do ar (0,5, 1,0 e 1,5 $m.s^{-1}$) também pôde ser observado a redução do tempo de secagem do fruto,

demonstrando assim a diminuição da resistência externa em função do aumento da velocidade e da temperatura do ar de secagem (PARK et. al., 2001).

Durante o estudo da cinética de secagem do cajá, as curvas de secagem variaram amplamente com os valores da temperatura (50, 60, 70 e 80°C), observando-se que quanto mais elevada a temperatura, maior era a taxa de secagem. Na menor temperatura (50°C), a estabilização do processo de secagem ocorreu num período de tempo de aproximadamente 38 h e 30 minutos, enquanto para a temperatura mais elevada (80°C) a estabilização se deu a partir de 9 h e 30 minutos. No mesmo experimento verificou-se ainda que a velocidade do ar de secagem (1,0 e 1,5 $m.s^{-1}$) foi de pouca influência, sugerindo assim que o controle da secagem neste experimento dependeu quase exclusivamente da difusão interna do cajá, sendo que a resistência externa não influenciou nas condições de operações utilizadas (GOUVEIA et. al., 2003).

Em estudos realizados por BORGES et. al. (2011), que avaliaram a secagem de bananas nas temperaturas de 40 e 70°C, a temperatura teve uma correlação positiva com a eficiência do tempo de secagem, mas o branqueamento se mostrou eficiente apenas para a temperatura de 40°C. Isso, porque em temperaturas mais elevadas dá-se início a reação de Maillard, fator que deve ser analisado como um possível interferente no processo de secagem. REIS et. al. (2011), que avaliaram a secagem da pimenta Cumari do Pará concluíram que, dentre os tempos de 45, 55 e 65°C, a maior temperatura (65°C) foi a que apresentou maior eficiência de secagem. SIQUEIRA et. al. (2012) estudou o processamento do pinhão manso nas temperaturas de 45, 60, 75, 90 e 105 °C, também concluindo que o aumento da temperatura do ar promove redução no tempo de secagem dos grãos.

No processamento do pseudocaule da bananeira, primeiramente, para redução do teor de umidade, fez-se necessário a prensagem, o que reduziu esse mesmo teor de 90% para 62,03%. Durante a secagem o material foi submetido a temperaturas de 50, 60 e 70°C objetivando uma umidade final de 11,5%. O tempo de secagem ideal para cada uma das temperaturas foi de 31, 16 e 12h respectivamente, levando à conclusão de que a taxa de secagem foi acelerada com o aumento da temperatura do ar de secagem (MAIA, 2013).

No entanto, apesar de a alta velocidade do ar de secagem e da temperatura do ar favorecerem o processo de secagem, é importante lembrar que condições extremas podem levar a perda de eficiência do processo de secagem. No caso de altas temperaturas, a secagem pode ocorrer de forma tão rápida na superfície que provoca a formação de uma crosta superficial que impede a saída de água mais interna e dificulta a transferência de calor. Além disso, reações de Maillard e caramelização podem ocorrer a temperaturas elevadas em produtos ricos em proteínas e açúcares, o que pode gerar alterações estruturais do material com impedimento do deslocamento da água pelos poros do material.

Desta forma, o estudo de diferentes condições de secagem torna-se de extrema importância para a otimização do processo de secagem para materiais com diferentes características.

3.5.2.1 Curva de secagem e Taxa de secagem

As curvas de secagem de diferentes materiais, sob diferentes condições, trazem informações importantes sobre o comportamento de sua perda de água. Correlações inclusive sobre o comportamento da curva e o tipo de água presente no material (ligada ou não ligada) que está sendo eliminada podem ser feitas. Seguindo este raciocínio, sob determinadas condições, é possível obter informações sobre a facilidade de eliminação de água, umidade final do produto e tempo de secagem apenas observando o comportamento da curva de secagem. Assim, assumindo que a temperatura e a umidade do ar não variam durante a secagem, e que a transmissão de calor na superfície do produto acontece somente por convecção, as curvas típicas de secagem podem ser obtidas e são representadas pelas **Figuras 3 e 4,**

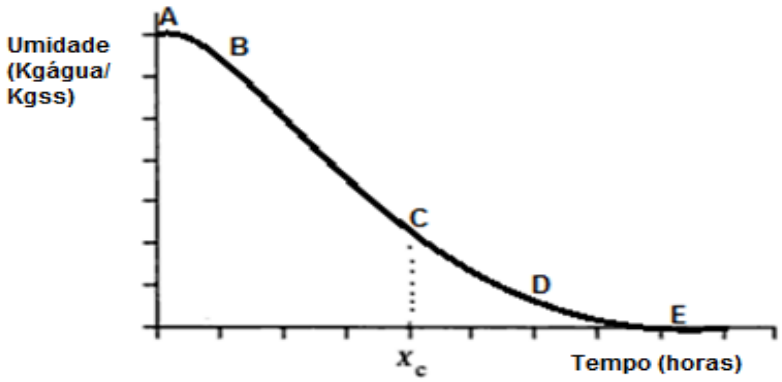


Figura 3: Curva de secagem de teor de umidade versus tempo de secagem.
(Adaptado de GEANKOPLIS, 2012)

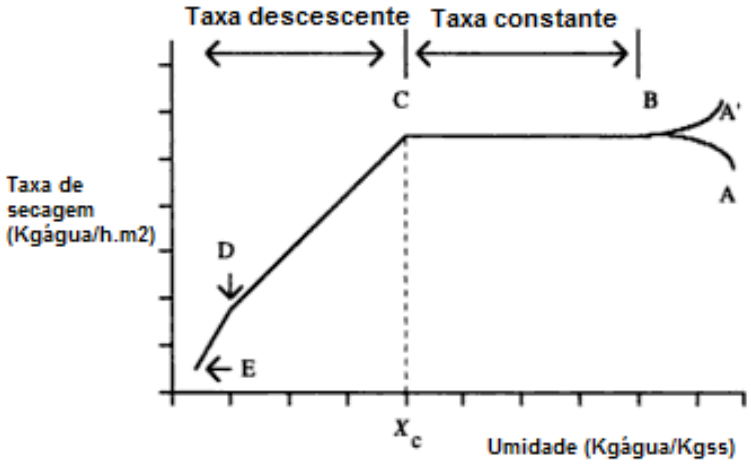


Figura 4: Curva de secagem de taxa de secagem versus teor de umidade.
(Adaptado de GEANKOPLIS, 2012)

As curvas apresentadas nas **Figuras 3 e 4** descrevem claramente o comportamento da água no material ao longo da secagem. Assim, quando um material inicia o processo de secagem, transcorre-se um período inicial de estabilização, que pode ser crescente ou decrescente quando se trata de taxa de secagem, correspondente ao período A-B da **Figura 3 e 4,** ao final do qual a superfície do alimento alcança a temperatura do bulbo úmido. Dá-se então início a secagem propriamente dita do material, onde a água migra para a superfície do alimento que se torna saturada. Como grande parte da umidade presente no sólido é não ligada, a superfície é mantida sempre saturada. Neste período a temperatura da superfície do alimento se mantém próxima à temperatura de bulbo úmido do ar devido ao efeito de esfriamento do ar que cede calor para a água evaporar. Pelo fato de a água mover-se facilmente pelo material, atingindo facilmente a superfície, a única resistência ao processo de secagem é a transferência de calor, não sendo a difusão da água no sólido um fator limitante para o processo. Por isso, este período, representado pelos pontos B-C nas **Figuras 3** e **4**, é também chamado de “Período de taxa constante de secagem”.

O “Período de taxa decrescente de secagem”, representado pelos pontos C-D nas **Figuras 3** e **4**, inicia quando o material atinge o ponto de umidade crítica (X_c). Neste ponto, não há água suficiente na superfície do produto para manter um filme de água contínuo, e o movimento interno de umidade no sólido também não garante que a superfície fique saturada. Assim, a difusão interna de água no sólido passa a controlar o processo de secagem. A evaporação passa a ocorrer no interior do sólido e à medida que o teor de umidade cai, a distancia a ser percorrida pelo calor e pela água no material aumenta, diminuindo a taxa de secagem. Nesta fase, a temperatura do sólido aumenta até próximo a temperatura do ar quente, assim a secagem continua até a umidade de equilíbrio ser

atingida. Esta fase caracteriza a remoção de água ligada presente no material, geralmente a mais difícil de ser eliminada (FELLOWS, 2000 e GEANKOPLIS, 2012).

Segundo PAGLARINI et. al. (2012), durante a secagem, dependendo das condições de processo e do tipo de material que está sendo seco, fenômenos de encolhimento e formação de crosta do material podem ser observados. O encolhimento é mais pronunciado quando a eliminação de água é rápida em temperaturas brandas e a formação de crostas quando a secagem ocorre em temperaturas altas, sendo assim, estas interferências geram influencias na velocidade de secagem, reduzindo a transferência de massa no processo.

É claro que por motivos de eficiência do processo de secagem, deseja-se que maior parte do processo e que maior quantidade de água seja eliminada durante a taxa de secagem constante.

Inúmeros são os modelos cinéticos de secagem encontrados para representar e predizer o comportamento de diferentes produtos ao longo da secagem. A definição de parâmetros de transferência de massa são de grande relevância para a avaliação e otimização do processo de secagem.

3.5.2.2 Modelo cinético de secagem

Geralmente para todos os processos de secagem, a etapa crítica é a fase onde a taxa de secagem torna-se decrescente. Nesta fase, além de ser lenta a remoção de água, a temperatura do material pode atingir valores onde reações de Maillard e caramelização geram incrustações dificultando mais o processo de secagem. Logo, conhecer como esta fase ocorre para diferentes materiais é de grande relevância para a minimização deste período durante a secagem, gerando economia do processo.

Durante a fase decrescente a eliminação de água é governada pela movimentação e difusão da água através do sólido, a segunda lei de Fick pode ser aplicada (**Equação 3**) nestas condições descrevendo o fenômeno da perda de água durante a secagem.

$$\frac{\partial \mathrm{x}}{\partial \mathrm{t}} = D_{ef}\left(\frac{\partial^2 \mathrm{x}}{\partial \mathrm{x}^2}\right) \qquad (3)$$

Integrando-se esta equação, considerando o material como uma placa infinita e que a distribuição de umidade é uniforme no t=0 e que ao final a umidade atinge o equilíbrio, obtém-se a **Equação 4**, que descreve o comportamento da curva de secagem quando a fase de taxa decrescente é predominante:

$$\frac{\mathrm{X}-\mathrm{x_{eq}}}{\mathrm{x_0}-\mathrm{x_{eq}}} = \frac{8}{\pi^2}\sum_{\mathrm{n}=0}^{\infty}\frac{1}{(2\mathrm{n}+1)^2}\exp\ -(((2\mathrm{n}+1)^2\,\pi^2 D_{ef}\mathrm{t})/(4\mathrm{x_{1^2}})) \qquad (4)$$

Onde, D_{ef} é a difusividade da água através do material sólido (m^2/s), x_1 é a espessura do material que está sendo seco quando a secagem ocorre considerando apenas uma

superfície exposta (m), *t* é o tempo (s), *X* é a umidade (kg água.kg sólido seco^{-1}) em determinado instante *t*, X_0 a umidade inicial e X_{eq} a umidade de equilíbrio.

Vale mencionar que a **equação 4** foi utilizada considerando 4 termos do somatório, uma vez que a adição de mais termos na equação não trouxe melhoria para o ajuste aos dados.

Para os dados de curva de secagem a D_{ef} pode ser obtida através do ajuste do modelo aos dados experimentais. O Software Statistica 7, com o método de regressão dos mínimos quadrados, foi utilizado para os ajustes. Alguns autores, como CELMA et. al. (2008), obtiveram valores de D_{ef} na ordem de 10^{-9} a 10^{-8} $m^2.s^{-1}$ para a secagem de borra de oliva por infravermelho.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

As matérias-primas utilizadas neste trabalho compreenderam resíduos da bananicultura, mais especificamente o pseudocaule, o coração, o engaço, a folha e o fruto.

Além da matéria-prima também serão utilizados para a execução do trabalho, picadeira, estufa com circulação de ar, peneira de agitação mecânica, bandejas de aço inox, balança analítica, cadinhos, placas de petri, mufla, dessecadores, prensa mecânica, balança de umidade, molde de aço inox, analisador elementar (CHNS), calorímetro e aparelho de TGA.

4.2 Metodologia

Os resíduos estudados (pseudocaule, coração, engaço, folha e fruto) da bananeira de variedade “prata” foram coletados na região do norte de Minas Gerais, na fazenda Monte Verde, distrito de Capitão Enéas.

As diferentes partes da bananeira passaram por diversas etapas de preparação, a saber: trituração, prensagem e secagem. Para depois serem utilizadas no processo de briquetagem. Cada uma das etapas de pré-tratamento serão descritas nos itens a seguir.

4.2.1 Trituração dos resíduos

O material coletado foi triturado no próprio campo, empregando-se uma picadeira de reboque (Modelo EM-6800, Nogueira, MG, BR), conforme mostra a **Figura 5**, com o objetivo de facilitar o processamento posterior. Cada resíduo da bananicultura foi triturado separadamente.

Figura 5: Trituração da matéria-prima no campo

Durante o processo de trituração, as perdas de matéria prima e água foram contabilizadas a fim de se estabelecer um rendimento para o processo. O material triturado foi levado a Universidade Federal de Minas Gerais, onde todos os testes se realizaram, e armazenado sob condições ambiente, a uma temperatura de 25°C.

4.2.2 Prensagem

As partes da matéria prima triturada foram encaminhadas para prensagem, seguindo metodologia descrita por MAIA (2013), a fim de reduzir o teor de água presente na matéria-prima in natura. Desta forma, o processo de secagem pôde ser otimizado uma vez que o excesso de umidade dos resíduos foi eliminado. A única parte não prensada foram as folhas da bananeira, pois apresentaram baixo teor de umidade em análises prévias. A prensagem foi então realizada utilizando-se uma prensa hidráulica (Modelo P15000, Charlotte, MG, BR) de 15 toneladas.

Parte da matéria-prima triturada e prensada foi encaminhada para análises químicas, enquanto o material restante foi embalado em sacos de polietileno e congelado a -20°C, para posterior estudo do processo de secagem. Nesta etapa foi preparado um blend com todos os resíduos da bananeira estudados, adicionando em partes iguais de massa 20% de cada material.

4.2.3 Caracterização dos resíduos e análise de amostras secas

O estudo da composição química das partes morfológicas distintas da bananeira é de grande importância para a reunião de dados consistentes relacionados a capacidade

térmica destes materiais, tendo em vista que a informação existente na literatura é relativamente escassa.

4.2.3.1 Análise química imediata

Amostras dos materiais in natura (fruto, folha, engaço, pseudocaule, coração e blend) após prensagem e após secagem foram coletadas para caracterização química. A análise química imediata teve por objetivo quantificar os teores de umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas contidos na amostra. Os ensaios seguiram as normas ASTM (American Society for Testing and Materials) para biomassa e combustíveis a base de madeira, uma vez que ainda não existem normas específicas para biomassa em algumas das análises propostas no trabalho. Para as análises de voláteis e cinzas, as amostras, previamente secas, tiveram sua granulometria reduzida em liquidificador industrial (Modelo LQ 40, VISA, MG, BR), para a obtenção de um resultado mais preciso, com posterior seleção de granulometria em peneira vibratória de 40 mesh (0,420mm), onde os finos obtidos na peneiragem foram submetidos às análises químicas imediatas. As metodologias empregadas para cada tipo de análise estão descritas nos itens subsequentes.

a- Determinação do teor de umidade

As determinações de umidade foram realizadas de acordo com a norma ASTM E871-82, ASTM (2006) modificada, onde 25 g de amostra in natura de cada resíduo estudado foram pesadas em placas de petri devidamente identificadas. As placas foram levadas para estufa previamente aquecida a 103 ± 1°C até massa constante, sendo todas as análises realizadas em triplicata.

O teor de umidade da amostra foi calculado de acordo com a **Equação 5**, em que w_c é a massa da placa de petri, w_i é a massa inicial (massa inicial da amostra + placa) e w_f é a massa final (massa final da amostra + placa), em gramas.

$$t_u = \left[\frac{w_i - w_f}{w_i - w_c}\right] \times 100 \qquad (5)$$

b- Determinação do teor de voláteis

A determinação do teor de voláteis foi realizada segundo a norma ASTM E872-82, ASTM (2006). O teor de materiais voláteis é quantificado medindo-se a fração de massa da amostra que volatiliza durante o aquecimento em forno mufla a uma temperatura previamente estabelecida pela metodologia utilizada. Aproximadamente 1g de cada uma das amostras secas foram pesadas e acondicionadas em cadinhos de porcelana com tampa. As amostras preencheram os cadinhos quase completamente, fazendo com que o pouco ar presente evitasse a combustão da amostra. Os cadinhos foram levados ao forno mufla por exatamente sete minutos, a uma temperatura de 950°C ± 5°C. Os cadinhos foram retirados da mufla e transferidos ao dessecador para que pudessem ser resfriados e

pesados, o mais brevemente possível. Após a extração dos voláteis, sobram somente carbono fixo e cinzas. O teor de voláteis pode ser calculado de acordo com a **Equação 6,** onde w_c é a massa do cadinho, w_i é a massa inicial (cadinho + amostra seca) e w_f é a massa final (cadinho + amostra após análise) em gramas.

$$t_v = \left[\frac{w_i - w_f}{w_i - w_c}\right] \times 100 \quad (6)$$

c- Determinação do teor de cinzas

A determinação do teor de cinzas foi realizada segundo a norma ASTM E1755 – 01, ASTM (2007). Aproximadamente 1g de biomassa seca, foi pesada em um cadinho de porcelana e levada ao forno mufla a uma temperatura de 550 ± 25°C por um período total de cinco horas. Para que a amostra não produzisse chamas, a temperatura foi inicialmente estabilizada em 250°C, e após passado o tempo de 30 min elevada para 550 ± 25°C. O teor de cinzas foi calculado utilizando a **Equação 7** onde t_c é o teor de Cinzas, w_i é a massa inicial (massa do cadinho + massa da amostra seca), w_c a massa do cadinho e w_f é a massa final (massa do cadinho + massa da amostra após análise), em gramas. Necessariamente, o teor de cinzas é expresso em base seca.

$$t_c = \left[\frac{w_i - w_f}{w_i - w_c}\right] \times 100 \quad (7)$$

d- Determinação do teor de carbono fixo

A determinação do teor de carbono fixo foi realizada segundo a norma ASTM E1757-01, ASTM (2007). Após a determinação dos teores de umidade, de matéria volátil e de cinzas da amostra, o teor de carbono fixo (t_{cf}) foi obtido por diferença, como demonstrado na **Equação 8,**

$$t_{cf} = 100 - (t_v + t_c) \quad (8)$$

4.2.3.2 Análise química elementar

Assim como feito para as análises imediatas, amostras do material seco (fruto, folha, engaço, pseudocaule, coração e blend), foram coletadas para caracterização química elementar. As amostras secas foram levadas a peneira vibratória, com abertura de 100 mesh (0,149mm). A homogeneização granulométrica foi realizada para garantir resultados mais precisos das análises dos finos gerados a partir da peneiragem.

A determinação da composição elementar dos resíduos se faz importante devido a correlação entre esses componentes e o poder calorífico do material. Assim, conhecendo a composição elementar é possível avaliar o potencial de uso da biomassa como combustível de queima.

Na análise química elementar foram determinados os teores de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) por analisador elementar, pela Central Analítica do Instituto

de Química da Universidade Estadual de São Paulo (USP), onde as análises foram realizadas em duplicata.

4.2.3.3 Densidade aparente e Densidade Energética

Para se determinar a densidade aparente dos resíduos e dos briquetes foi utilizada a norma ASTM D5057-10 (ASTM 2011) e ASTM D2854-09 (2009) para materiais muito higroscópicos. A densidade aparente dos resíduos foi calculada utilizando recipientes de volumes conhecidos, obtendo-se a razão entre a massa que o recipiente comportava pelo seu volume. A densidade aparente do briquete foi determinada calculando a razão entre a massa do briquete e o seu volume, obtido a partir de suas dimensões utilizando-se um paquímetro, (Modelo 500-143 B, Mitutoyo, MG, BR).

A densidade energética foi determinada baseando-se no método adotado por MAIA (2013) e PROTASIO et. al. (2012). Onde a densidade aparente dos resíduos antes da briquetagem e dos briquetes é multiplicada pelos seus respectivos poderes caloríficos superiores. Esta determinação é de grande relevância pelo fato de expressar o poder de concentração energética por m^3 de material, obtido a partir da compactação da biomassa. Assim, pode-se ter uma ideia da eficiência de briquetagem em termos da capacidade de concentrar a energia originalmente contida na biomassa in natura.

4.2.3.4 Poder calorífico

Em relação ao poder calorífico foram analisadas amostras trituradas e secas dos resíduos e amostras destes mesmos resíduos após compactação. O poder calorífico foi analisado por bomba calorimétrica (Modelo 1341, Plain Jacket calorimeter Parr, MG, BR) conforme mostra a **Figura 6**, e seguindo os critérios estabelecidos pela ASTM D5468-02 (2007). Esta norma prescreve o método de determinação de poder calorífico superior a volume constante, em uma bomba calorimétrica adiabática, isotérmica ou estática.

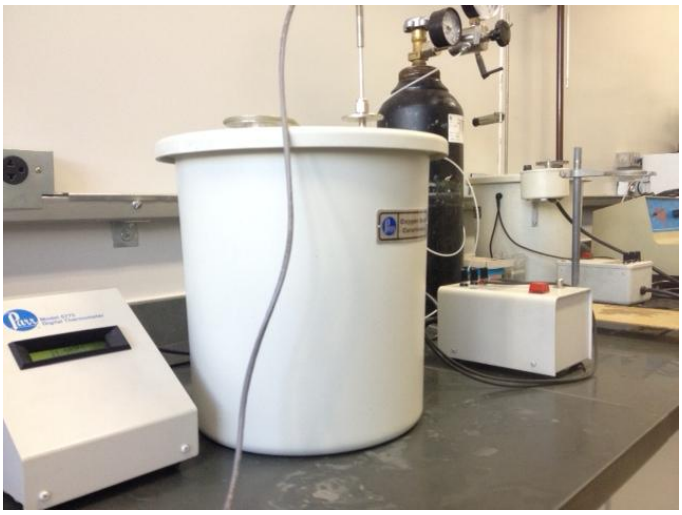


Figura 6: Calorímetro

Para se determinar o Poder Calorífico Superior (PCS), a amostra seca é posta no calorímetro, sendo a quantidade de calor liberada pela sua combustão absorvida pela água, a qual tem sua temperatura elevada. Quando a temperatura da água estabiliza, pode-se calcular a quantidade de calor absorvida através da **Equação 9** (RENDEIRO e NOGUEIRA, 2008).

$$Q_R = m_{H2O} \times C \times (T_{final} - T_{inicial}) \quad (9)$$

Onde m_{H2O} é a massa de água, C é o calor específico da água e T_{final} e $T_{inicial}$ são as temperaturas iniciais e finais da água. Obtêm-se o PCS dividindo Q_R pela massa inicial da amostra.

4.2.4 Experimentos de secagem

A matéria-prima triturada e prensada foi descongelada sob refrigeração (5ºC). Parte do material foi separado para realização dos experimentos de briquetagem, e outra parte foi destinada aos ensaios de secagem para obtenção das curvas de secagem e curvas de taxa de secagem.

Para secagem dos diferentes materiais (fruto, folha, engaço, pseudocaule, coração e blend), utilizou-se uma estufa de bandejas com circulação forçada de ar (Modelo 394/4, Tecnal, MG. BR), retratada na **Figura 7.** As temperaturas utilizadas foram de 70, 105 e 120°C, e a velocidade de ar foi constante, 1,5 $m.s^{-1}$, medida através de um anemômetro (Modelo H004-041, HOMIS,MG, BR), descrito na **Figura 8.**

Figura 7: Estufa de circulação forçada de ar

Figura 8: Anemômetro

Os valores de temperatura escolhidos se basearam em dados obtidos da literatura e levaram em conta principalmente a diversidade de resíduos estudados, além da eficiência de secagem. Sabe-se que, a princípio, quanto maior temperatura de secagem, menor o tempo requerido para o processo, mas não se pode afirmar que esta correlação é válida para qualquer tipo de material devido à variabilidade em suas composições químicas.

4.2.4.1 Obtenção das curvas de secagem

Para realização dos ensaios de secagem foram utilizadas peneiras retangulares de aço inox, de 13 por 18 cm, com fundo em forma de tela. Antes de cada ensaio a biomassa foi distribuída homogeneamente pela peneira, formando uma camada uniforme de espessura de 1,5 cm. As massas das peneiras com e sem amostras foram medidas e registradas e então encaminhadas para as bandejas da estufa de secagem. Para avaliação da perda de massa de cada resíduo, as amostras foram retiradas da estufa, resfriadas em períodos constantes de 10 minutos, empregado para todas as amostras e pesadas em intervalos de 15 minutos, até peso constante. Os dados obtidos de teor de umidade versus tempo foram registrados em forma de gráficos, obtendo-se desta forma as curvas de secagem para todos os resíduos estudados. Estes dados também foram modelados conforme descrito no **Item 3.5.2.2**, obtendo-se assim a difusividade efetiva (Def.$m^2.s^{-1}$) para a água nos materiais. A partir dos dados experimentais obtidos, a curva de taxa de secagem também foi obtida conforme descreve o **Item 4.2.4.2** a seguir.

4.2.4.2 Obtenção e estudo das curvas de taxa de secagem

Para a obtenção das curvas de taxa de secagem, que podem ser representadas pela taxa de secagem (dx/dt) *versus* umidade (X), os dados da curva de secagem foram utilizados. A derivada da umidade em cada instante de tempo (dx/dt) foi obtida pelo software Origin 7.0.

A partir dos valores de dx/dt, a velocidade de secagem pode ser calculada através da **Equação 10** para cada material estudado (GEANKOPLIS, 2012).

$$R = -\left(\frac{m_s}{A}\right) \times \left(\frac{dx}{dt}\right) \quad (10)$$

Onde m_s é a massa de sólido seca (kg), A é a área exposta a secagem (m^2) e R a velocidade de secagem em ($kg.h^1.m^{-2}$).

No período de velocidade constante de remoção de água, R será constante e igual à Rc, até o ponto de umidade crítica (X_c), a partir do qual o processo de remoção de água é governado pela difusão. Durante o período de taxa constante de remoção de água, a superfície do sólido se mantém saturada, sendo assim, a remoção de água do material ocorre por transferência de massa da água presente na superfície saturada do sólido para o o ar na interface deste sólido. Por outro lado, a velocidade de remoção da água também é controlada pela taxa de transferência de calor na superfície do sólido, que fornece calor latente de vaporização. Assim, pode-se dizer que no estado estacionário, a taxa de transferência de massa é igual a taxa de transferência de calor. Logo, o parâmetro Rc pode ser relacionado com os coeficientes convectivos de transferência de calor (h_c) e de massa (k_m) entre o meio secante e a superfície do sólido. Sendo assim, a transferência de calor é calculada através da troca de calor entre o ar e o sólido, enquanto a transferência de massa é calculada através da quantidade de massa de água transferida por unidade de tempo em função das pressões parciais da água na interface e no.

A **Equação 12** descreve o fenômeno descrito acima para a etapa de secagem a taxa constante (GEANKOPLIS, 2012).

$$Rc = k_m.mb.(H_w - H) = \frac{hc.(T - Tw)}{\lambda w} \quad \textbf{(12)}$$

Onde Rc é a velocidade constante de remoção de água ($kg\ água.m^{-2}.h^{-1}$), k_m é o coeficiente convectivo de transferência de massa ($mol\ água.m^{-2}.h^{-1}$), mb é a massa molecular do ar (29 kg ar seco.kmol de ar $seco^{-1}$), H_w é a umidade absoluta do ar na temperatura de bulbo úmido (kg vapor água. kg ar $seco^{-1}$), H é a umidade absoluta do ar de secagem (kg vapor de água. kg ar $seco^{-1}$), h_c é o coeficiente convectivo de transferência de calor ($W.m^{-2}.K^{-1}$), T é a temperatura de bulbo seco do ar de secagem (K) e T_w é a temperatura de bulbo úmido do ar de secagem (K) e λ_w é o calor latente de vaporização na temperatura de bulbo úmido ($kJ.kg\ de\ água^{-1}$). Alguns parâmetros acima mencionados foram obtidos considerando a medida da umidade relativa do ar de secagem e temperatura ambiente no dia da secagem, além de informações extraídas da carta psicrométrica obtida a

partir dos dados da cidade de Belo Horizonte e gerada através do software 'Psychrometric Chart Pro'. Os valores dos parâmetros obtidos estão demonstrados na **Tabela 8**.

Tabela 8: Parâmetros para estimativa dos coeficientes convectivos de transferência de massa e calor.

Parâmetros	Temperatura de secagem (T ^{o}C)		
	70	105	120
H_w (kg água.kg ar seco^{-1})	0,045	0,057	0,065
H (kg água.kg ar seco^{-1})	0,0241	0,0241	0,0241
λ_w (kJ.kg água^{-1})	2417,63	2405,89	2398,36
T_w (^{o}C)	36	41	44

*Umidade relativa do ar = 76% Temperatura ambiente = 24°C P atmosférica em Belo Horizonte = 91,77kpa

Assim, a partir das curvas de taxa de secagem foi possível estimar parâmetros importantes para o processo de secagem dos materiais estudados como, umidade crítica de secagem (X_c), importante para definir a partir de qual umidade do material o processo de secagem passa a ter sua velocidade decrescente, coeficiente convectivo de transferência de calor (h_c), importante para estimativa da quantidade de energia gasta nesta fase da secagem e coeficiente convectivo de transferência de massa (k_m), importante para avaliar a velocidade de eliminação de água na superfície do material nas condições estipuladas.

4.2.5 Experimentos de briquetagem

4.2.5.1 Distribuição Granulométrica

Os resíduos foram secos até umidade entre 5 e 12%, e a distribuição granulométrica realizada de acordo com a norma ASTM D 1762-84 (ASTM 2013), utilizada para a determinação de granulometria de carvão vegetal.

Para seleção granulométrica um sistema de peneiras com agitação vibratória (Modelo N1554, Bertel, MG, BR) e mesh entre 4 e 3/8 foram utilizadas a fim de selecionar os materiais com granulometria entre 5 a 10 mm.

Para os resíduos de engaço, pseudocaule e blend foi necessário o uso de um liquidificador industrial (Modelo LQ 40, Visa, MG, BR) para fazer a redução granulométrica dos materiais secos, a fim de melhor ajustar o tamanho das partículas destes resíduos.

4.2.5.2 Confecção dos briquetes

Para a simulação do processo de briquetagem foi desenvolvido um molde de aço carbono, composto por um fundo móvel e um êmbolo do mesmo material (**Figura 9**). O Molde possuía dimensões de 75mm de diâmetro e 120mm de altura, produzindo briquetes

bolacha de 8mm a 10mm de altura. Ao molde foi acoplado um sistema de aquecimento, com o objetivo de simular as temperaturas de briquetagem industrial.

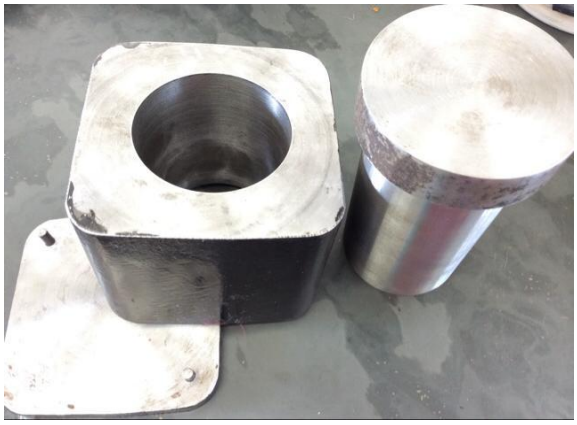


Figura 9: Molde para briquetagem

O molde juntamente com o sistema de aquecimento foi levado à prensa hidráulica como mostrado na **Figura 10,** onde a pressão de compactação máxima exercida foi de sete toneladas. O tempo e a temperatura de compactação foram de respectivamente, 30 minutos e 100°C para todos os resíduos.

Figura 10: Pressão sendo exercida sobre o molde com sistema de aquecimento

Dessa forma, 25 a 40 g, de material vegetal seco foi adicionado ao molde onde as pressões e temperaturas descritas foram empregadas, simulando assim o processo de briquetagem. A quantidade empregada para cada biomassa variou de acordo com suas características, como por exemplo, o volume destes resíduos, que variava de acordo com sua porcentagem fibrosa. Os briquetes foram produzidos com cada resíduo isoladamente, a saber; pseudocaule, coração, engaço, folha e fruto, além do blend das diferentes partes. O

objetivo foi avaliar o desempenho do processo de briquetagem para cada material diferente. Para nenhum processo houve adição de material aglutinante.

Os parâmetros utilizados na briquetagem foram baseados na literatura e nas particularidades morfológicas observadas para cada material estudado.

Os briquetes produzidos foram avaliados segundo seu poder calorífico superior e comportamento térmico, conforme descrito nos itens a seguir.

4.2.5.3 Análise de Poder calorífico dos briquetes

O poder calorífico dos materiais briquetados foi determinado através de bomba calorimétrica, como descrito no **Item 4.2.3.4**, e as análises foram realizadas no laboratório de análises físico-químicas do departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Minas Gerais.

A determinação deste parâmetro é de grande relevância para a avaliação do potencial energético dos briquetes produzidos como combustível de queima.

4.2.5.4 Análise termogravimétrica dos briquetes

O estudo do comportamento térmico dos briquetes foi realizado através de um aparelho de TGA (**Figura 11**), sobre atmosfera oxidante, com taxa de aquecimento de 10°C/min a partir de 25°C até 750°C. As análises foram realizadas no Departamento de química da Universidade Federal de Minas Gerais.

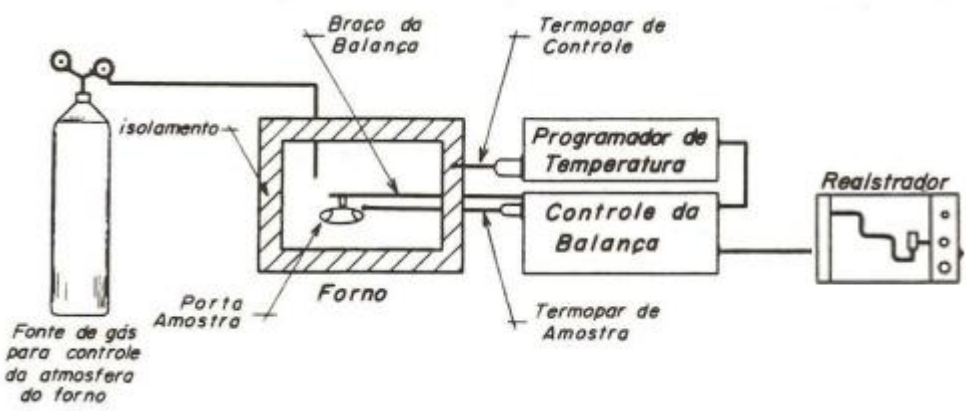


Figura 11: Aparelho de TGA
Fonte: DENARI e CAVALHEIRO (2012)

Através da termogravimetria é possível acompanhar o comportamento da biomassa estudada durante a combustão. Pode-se detectar a temperatura de ignição, taxa máxima de combustão e ainda diferenciar componentes químicos de acordo com seus estágios de degradação. Assim, estas análises são importantes quando se tem como objeto de estudo materiais destinados à queima (VAMVUKA e SFAKIOTAKIS, 2011). A avaliação das curvas termogravimétricas possibilita assim a caracterização dos briquetes, principalmente em

relação aos parâmetros que o definem como combustível sólido de boa qualidade energética.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Trituração dos resíduos no campo

Todos os materiais: pseudocaule, engaço, coração, folha e fruto foram pesados antes e após a trituração. Através da diferença de massa, foi então possível estimar a massa perdida por cada resíduo em consequência do processo de trituração. Os dados de perda de massa são apresentados na **Tabela 9,**

Tabela 9: Diferença de massa antes e após trituração.

Matéria-Prima	Massa antes da trituração (kg)	Massa depois da trituração (kg)	Perda de massa (%)
Pseudocaule	20	10,9	45,5
Engaço	20	18,4	8,0
Coração	20	17,7	11,5
Fruto	20	18,6	7,0
Folha	5,5	5,3	3,6

Pode-se observar que o pseudocaule foi o material com a maior perda de massa dentre os resíduos estudados, isso pode ter ocorrido devido à formação estrutural do pseudocaule, que é dividido em inúmeros gomos que retém grande quantidade de água.

Segundo estudos de LI et. al. (2010), através do corte transversal e análises micrográficas do pseudocaule, diversas aberturas, de 20 a 40 µm podem ser observadas. A diferença de massa observada durante a trituração das folhas, material com o menor teor de umidade, se deve somente as perdas de material que ficou retido nas foices da picadeira durante o processo, uma vez que a eliminação de água não pôde ser observada durante a trituração deste material.

O processo de trituração, além de cominuir o material vegetal, também auxilia na eliminação de água nas etapas posteriores de prensagem e secagem, conforme discutido a seguir.

5.2 Prensagem dos resíduos in natura

A prensagem teve o objetivo de reduzir ao máximo o teor de umidade dos materiais estudados com a finalidade principal de facilitar a secagem e reduzir a quantidade de energia requerida para este processo. Para isso a prensa hidráulica utilizada foi ajustada para operar com cinco toneladas, durante 5 minutos. Esse valor é equivalente a um terço da

capacidade máxima da prensa; a **Figura 12** mostra a prensa utilizada. Essa capacidade foi pré-definida para todos os produtos em testes preliminares, que demonstraram que em pressões superiores a cinco toneladas a perda de água não foi significativa, contribuindo apenas para o esmagamento e compactação dos materiais.

Figura 12: Prensa hidráulica estabilizada em cinco toneladas

Os teores de umidade de cada matéria-prima foram medidos antes e após a prensagem e os resultados são apresentados na **Tabela 10.**

Tabela 10: Teor de umidade antes e após prensagem

Matéria-prima	Umidade antes da prensagem[a] (%b.u.)	Umidade após prensagem[a] (%b.u.)	Eficiencia da secagem (%)
Pseudocaule	91,14 ± 0,61	74,76 ± 0,23	18,0
Engaço	90,35 ± 0,05	76,92 ± 2,20	14,9
Coração	91,65 ± 0,13	79,74 ± 0,81	13,0
Fruto	76,86 ± 0,18	64,18 ± 0,80	16,5
Folha	25,71 ± 2,36	23,57 ± 0,79	8,3

[a] $\text{desvio padrão} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{n=1}^{n}(xi - \bar{x})^2} \quad n = 3$

De um modo geral, pode-se notar que todos os resíduos da bananicultura apresentam alta umidade quando in natura, exceto as folhas, o que a priori os tornam inadequados para serem utilizados como biomassa de queima, uma vez que grande parte da energia produzida na combustão dos materiais seria utilizada para evaporar a água constituinte dos mesmos. Como comparação, pode-se citar o bagaço de cana de açúcar que é amplamente utilizado no Brasil como biomassa de queima e possui cerca de 50% de umidade, obtida após prensagem da cana para extração do caldo (SILVA e MORAIS, 2008).

Na **Tabela 10**, observa-se que o pseudocaule apresentou o maior teor de umidade, sendo o resíduo com maior eficiência de prensagem (18%). MAIA (2013) obteve resultados superiores, ao utilizar uma prensa de rolos para extrair o excesso de água do pseudocaule da bananeira. Em seu experimento, o teor de umidade variou de 90% antes da prensagem, para 62,03% após prensagem, chegando a uma eficiência de prensagem de 31%.

No entanto, a folha por apresentar baixa umidade inicial foi o material vegetal onde se observou a menor perda de água pela prensagem, cerca de 8,3% de eficiência na prensagem. A baixa umidade neste material é facilmente atingida no próprio campo, quando as folhas com grande área superficial ficam expostas ao sol. Os resíduos in natura resultantes da prensagem podem ser observados na **Figura 13,**

Figura 13: Resíduos prensados in natura

Apesar de a prensagem auxiliar na redução do teor de umidade, os materiais ainda foram submetidos a outro processo adicional para eliminação de água, a secagem, uma vez que o objetivo principal do trabalho foi avaliar o resíduo da bananicultura como possível combustíveis de queima, o que exige baixa umidade da biomassa.

5.3 Análises químicas

As análises químicas apresentadas a seguir foram realizadas para os diferentes resíduos da bananicultura, a saber, pseudocaule, engaço, coração, folha, fruto e blend. As amostras empregadas nas análises continham os resíduos prensados e secos em estufa a 105 ^{o}C, quando foi determinada a umidade contida em cada material. Em seus estudos, OLIVEIRA (2007) encontrou uma notável variabilidade em relação aos constituintes

químicos da bananeira, dependendo da parte morfológica analisada, o que também pode ser observado neste trabalho, tanto em relação às análises químicas imediatas quantos às elementares.

5.3.1 Análises Químicas Imediatas

A análise imediata dos diferentes resíduos da bananicultura é importante a fim de caracterizar os resíduos em termos de sua composição, que intimamente pode influenciar e refletir em seu potencial de queima. A **Tabela 11** apresenta os resultados da análise imediata feita para os diferentes resíduos da bananicultura.

Tabela 11: Análises químicas imediatas

Matéria-Prima	Umidade[a] (%b.u.)	Voláteis[a] (%b.s.)	Cinzas[a] (%b.s.)	Carbono Fixo[a] (%b.s.)
Pseudocaule	68,75 ± 3,55	76,62 ± 0,86	9,19 ± 0,23	14,19 ± 0,72
Engaço	72,31 ± 0,67	69,12 ± 0,21	14,40 ± 0,04	16,33 ± 0,18
coração	76,93 ± 3,46	68,09 ± 0,53	9,86 ± 0,11	22,05 ± 0,44
Fruto	60,51 ± 1,93	81,05 ± 0,76	3,04 ± 0,03	15,91 ± 0,62
Folha	23,57 ± 0,79	70,86 ± 0,66	19,14 ± 0,54	10,00 ± 0,69
Blend	63,27 ± 1,13	75,45 ± 0,66	11,25 ± 0,09	13,30 ± 0,55

[a] $\text{desvio padrão} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{n=1}^{n}(xi - \bar{x})^2} \quad n = 3$

Em princípio, observando a **Tabela 11**, pode-se notar que o teor de umidade dos materiais é ligeiramente menor que os valores apresentados na **Tabela 10,** isto se deve ao fato de os materiais terem sido congelados após a prensagem para eliminação de água, o que acarretou em perda adicional de água durante o descongelamento dos materiais, quando as análises imediatas foram realizadas.

Conforme mencionado anteriormente, dados sobre a composição química das diferentes partes da bananeira são escassos, sendo o pseudocaule e o engaço os únicos resíduos já investigados. Neste sentido, em pesquisas envolvendo o pseudocaule da bananeira, FERNANDES (2012) encontrou valores para a composição imediata similares aos obtidos e apresentados na **Tabela 11**, sendo reportados valores para o teor de voláteis, cinzas e carbono fixo, de 74,47%, 8,04% e 17,49%, respectivamente. Valores semelhantes também foram encontrados por MAIA (2013), a saber, 74,52% para voláteis, 7,42% para cinzas e 18,05% para carbono fixo. Na literatura, valores semelhantes aos apresentados na **Tabela 11** são reportados para o engaço, sendo apresentados teores para voláteis, cinzas e carbono fixo de 69,45%, 12,72% e 17,83%, respectivamente FERREIRA e PROENÇA (2010).

É importante mencionar, que juntos, o pseudocaule e o engaço correspondem a 76% dos resíduos gerados na bananicultura. Apesar de estes resíduos apresentarem um teor de umidade quando in natura elevado, o que desfavorece a queima, os mesmos apresentam composição de voláteis e carbono fixo muito semelhante a resíduos agroindustriais já utilizados como biomassa de queima na matriz energética brasileira, a saber, o bagaço de cana de açúcar, vagem de feijão e casca de arroz, com teores entre 65 - 80% de voláteis e 17 - 18% de carbono fixo (RAMOS e PAULA et. al., 2011).

Segundo (ZERBINATTI, 2012) o teor de carbono fixo tem influência direta e positiva no poder calorífico superior, sendo que para SANT'ANNA et. al. (2012), quanto maior o teor de carbono fixo, mais lenta será a queima do combustível sólido, característica favorável ao mesmo. A correlação positiva com o poder calorífico também é válida para o teor de materiais voláteis (RAMOS e PAULA et. al., 2011), sendo que os mesmos têm um papel importante durante a ignição e as etapas iniciais de combustão da biomassa (SANT'ANNA et. al., 2012).

Contudo, os teores de cinzas encontrados para o pseudocaule e engaço são significativamente maiores aos encontrados para alguns resíduos agroindustriais, como é o caso do bagaço de cana que possui menos de 1% de cinzas. No entanto, teores de cinzas na faixa de 6 a 16% foram reportados para a vagem de feijão e casca de arroz (RAMOS e PAULA et. al., 2011). Segundo CAPOTE (2012) e PROTÁSIO$_1$ et al. (2011), baixos teores de umidade e cinzas refletem positivamente para o maior poder calorífico dos materiais.

Neste sentido, avaliando os resultados da **Tabela 11**, o resíduo que apresentou maior teor de cinzas foram as folhas da bananeira, o que indica a presença significativa de minerais como o cálcio, sódio, magnésio, ferro, fósforo, chumbo, cloreto e seus componentes. É válido destacar que os materiais estudados foram irrigados com água de poços tubulares, que segundo NUNES (2003), são quimicamente diferentes das águas de rios, apresentando maiores teores de Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, Cl^{-}, Si^{0}, Mn^{0} e Zn^{0}.

Além disso, o norte de Minas Gerais, local onde foram obtidos os resíduos estudados, é uma das regiões que se destaca por possuir grande parte da reserva de calcário no país, juntamente com os estados de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Paraná e Goiás, representando juntos quase 60% das reservas medidas no Brasil (MARTINS JUNIOR, 2013). Devido aos elevados teores de minerais, é comum a ocorrência de entupimento de microaspersores utilizados para a irrigação, ocorrendo muitas vezes a precipitação de carbonato de cálcio sobre folhas que se encontram no solo após desfolhagem, pseudocaule e superfície do solo (NUNES, 2003), fator este que pode ter elevado o teor de cinzas principalmente nas partes das folhas da bananeira aqui estudadas.

É de grande importância destacar que o maior teor de cinzas não prejudica necessariamente o comportamento do briquete na combustão (MORAIS et. al., 2006 e

QUIRINO e BRITO, 1991). Ainda assim, o teor de cinzas corresponde à porcentagem de material inerte na geração de calor presente na amostra, podendo ser prejudicial à capacidade térmica do combustível (FERREIRA e PROENÇA, 2010 e GONÇALVES et. al., 2009).

As folhas, além do teor de cinzas elevado apresentaram teor de carbono fixo abaixo do que é comumente encontrado para outros resíduos agroindustriais utilizados para queima, acima de 17% (RAMOS e PAULA et. al., 2011). Tornando este resíduo o com características químicas piores para ser empregado como combustível de queima, apesar de seu baixo teor de umidade e alto valor de voláteis. Como comparação, a literatura reporta para as folhas teores de voláteis de 69,45% (FERREIRA e PROENÇA, 2010), similar ao apresentado na **Tabela 11.** No entanto, os resultados reportados para cinzas se mostram abaixo do valor apresentado na **Tabela 11**, sendo encontrados valores entre 6,2 e 9,4% (FERNANDES, 2012; FERREIRA e PROENÇA, 2010 e MAIA; 2013).

O fruto da bananeira foi o resíduo que apresentou o maior teor de voláteis, podendo ser comparado ao observado para serragem, com 81% de voláteis (FELFLI et. al., 2011). No entanto, o teor de cinzas foi o menor dentre todos os resíduos estudados, o que aponta para uma característica ótima quanto ao efeito positivo sobre o poder calorífico do material. Efeito este que se soma ao teor de carbono fixo que também se apresentou em quantidades razoáveis, mas pouco abaixo do que é observado para outros resíduos agroindustriais.

Já o coração da bananeira foi o resíduo que apresentou maior teor de carbono fixo, 22%, sendo este valor maior aos teores frequentemente encontrados para outros resíduos agroindustriais utilizados para queima como é o caso da casca de arroz, com teores de até 18% e carbono fixo (RAMOS e PAULA et. al., 2011). Quanto aos teores de cinzas e voláteis, estes também se encontram em quantidades adequadas para combustíveis de queima.

Por fim, o blend das partes da bananeira apresentou valores bem equilibrados para todas as análises químicas, resultando em valores compatíveis com os da palha de cana-de-açúcar que apresenta para voláteis (74,7%), cinzas (10,3%) e carbono fixo (15,0%) (ROSILLO-CALLE et. al., 2005).

Sendo assim, pode-se afirmar que todas as partes da bananeira possuem potencial para serem utilizadas como biomassa de queima, uma vez que apresentam composição química imediata muito semelhante a maioria dos resíduos agroindustriais já empregados como combustíveis para queima e geração de energia. Destaca-se que o blend das diferentes partes viabiliza o uso como um todo dos resíduos obtidos na bananicultura, pois possibilita associar as características presentes em cada parte individual, a fim de compor uma biomassa com características e potencialidades únicas. Um exemplo disto, foi o uso das folhas, que individualmente não possui características atrativas para a queima, mas que

contribuiu para a elaboração de um blend de biomassa com características equilibradas e adequadas para ser utilizada como combustível de queima.

5.3.2 Análises químicas elementares

A quantificação da composição química elementar dos resíduos complementa a caracterização dos materiais e possibilita de forma mais completa, avaliar a capacidade energética destas biomassas.

Os valores encontrados para as análises químicas elementares de cada biomassa estudada são apresentados na **Tabela 12.**

Tabela 12: Análises químicas elementares

Matéria-Prima	Carbono[a] (%b.s.)	Hidrogênio[a] (%b.s.)	Nitrogênio[a] (%b.s.)
Pseudocaule	39,32 ± 0,22	5,64 ± 0,08	1,61 ± 0,11
Engaço	36,35 ± 0,27	4,66 ± 0,08	3,28 ± 0,08
Coração	46,20 ± 0,17	5,73 ± 0,13	4,07 ± 0,55
Fruto	41,09 ± 0,11	6,48 ± 0,08	1,03 ± 0,04
Folha	39,85 ± 0,04	5,57 ± 0,01	1,86 ± 0,27
Blend	38,50 ± 1,24	5,24 ± 0,16	2,25 ± 0,02

[a] $\text{desvio padrão} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{n=1}^{n}(xi - \bar{x})^2} \quad n = 3$

Observado a **Tabela 12**, nota-se que o coração e o fruto da bananeira foram os resíduos que apresentaram maiores teores de carbono e hidrogênio, respectivamente. Sendo o teor de carbono obtido para coração e o teor de hidrogênio para o fruto, comparáveis aos encontrados para a casca de café, a serragem e o bagaço de cana, com teores entre 45 – 48% de carbono e 6,5 – 6,9% de hidrogênio (FELFLI et. al., 2011 e RAMOS e PAULA et. al., 2011).

Em geral, para os materiais lignocelulósicos, maiores teores de carbono e hidrogênio são indicativos de uma maior capacidade térmica, em função da maior energia liberada por estes elementos na reação de combustão. Sendo assim, altos teores de carbono e hidrogênio são desejáveis quando a biomassa é utilizada como fonte de energia a partir da queima (GOUVÊA, 2012; PARIKH et. al. 2005; PROTÁSIO$_1$ et. al., 2011 e RAMOS e PAULA et al., 2011).

De um modo geral, pode-se observar na **Tabela 12**, que todos os resíduos da bananicultura apresentaram valores semelhantes para os teores de carbono e hidrogênio, sendo que a maioria, exceto o coração, apresentou valores de carbono aproximadamente entre 36 e 40%, comparáveis a resíduos agroindustriais como a casca de arroz e a vagem de feijão, com teores entre 39 e 42% de carbono, respectivamente. Quanto ao teor de

hidrogênio, a maioria, exceto o fruto, apresentou teores aproximadamente entre 4,5 e 6%, comparáveis ao teor de hidrogênio encontrado na casca de arroz (RAMOS e PAULA et. al., 2011).

Pode-se disser que os diferentes materiais, em termos da sua composição elementar, apresentam características e potenciais energéticos semelhantes.

Como forma de comparação, dados da literatura apresentaram, para o pseudocaule da bananeira, valores de carbono e hidrogênio de respectivamente, 38,9% e 5,6% (MAIA, 2013), valores estes compatíveis e similares aos apresentados na **Tabela 12,**

Pode-se observar ainda na **Tabela 12**, que os resíduos estudados apresentaram teores de nitrogênio bem variantes, em torno de 1 a 4 %, aproximadamente.

Os menores teores, entre 1 e 2%, aproximadamente, foram encontrados para o pseudocaule, frutos, folhas e blend. Já os maiores valores, entre 3 e 4%, aproximadamente foram obtidos para o engaço e coração, respectivamente.

Assim como citado no **Item 3.3.4.1** apesar de efeitos prejudiciais ao meio ambiente quando em altas quantidades, e de suspeitar-se que compete com o carbono durante a combustão, segundo BORGES et.al. (2008) os valores encontrados para o teor de nitrogênio nos resíduos da bananicultura podem ser considerados relativamente baixos.

Mesmo assim, é importante destacar, que todos os teores de nitrogênio apresentados na **Tabela 12**, para os resíduos da bananeira, estão acima de valores comumente encontrados para diferentes materiais vegetais como é o caso da casca de café, arroz e bagaço de cana, que apresentam teores de nitrogênio menor que 1% (FELFLI et. al., 2011; FERREIRA, 2012; RAMOS e PAULA et. al., 2011e ZERBINATTI, 2012).

Os altos teores de nitrogênio encontrados podem ser reflexo das adubações com nitrogênio, feitas semanalmente na plantação de onde foram coletados os resíduos, com o objetivo de melhorar a produção e a qualidade do fruto da bananeira. Em estudos realizados por ARAUJO (2008), o teor de nitrogênio no coração superou os teores encontrados no pseudocaule e folhas juntos, quando observados no final do ciclo de produção. Fato este observado para os dados apresentados na **Tabela 12,** Segundo SILVA et. al. (2003), que avaliou os teores de macro e micro nutrientes nas folhas ao longo dos ciclos de produção da banana, a aplicação de doses crescentes de nitrogênio eleva linearmente os teores de nitrogênio nas folhas.

Desta forma, pode-se afirmar que os resíduos agroindustriais podem apresentar comportamento variável quanto a capacidade térmica, não só devido a sua composição química, característica inerente a cada tipo de material vegetal, mas também como reflexo do manejo no campo.

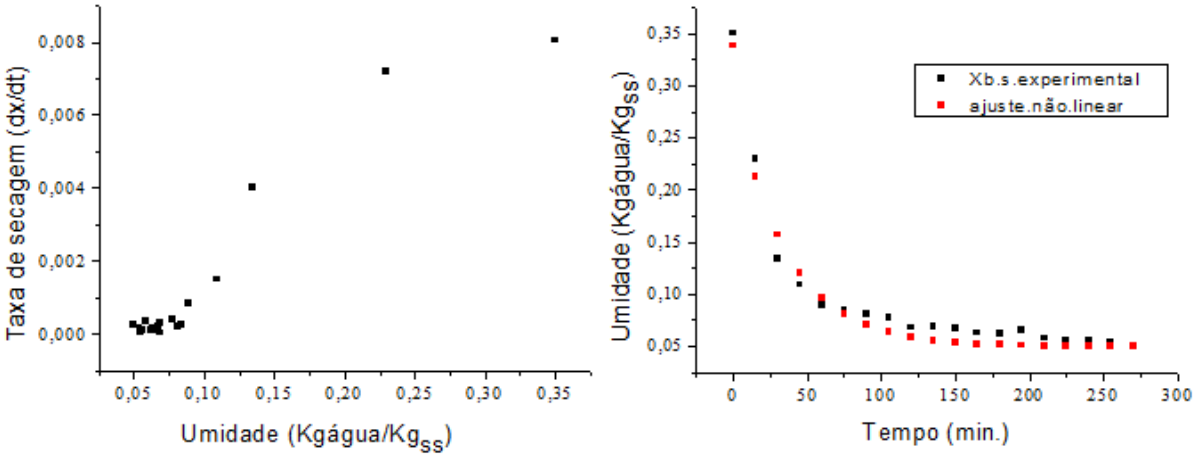
Pode-se dizer ainda, que de um modo geral, todos os resíduos apresentaram composição elementar compatível com diferentes resíduos agrícolas já empregados na matriz energética brasileira, como combustível sólido de queima.

5.4 Resultados dos ensaios de secagem

Os principais resultados obtidos a partir do estudo de secagem, a saber, curvas de secagem e curvas de taxa de secagem são apresentadas e discutidas a seguir. É importante destacar que, assim como visto no **Item 3.5.2.1**, o comportamento das curvas de secagem e de taxa de secagem depende intimamente do material e das condições de secagem. Sendo assim, por se tratar de biomassas com características diferentes, as curvas retratadas apresentam comportamentos também diferentes.

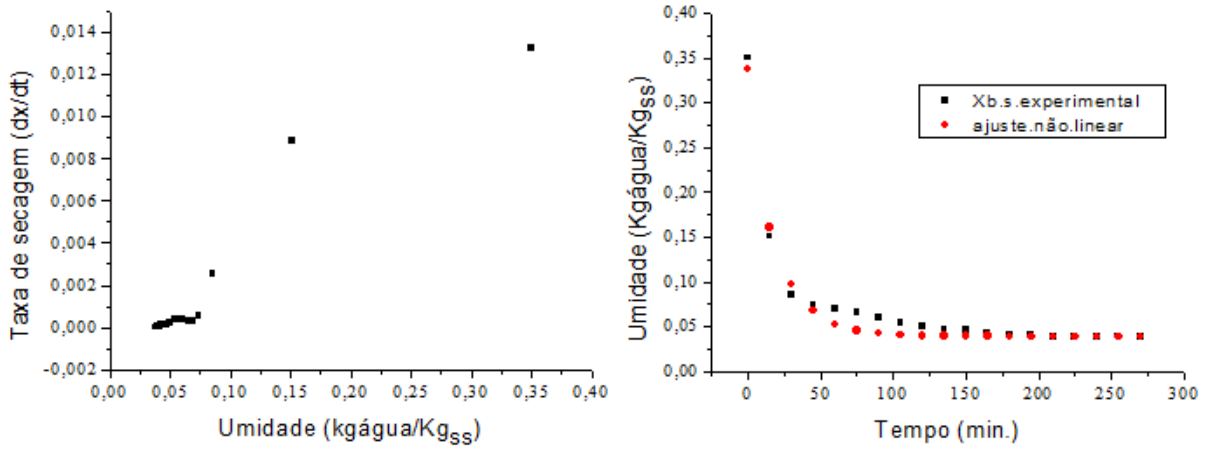
De um modo geral, observa-se para alguns resíduos o período de velocidade constante de secagem, o que não ocorre para outros, que demonstram apenas o período de velocidade decrescente de secagem. Para cada um dos comportamentos, tratamentos diferentes foram dados, ora calculando a velocidade constante de secagem e os coeficientes de transferência de massa e calor convectivos, ora estimando a difusividade efetiva do processo difusivo de secagem.

A seguir nas **Figuras de 14 a 16** são apresentadas as curvas de secagem e de taxa de secagem para as folhas da bananeira secas a 70, 105 e 120 ^{o}C.



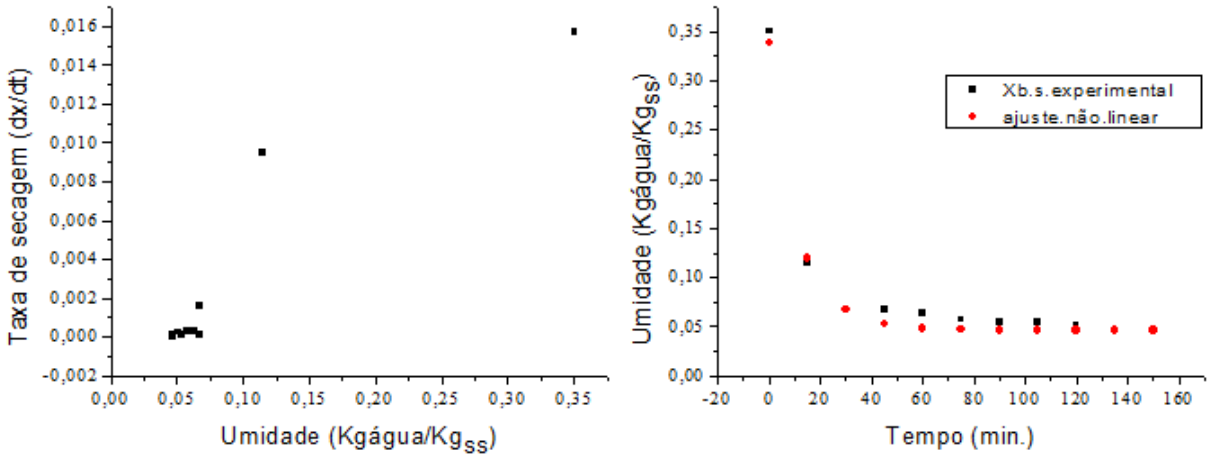
T°C =70°C	D_{ef} = 4,16 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,99

Figura 14: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita da folha a 70°C.



T°C =105°C	D_{ef} = 7,39 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,99

Figura 15: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita da folha a 105°C.



T°C =120°C	D_{ef} = 1,23 x 10^{-7} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,99

Figura 16**:** Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita da folha a 120°C.

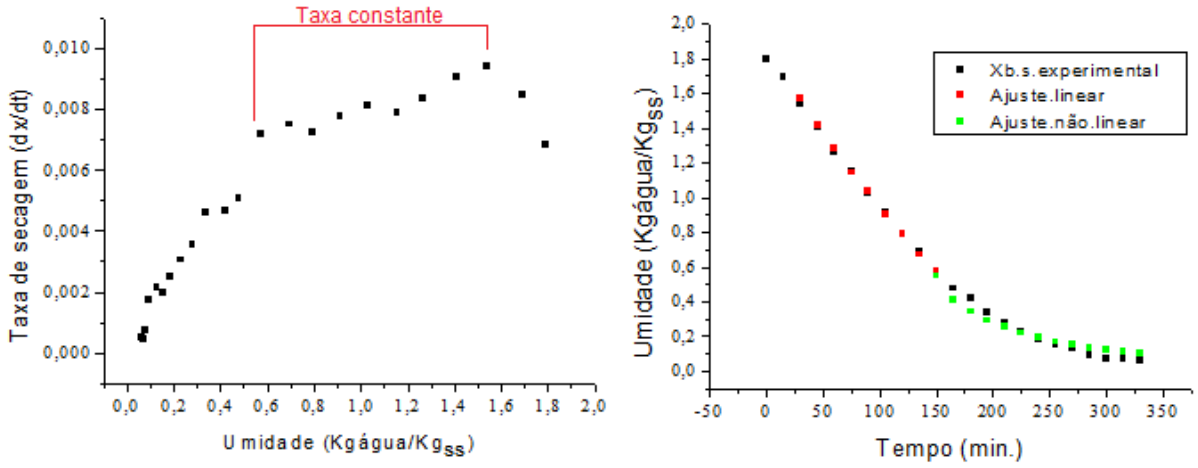
Avaliando as **Figuras 14, 15 e 16**, observa-se a ausência de período de taxa de secagem constante para as folhas em todas as temperaturas estudadas. Provavelmente isto ocorre uma vez que as folhas possuem umidade in natura baixa, cerca de 26 % b.s., o que não é suficiente para manter a superfície do material úmido durante a secagem, sendo a água removida exclusivamente por difusão através do material. Este fenômeno está de acordo com características observadas para a secagem de serragem, conforme aponta CHEN et. al. (2012). Uma vez que o período de taxa de secagem constante é mais pronunciado em materiais com umidade elevada, o comportamento da curva de taxa de secagem obtido é coerente com o reportado na literatura (CELESTINO, 2010).

Observando a curva de secagem modelada, nota-se que o modelo proposto para estimativa da difusividade efetiva descreveu satisfatoriamente o comportamento da

secagem no período de taxa decrescente, sendo obtidos coeficientes de correlação entre os dados experimentais e os preditos de 99%. Nota-se ainda, que os valores da difusividade aumentaram com o aumento da temperatura do ar de secagem, representando um aumento de quase 3 vezes na difusividade efetiva quando se compara a menor e a maior temperatura de secagem. Isto sugere que a secagem ocorre mais rapidamente quanto maior a temperatura do ar de secagem, fato este esperado devido a maior força motriz para remoção de água. Este comportamento é reforçado quando se observa o tempo de secagem até a umidade de equilíbrio, para a temperatura menor este tempo foi de aproximadamente 150 minutos, enquanto na maior temperatura foi de 50 minutos aproximadamente, o que reflete uma otimização do processo de secagem, sem prejuízo a eliminação de água do material, uma vez que as umidades de equilíbrio foram semelhantes, indicando que para as folhas, o uso de maior temperatura de secagem não gera incrustações e impedimentos superficiais para a eliminação da água durante a secagem.

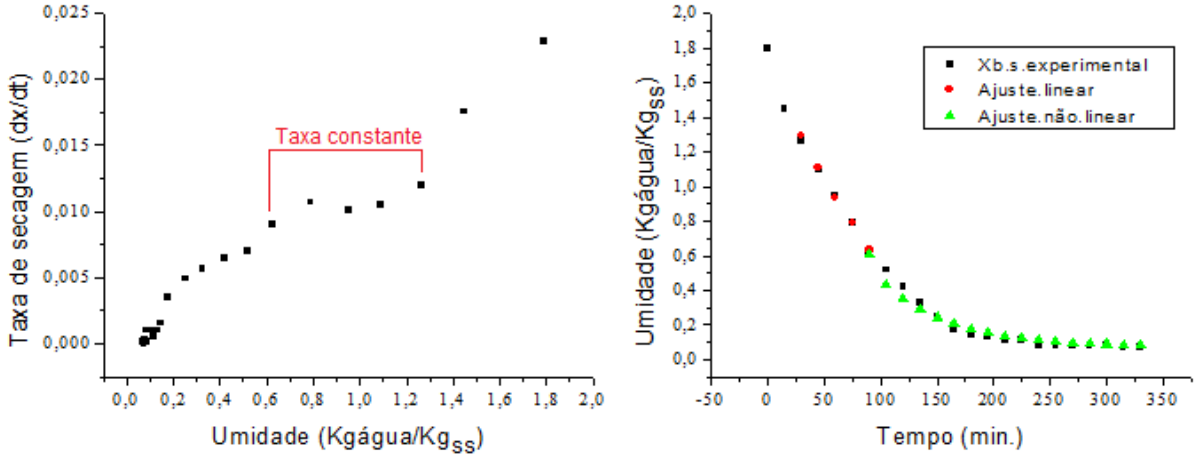
Os valores de difusividade efetiva obtidos para as folhas são compatíveis com resultados obtidos na literatura para a secagem de materiais vegetais , como por exemplo o obtido por SANTOS et. al. (2010), que obteve difusividade efetiva de 6,18 x 10^{-8} a 4,57 10^{-7} m^2/s para a carambola submetida à secagem em temperaturas de 50 a 70°C.

A seguir, nas **Figuras de 17 a 19** serão apresentados os dados de secagem para o fruto da bananeira secos a 70, 105 e 120 ^{o}C.



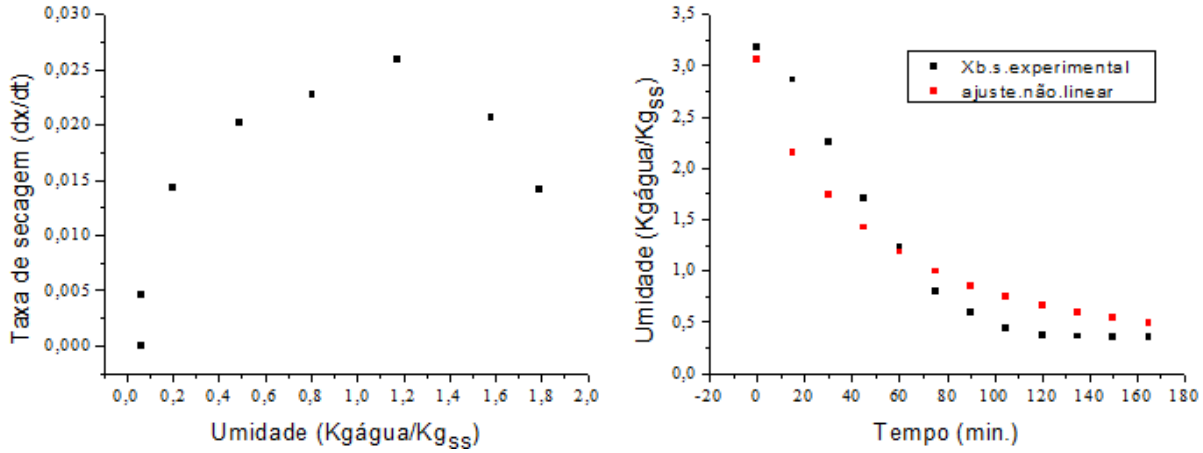
T°C =70°C	D_{ef} = 1,94 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,97
R_c= 0,98 kg água.m^{-2}.h^{-1}	K_m= 1,62 mol.m^{-2}.h^{-1}	h_c= 19,35 w.m^{-2}.°K^{-1}

Figura 17: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita da banana a 70°C.



T°C =105°C	D_{ef} = 2,46 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,98
R_c= 1,29 kg água.m^{-2}.h^{-1}	K_m= 1,35 mol.m^{-2}.h^{-1}	h_c= 13,46 w.m^{-2}.°K^{-1}

Figura 18: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita da banana a 105°C.



T°C =120°C	D_{ef} = 2,58 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,95

Figura 19: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita da banana a 120°C.

Para os resíduos do fruto em todas as temperaturas é possível identificar distintos comportamentos no inicio da curva de taxa de secagem, descrito pelos dois primeiros pontos na curva. Este comportamento é característico do período de transição, em que o sólido está se adaptando às condições de secagem, até que sua temperatura atinja o equilíbrio, que pode ter o valor da temperatura de bulbo úmido, se predominar a transferência de calor convectiva ou uma temperatura maior se predominar a transferência de calor condutiva. Quando o comportamento é crescente como observado nas curvas de taxa de secagem a 70 e 120°C, significa que o sólido inicialmente está a uma temperatura menor que a temperatura de equilíbrio, logo inicialmente calor é transferido do ar para a

superfície do sólido para aquecê-lo até a temperatura de bulbo úmido do ar, mantendo esta temperatura constante durante toda a fase de taxa de secagem constante. Já no caso de comportamento decrescente, como é o caso da curva a 105 ^{o}C, a superfície do sólido se encontra acima da temperatura de equilíbrio e neste caso o calor do sólido é utilizado para evaporar a água do mesmo e diminuir sua temperatura até a temperatura de bulbo úmido do ar. Na curva a 105^{o}C, pode-se explicar o comportamento inicial diferente dos observados para as demais curvas através das oscilações de temperatura que podem ter ocorrido durante o processo e das condições do ar na estufa de secagem, o que reflete na temperatura de equilíbrio.

Após a fase de transição nota-se nas curvas de 70 e 105^{o}C um período de taxa constante de secagem, que vai de 30 a 150 minutos para a curva a 70°C e de 30 a 90 minutos para a temperatura do ar de secagem igual a 105°C. Além do período mais curto observado para a temperatura maior, nota-se que a velocidade de secagem é cerca de 1,3 vezes maior para esta temperatura, o que justifica o tempo mais curto de duração da fase constante de secagem. Pode-se dizer que em temperaturas maiores a velocidade e eliminação e água também é maior, devido a menor viscosidade da água o que facilita o transporte de água no sólido (PAGLARINI et. al., 2012).

Sabe-se que durante o período de taxa constante de secagem a superfície do sólido está saturada e ocorre a evaporação da água “livre”, como se fosse a evaporação de uma massa de líquido sobre uma superfície plana. Sendo assim, o calor fornecido pelo ar é utilizado na evaporação da umidade e a secagem caracterizada pelos coeficientes convectivos de troca de calor e massa (LIMA et. al., 2002). Observa-se que a temperatura do ar de secagem alterou tanto os valores de coeficiente de transferência de massa (k_m) quanto os valores de coeficiente de transferência de calor (h_c). Nota-se que para a temperatura de 105^{o}C, estes coeficientes foram ligeiramente menores que os observados para a temperatura de 70^{o}C. Observando a **Equação 12**, proposta anteriormente, nota-se uma relação diretamente proporcional entre os coeficientes de transferência de massa e calor em relação à velocidade de secagem, enquanto estes mesmos coeficientes são inversamente proporcionais aos gradientes de umidade e temperatura, que representam a força motriz do processo de secagem que ocorre entre o sólido e o ar de secagem. Sendo assim, pode-se dizer que a velocidade de secagem, no período constante, a 105^{o}C, não foi suficientemente alta considerando as forças motrizes envolvidas.

Observando os pontos críticos de umidade, ou seja, a umidade a partir da qual a velocidade de secagem passa a ser decrescente, nota-se que a umidade crítica para a temperatura de 70°C foi menor que a obtida para a temperatura de 105°C, sendo seus valores respectivamente de 0,5702 e 0,6283 kg $H_2O.kg_{ss}^{-1}$. Isso aponta que apesar de a secagem a 105°C remover mais rapidamente a umidade superficial dos frutos da banana,

uma umidade maior permaneceu nos frutos após a fase de velocidade constante, provavelmente devido o tempo de duração desta fase ser menor para a temperatura de 105 que para a de 70°C.

No entanto, como foram observados coeficientes convectivos menores para a maior temperatura, isso sugere que, devido a temperatura elevada, apesar de a força motriz ser maior para a remoção de umidade, impedimentos na remoção de água devido incrustação superficial e encolhimento do material podem ter ocorrido, o que manteve a umidade crítica do material maior e os coeficientes convectivos menores para a temperatura de 105°C. A influencia deste fenômeno foi reportado por PAGLARINI et.al. (2012), que relataram o efeito da incrustação ou formação de crosta no material e do encolhimento na secagem de abacaxi, sobre o processo de transferência de massa. O autor destaca que o máximo encolhimento ocorre no início do processo de secagem quando água é removida rapidamente dos poros capilares, restando grandes espaços vazios no sólido. Além disso, também relatam que o encolhimento é menor para a secagem que ocorre em altas temperaturas, já que nestas condições o material perde água com mais facilidade e pode passar rapidamente do estado elástico para o vítreo, com formação de crosta, minimizando o encolhimento, a taxa de secagem por sua vez é diminuída devido a formação da crosta, assim como a difusão.

Uma vez cessada a etapa de taxa de secagem constante, inicia-se a fase decrescente de taxa de secagem, onde a velocidade de secagem é cada vez menor, devido à resistência interna a transferência de massa através do sólido que passa a governar a secagem.

Sendo assim, nas duas primeiras temperaturas estudadas foram feitos dois ajustes das curvas de secagem, um linear que caracteriza a taxa de secagem constante e outro não linear, que é descrito pela difusividade efetiva através do sólido. A curva de secagem a 120 ^{o}C não apresentou a fase de velocidade constante de secagem, sendo identificada apenas a etapa decrescente de velocidade.

Nota-se para as três curvas de secagem que o valor de difusividade efetiva na etapa de velocidade decrescente não foi muito diferente, sendo cerca de 1,3 vezes maior quando compara-se a menor e maior temperatura de processo. A ordem de grandeza dos valores de difusividade é compatível com valores reportados na literatura para a secagem de outros frutos, como o abacaxi (PAGLARINI et.al., 2012).

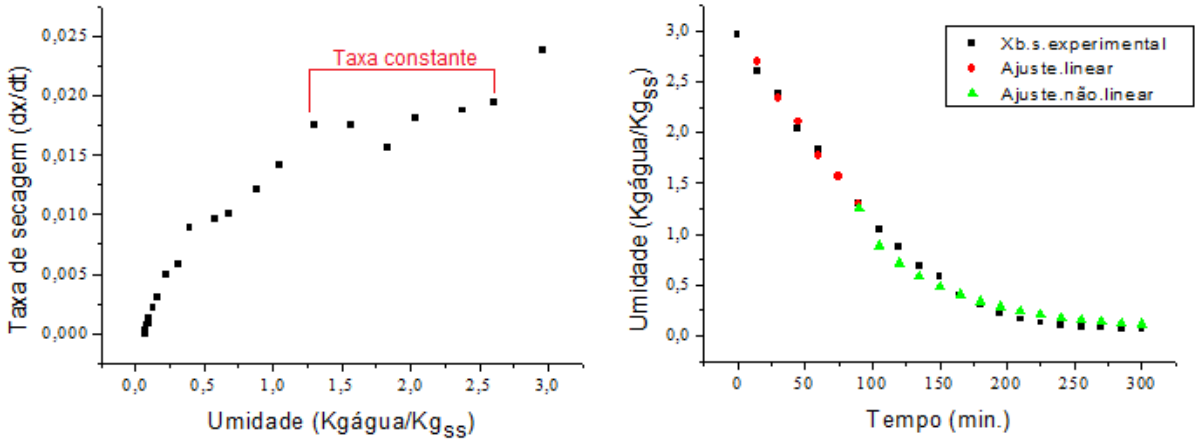
De um modo geral pode-se dizer que os modelos utilizados ajustaram-se bem aos dados experimentais, sendo obtidos valores de coeficiente de correlação maiores que 95%, o que é considerado aceitável, uma vez que dados na literatura para a secagem de casca de arroz e sabugo de milho reportam coeficientes de correlação entre 93 – 97 % (CHEN et. al., 2013).

Contudo, é válido observar que apesar de aparentemente mais rápida a secagem que ocorre a 120°C, sendo sua difusividade maior, refletindo no menor tempo de processo até a umidade de equilíbrio, de cerca de 120 minutos se comparado com a temperatura de 70ºC que atinge o equilíbrio a partir de 300 minutos de secagem, pode-se afirmar que o processo de secagem a 120°C ocorre de forma bem distinta as demais temperaturas. Nota-se na curva de secagem a 120°C que a umidade de equilíbrio é maior que a umidade observada para as demais temperaturas, isso sugere mais uma vez que devido a alta temperatura utilizada na secagem, impedimentos que prejudicaram a eliminação da água de forma mais eficiente e completa ocorreram. Isso pode ser explicado por possíveis processos de caramelização e de reação de Maillard que podem ocorrer no fruto a temperatura de 120°C, de forma mais pronunciada.

A literatura reporta que para produtos ricos em açúcares, o aumento da temperatura pode causar fenômenos colaterais, como a reação de Maillard e a caramelização, isso por consequência gera uma barreira superficial no sólido, formação de crosta, o que limita a eliminação de água e a velocidade de secagem, por isso a umidade de equilíbrio no sólido foi maior a temperatura de 120°C (PARK et. al., 2014).

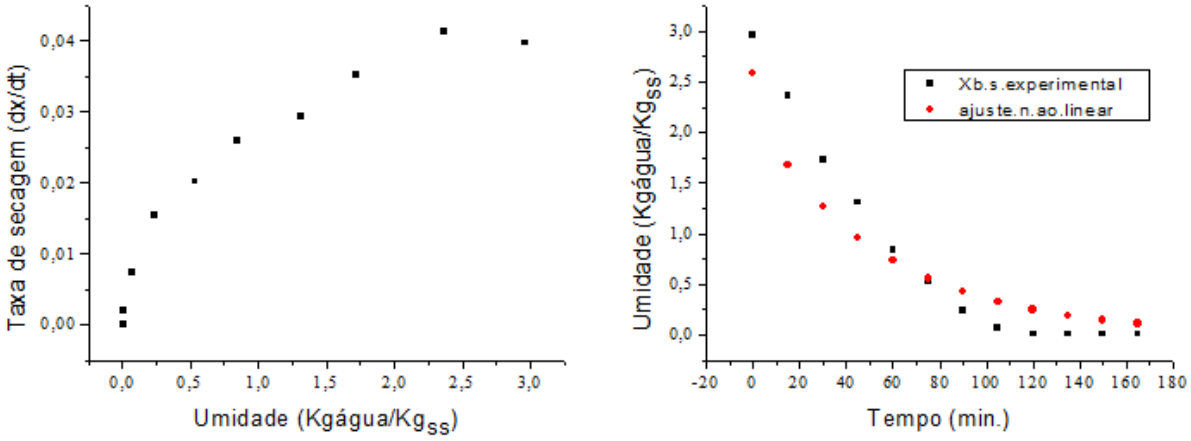
Sendo assim, a escolha da temperatura ideal de secagem não deve apenas considerar o tempo de processo, mas também a umidade final desejada e os efeitos colaterais gerados no sólido, como encolhimento e incrustações.

As **Figuras de 20 a 22** apresentam os dados de secagem para o pseudocaule da bananeira.



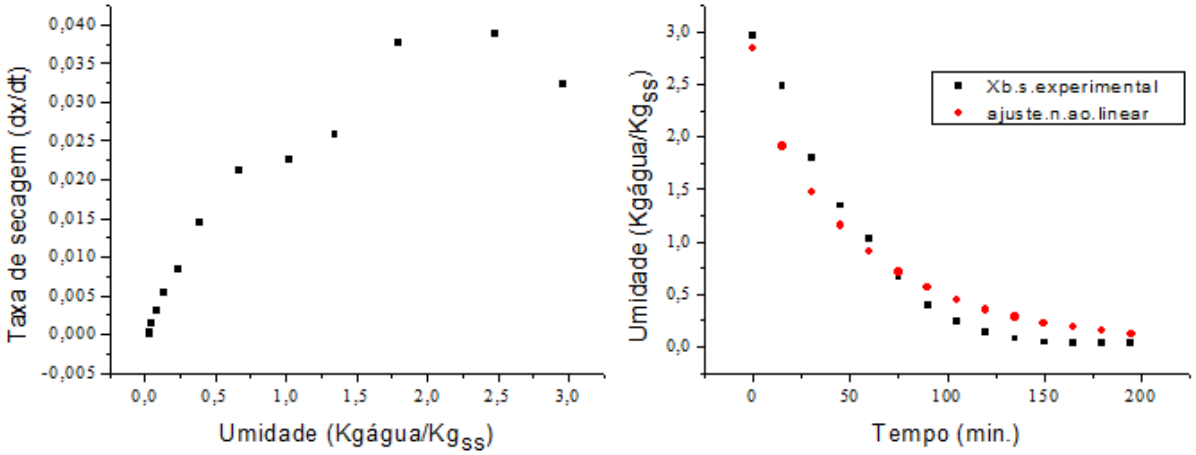
T°C =70°C	D_{ef}= 2,22 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,97
R_c= 0,93 kg água.m^{-2}.h^{-1}	K_m= 1,54 mol.m^{-2}.h^{-1}	h_c= 18,44 w.m^{-2}.°K^{-1}

Figura 20: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do pseudocaule a 70°C.



T°C =105°C	D_{ef} = 2,79 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,97

Figura 21: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do pseudocaule a 105°C.



T°C =120°C	D_{ef} = 2,55 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,97

Figura 22: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do pseudocaule a 120°C.

Observado as **Figuras de 20 a 22** para a secagem do pseudocaule, nota-se que apenas o material seco a 70°C apresentou etapa de transição decrescente, o que indica que o sólido inicialmente estava a temperatura maior que a temperatura de bulbo úmido, o que é coerente, considerando as oscilações do processo de secagem e a temperatura de bulbo úmido, que nas condições de secagem considerada é de aproximadamente 37°C podendo estar próxima a temperatura do sólido no dia da secagem.

Além disso, nota-se também que apenas a secagem realizada a 70°C apresentou etapa de taxa de secagem constante. No entanto é importante ressaltar que, apesar de não se poder identificar o período de taxa de secagem constante às temperaturas de 105 e

120°C através dos dados coletados, é possível que ele exista em intervalos muito curtos de tempo. Quanto mais elevada a temperatura, menor é o tempo de secagem, o que torna a identificação deste período mais difícil. Contudo, mesmo existindo períodos de taxa de secagem distintos, uma grande parte da água do sólido é removida no período de taxa de secagem decrescente, por ser uma etapa crítica na secagem que reflete diretamente no tempo do processo, isto a torna a etapa mais significativa de todo o processo de secagem (CHEN et. al., 2012).

Na **Figura 20**, onde a temperatura de secagem é 70°C, nota-se que o período de velocidade constante ocorre entre 15 e 90 minutos. Período considerado pequeno se comparado a etapa de secagem a taxa decrescente que perdura aproximadamente 160 minutos. Nesta fase a velocidade constante de remoção de água foi de 0,93 kg água.$m^{-2}.h^{-1}$, valor semelhante ao obtido para o fruto nas mesmas condições de secagem. Vale mencionar que durante este período aproximadamente 50% da água presente inicialmente no sólido foi removida, o que reflete a eficiência desta etapa, principalmente devido a alta umidade inicial presente no pseudocaule e a estrutura fibrosa do material.

Nesse intervalo, dominado pelas transferências e massa e calor convectivas ocorridas na interface do material, o valor do coeficiente de transferência de calor foi de 18,4 $w/m^{-2}.°K^{-1}$ e o de massa de 1,54 $mol.m^{-2}.h^{-1}$. Os valores dos coeficientes encontrados na literatura apresentam um alto grau de variabilidade, uma vez que dependem do tipo de secador, condições de operação, material a ser seco, área superficial de contato, etc (HAHMAN e KUMAR, 2006). No entanto, segundo ANWAR e TIWARI, (2001) valores na ordem de 1,31 a 12,80 $w/m^{-2}.°K^{-1}$ foram obtidos para a secagem de resíduos agrícolas em diferentes condições.

O fim da etapa de secagem constante é caracterizado pela umidade crítica que neste caso foi de 1,305 $KgH_2O.Kg_{SS}^{-1}$. A partir deste ponto a velocidade de secagem se torna decrescente e é descrita pela difusividade efetiva no sólido.

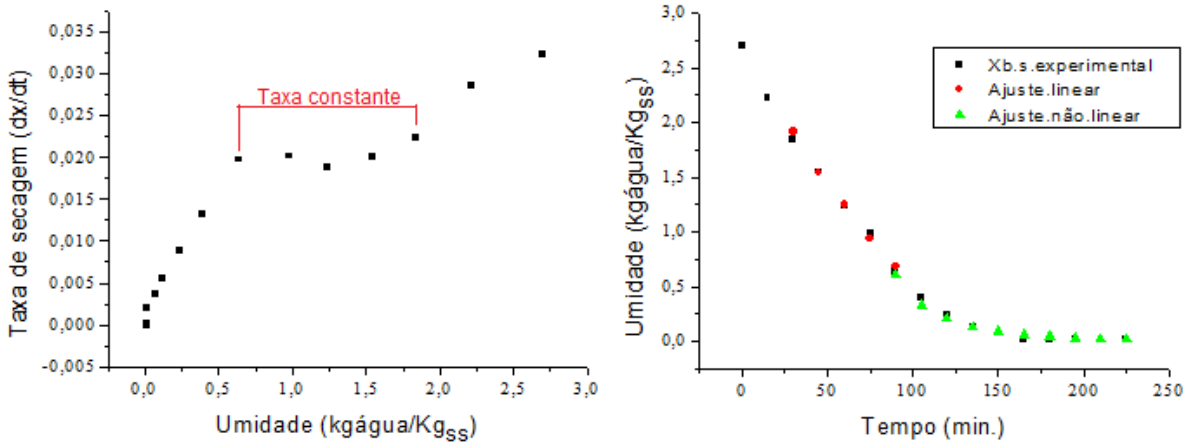
Para as temperaturas de 105 e 120°C foi observado apenas o comportamento de taxa de secagem decrescente, os valores de difusividade obtidos para estas condições foram próximos, com uma variação de aproximadamente 8%, sendo a difusividade maior para a temperatura de 105°C. Nestas condições a difusividade foi cerca de 1,3 vezes maior que a observada para a temperatura de 70°C. Demonstrando que a velocidade de secagem é maior em maiores temperaturas, o que fica claro ao observar os tempos de secagem até a umidade de equilíbrio, que foi semelhante para todos os casos. Nota-se que na temperatura de 70°C, a umidade de equilíbrio é atingida após 225 minutos, enquanto que nas demais temperaturas ocorre após 100 minutos.

Observa-se também que além da difusividade ser maior a 105°C, o tempo para atingir a umidade de equilíbrio, consequentemente, é menor que o observado para a

temperatura de 120°C. Conforme já mencionado anteriormente, o efeito de formação de crostas no material é mais pronunciado em temperaturas maiores, o que pode afetar a difusividade da água pelo material, dificultando a sua saída devido impedimentos causados por uma barreira superficial. Sendo assim, dependendo da composição do material que está sendo seco, e da extensão da incrustação formada pela alta temperatura, a umidade de equilíbrio pode ser atingida igualmente para todas as temperaturas, porém em tempos diferentes. Como a temperatura de 120°C causa maior efeito de crosta, menor será a difusividade nesta temperatura e maior o tempo para atingir a umidade de equilíbrio quando comparada a temperatura de 105°C. É válido mencionar que efeitos de oscilação nas temperaturas de secagem também podem ter gerado os resultados observados nas temperaturas de 105 e 120°C.

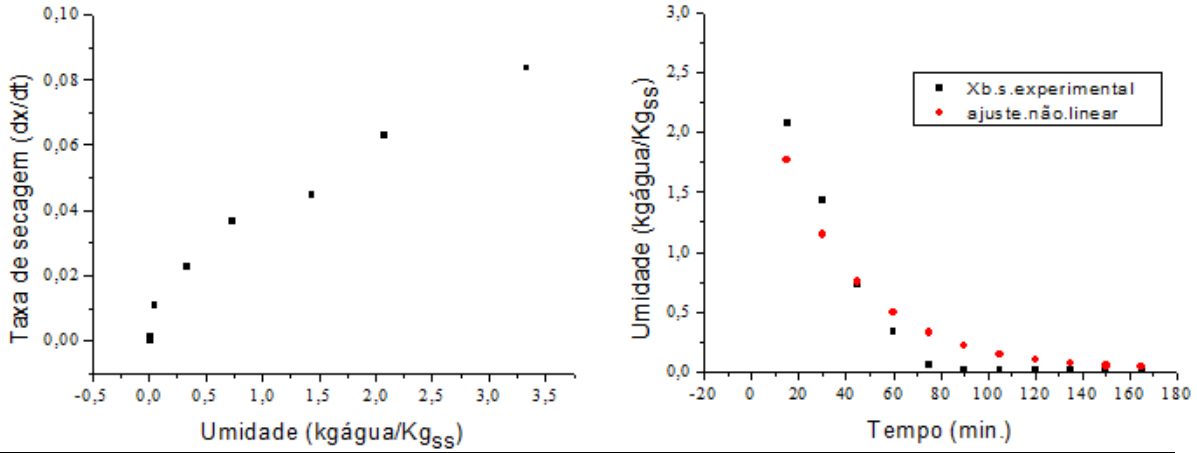
Por fim, observando os ajustes feitos para as três curvas, pode-se dizer que o modelo mais uma vez descreveu bem os dados experimentais, já que um coeficiente de correlação acima de 97% foi obtido para todos os casos.

As **Figuras de 23 a 25** apresentam os dados de secagem coletados para o engaço da bananeira.



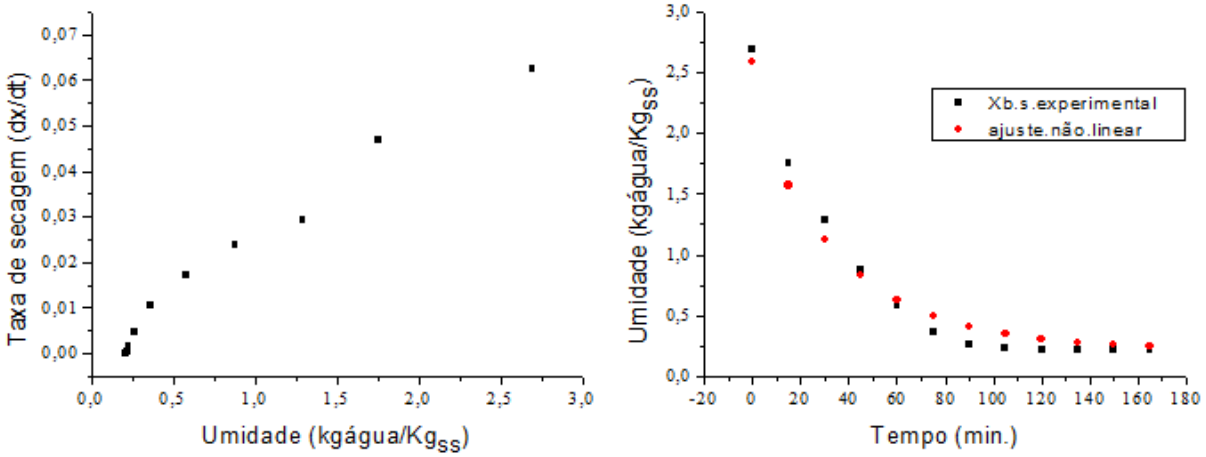
T°C = 70°C	D_{ef} = 4,74 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,99
R_c= 0,85 kg água.m^{-2}.h^{-1}	K_m= 1,41 mol.m^{-2}.h^{-1}	h_c= 16,90 w.m^{-2}.°K^{-1}

Figura 23: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do engaço a 70°C.



T°C = 105°C	D_{ef} = 4,37 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,98

Figura 24: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do engaço a 105°C.



T°C = 120°C	D_{ef} = 4,03 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,99

Figura 25: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do engaço a 120°C.

Apesar da semelhança estrutural entre o engaço e o pseudocaule, nota-se que alguns comportamentos diferentes durante a secagem são observados para ambos os materiais.

Para o engaço, assim como para o pseudocaule foi observado uma etapa de taxa de secagem constante apenas na temperatura de 70°C. Nesta condição o período de velocidade de secagem constante foi de 30 a 90 minutos, como observado para o pseudocaule. Neste período eliminou-se cerca de 66% da água presente originalmente no material, o que é significativo e relevante, já que deseja-se sempre ajustar o processo de secagem para que grande parte da água seja eliminada na fase constante de velocidade, quando o processo é mais rápido e gasta-se menos energia. Este fato também pode ser atribuído a grande quantidade de água presente inicialmente no engaço, o que gera uma

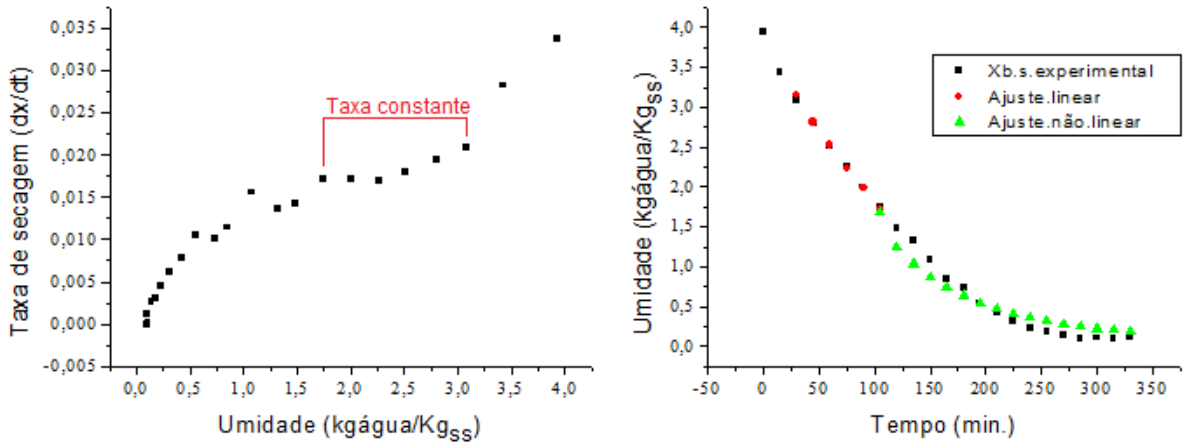
grande força motriz para o processo de transferência de massa, além disso, a estrutura deste material é muito fibrosa, o que facilita a eliminação da água livre e superficial. A velocidade constante de secagem obtida foi de 0,86 kg água.m^{-2}.h^{-1}, valor um pouco menor ao observado para o pseudocaule. Os coeficientes de transferência de massa e calor para este período foram semelhantes aos encontrados para o pseudocaule, mas ligeiramente menores. Este fato pode ser reflexo de oscilações na temperatura de secagem. A umidade crítica para a secagem do engaço a 70°C foi de 0,63 kg água.kg^{-1} sólido seco. A partir deste valor, a velocidade de secagem atinge a etapa decrescente, sendo governada pela difusão no sólido. Para as três temperaturas estudadas, a etapa de velocidade decrescente de secagem foi observada, refletindo valores de difusividade efetiva que variaram até 15%. Nota-se que a difusividade diminui com o aumento da temperatura de secagem. Comparando com o pseudocaule, a difusividade para a secagem do engaço foi até 2 vezes maior.

Mais uma vez pode-se notar que o efeito da temperatura na difusividade da água não favorece o transporte da mesma pelo material, principalmente devido aos efeitos de incrustação gerados na superfície dos sólidos quando temperaturas muito elevadas são utilizadas na secagem. A difusão da água no interior do sólido é dificultada na maior temperatura, pois claramente nota-se nas curvas de secagem, que nesta condição a umidade de equilíbrio no sólido é maior que a observada para as demais temperaturas. Isso mais uma vez sugere o efeito de incrustação na superfície do sólido, o que gera dificuldades de remoção e movimentação da água pelo sólido e reflete na maior resistência interna à transferência de massa. Assim, a umidade de equilíbrio observada é maior do que as obtidas em outras temperaturas.

Mesmo assim, o tempo de secagem até a mesma umidade de equilíbrio foi de 150 minutos para a temperatura de 70°C e de aproximadamente 70 minutos para a temperatura de 105°C. Para a temperatura de 120°C uma umidade de equilíbrio superior foi obtida, sendo o tempo de processo estimado em 90 minutos.

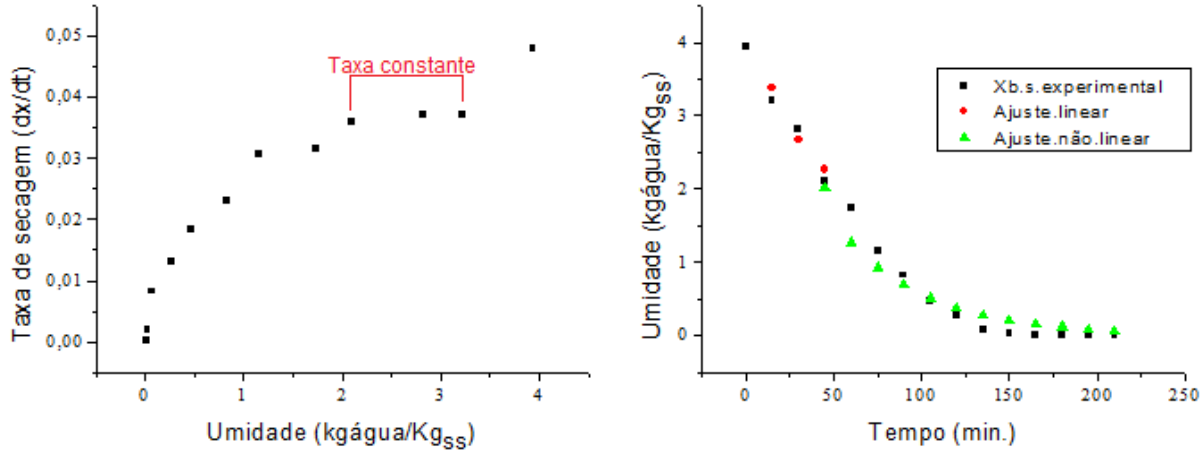
Para todas as curvas o modelo descreveu bem o comportamento dos dados experimentais, sendo obtidos valores de coeficiente de correlação de 99%.

Nas **Figuras de 26 a 28** são apresentados os dados de secagem para o coração da bananeira.



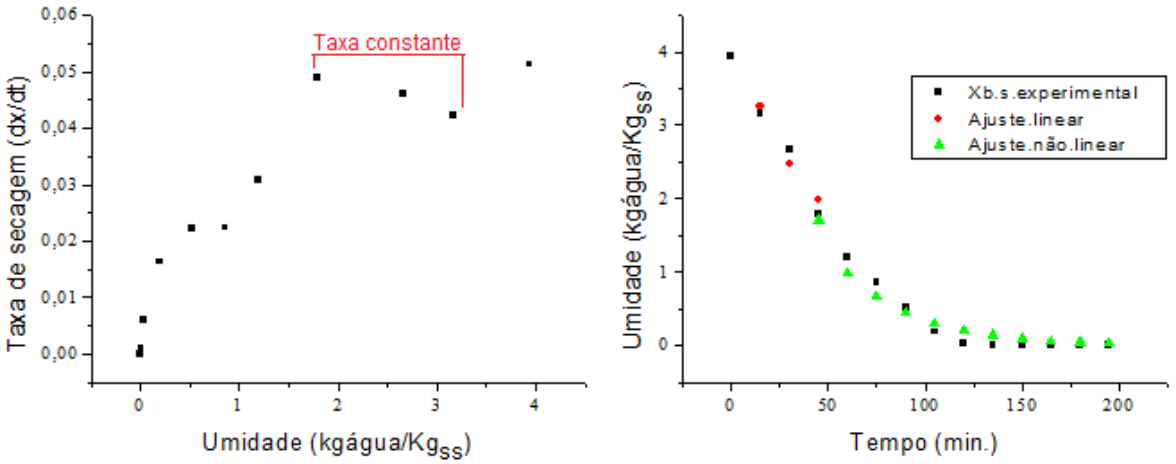
T°C = 70°C	D_{ef} = 1,87 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,96
R_c= 1,04 kg água.m^{-2}.h^{-1}	K_m= 1,72 mol.m^{-2}.h^{-1}	h_c= 20,64 w.m^{-2}.°K^{-1}

Figura 26: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do coração a 70°C.



T°C = 105°C	D_{ef} = 3,07 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,96
R_c= 2,10 kg água.m^{-2}.h^{-1}	K_m= 2,20 mol.m^{-2}.h^{-1}	h_c= 21,95 w.m^{-2}.°K^{-1}

Figura 27: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do coração a 105°C.



T°C = 120°C	D_{ef}= 3,93 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,98
R_c= 2,69 kg água.$m^{-2}.h^{-1}$	K_m= 2,27 mol.$m^{-2}.h^{-1}$	h_c= 23,61 w.$m^{-2}.°K^{-1}$

Figura 28: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do coração a 120°C.

Para o resíduo coração da bananeira, foram observadas para as três temperaturas estudadas, que a taxa de secagem apresentou períodos de velocidade constante e decrescente. À temperatura de 70°C o período de secagem constante ocorre entre 30 a 105 minutos, para a temperatura de 105°C entre 15 a 45 minutos, sendo este mesmo período encontrado para a temperatura de 120°C. Quanto maior a temperatura, menor é a duração da fase constante, uma vez que a remoção de água ocorre mais rapidamente em temperaturas maiores. É importante mencionar que é raro que a velocidade de secagem seja rigorosamente constante (PARK et. al., 2014), isso foi observado na maioria dos materiais e temperaturas estudadas.

Para o coração foi possível perceber que o efeito da temperatura tem um papel importante para o aumento da transferência de massa e eliminação da água de forma mais eficiente, o que reflete em velocidades de secagem maiores e menores tempos de processo.

Assim, nota-se nas curvas de secagem que a velocidade constante de secagem para a temperatura de 120°C é aproximadamente 2,6 vezes maior que a velocidade para a temperatura de 70°C. Além disso, nota-se que os valores de velocidade constante e coeficientes convectivos de transferência de massa e calor não foram muito diferentes para a temperatura de 105 e 120°C, o que reforça a observação feita anteriormente para o tempo de secagem constante.

Quando se compara os coeficientes de transferência de massa e calor para as temperaturas de 70°C e 120°C, nota-se uma variação nos valores de aproximadamente 24% e 12,5%, respectivamente, sendo que quanto maior a temperatura mais alto são estes valores, uma vez que maior é a força motriz para a transferência de calor e massa, logo

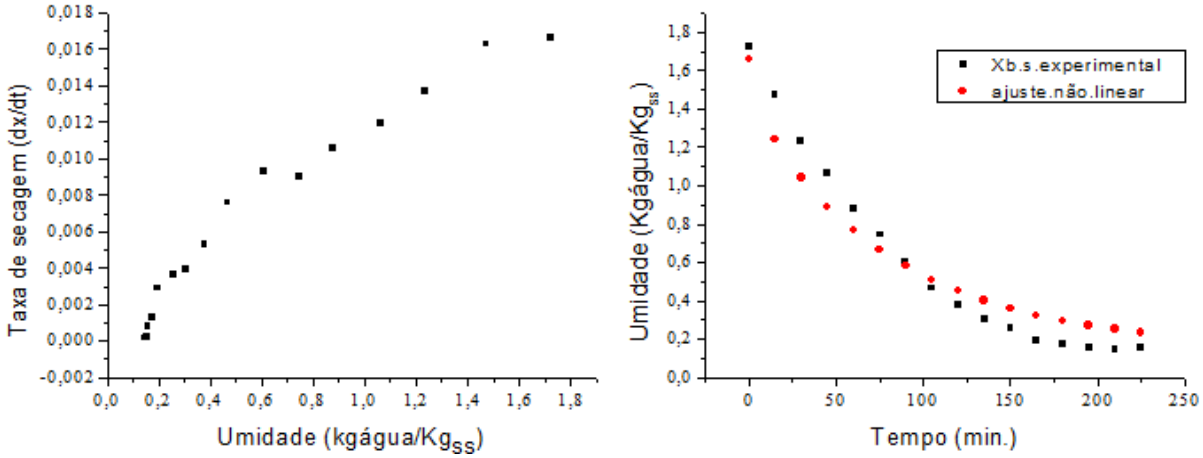
maior a velocidade de remoção e água. Comportamento semelhante foi observado na literatura (HAHMAN e KUMAR, 2006).

A umidade critica para as temperaturas de 70, 105 e 120°C foram, 1,75, 2,10 e 1,78 kg água.kg de sólido seco^{-1}, respectivamente. Nota-se nestes dados que a umidade critica foi maior para a temperatura de 105°C, apesar de o tempo até o fim da fase de velocidade constante ser o mesmo para as temperaturas de 105 e 120°C, pode-se dizer em relação a temperatura de 105°C que menos água foi eliminada nesta fase quando se compara com a temperatura de 120°C, muito provavelmente porque a velocidade de remoção de água foi menor, já que a temperatura é menos elevada. No entanto, para a temperatura de 70°C um valor próximo da umidade crítica obtida para a temperatura de 120°C foi observado, pois o processo de secagem a fase constante perdurou mais tempo, sendo eliminada também grande parte de água nesta fase.

Na fase de taxa de secagem decrescente, conforme maior a temperatura de secagem, maior foi a difusividade efetiva da água pelo sólido. Este fato mostra o efeito positivo da temperatura na maior facilidade de transporte da água pelos poros do material sólido, a maior temperatura diminui a viscosidade da água, assim como aumenta a agitação das moléculas, o que ocasiona uma maior facilidade de transporte da água do interior para a superfície do sólido. Os valores de difusividade aumentaram aproximadamente 52%, com o aumento de temperatura. Dados da literatura apontam comportamento semelhante para secagem de torta de azeitona, onde as difusividades variaram de 5,95 x 10^{-9} a 1,59 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$ (CELMA et. al., 2008) com o aumento da temperatura. Em acordo com este comportamento, nota-se que o tempo de secagem até a mesma umidade de equilíbrio, o que aponta a não formação de crostas, foi de aproximadamente 250 minutos para a temperatura de 70°C, 150 minutos para 105°C e aproximadamente 120 minutos para 120°C.

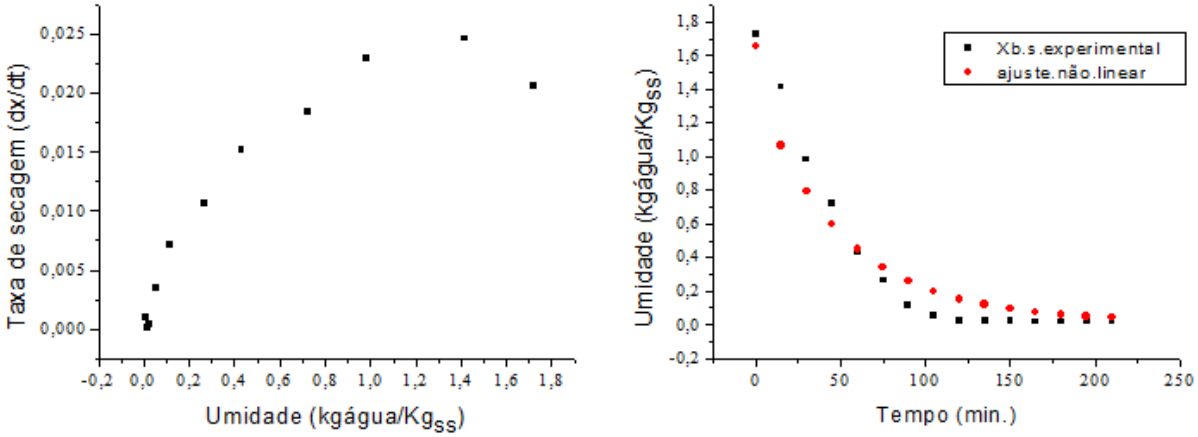
Por fim, observando os coeficientes de correlação dos ajustes das curvas de secagem, pode-se dizer que o modelo descreveu bem o comportamento dos dados experimentais, sendo obtidos coeficientes de correlação de no mínimo 96%.

As **Figuras de 29 a 31** mostram os dados coletados para a secagem do blend preparado com 20% em massa (b.s.) de cada um dos diferentes resíduos da bananeira.



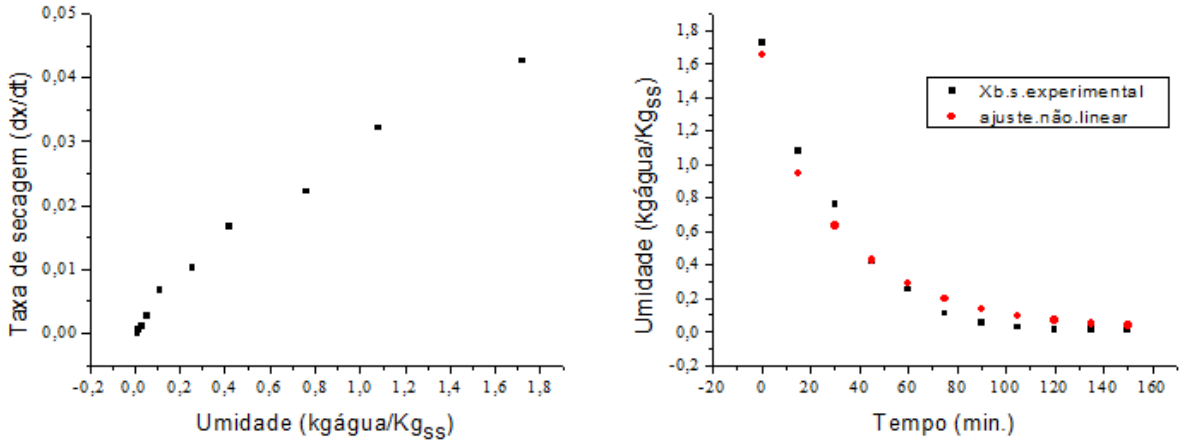
T°C =70°C	D_{ef} = 1,84 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,97

Figura 29: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do blend a 70°C.



T°C =105°C	D_{ef} = 2,95 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,97

Figura 30: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do blend a 105°C.



T°C =120°C	D_{ef} = 4,05 x 10^{-8} $m^2.s^{-1}$	R^2 = 0,99

Figura 31: Curva de taxa de secagem e curva de secagem experimental e predita do blend a 120°C.

Para o blend, a nenhuma temperatura de secagem estudada foi observada a taxa de secagem constante. Por ser composto por 5 diferentes biomassas, com características e umidades iniciais bem distintas, apresenta uma estrutura no todo mais complexa. Além disso, pode-se dizer que a mistura de materiais mais seco, como a folha, com materiais mais úmidos, como o engaço, gerou uma redistribuição da umidade no blend, o que também reflete no comportamento da secagem.

Sendo assim, nota-se que nas curvas apresentadas, quanto maior a temperatura, maior o valor da difusividade efetiva, sendo o valor 54% maior, conforme a temperatura aumenta de 70°C para 120°C. Consequentemente, nota-se que o tempo até a umidade de equilíbrio para a temperatura de 70°C foi de aproximadamente 200 minutos, para 105°C de 120 minutos e a 120°C de 90 minutos. Vale ressaltar, que para a temperatura de 70°C, a umidade de equilíbrio (0,152 b.s.) foi maior que as obtidas para as temperaturas de 105°C (0,018 b.s.) e 120°C (0,012 b.s.). Isso reflete o efeito do encolhimento gerado no material, quando temperaturas menores de secagem são utilizadas, influenciando assim na redução velocidade de secagem.

Pode-se dizer que o modelo também descreveu bem os dados de secagem para este material, sendo obtidos coeficientes de correlação de pelo menos 97%.

Como forma de comparar as difusividades efetivas obtidas para os diferentes materiais, em diferentes temperaturas, a curva de D_{ef} ($m^2.s^{-1}$) versus temperatura foi obtida e é apresentada na **Figura 32**, a seguir.

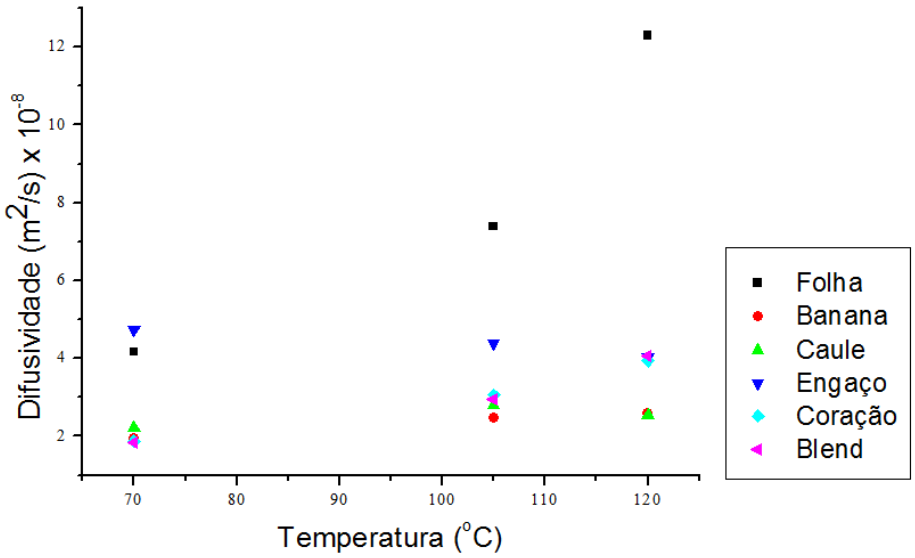


Figura 32: valores de *Def* ($m^2.s^{-1}$) para os resíduos da bananeira a diferentes temperaturas de secagem.

Nota-se na **Figura 32**, que a maior variação da difusividade em função da temperatura ocorreu para as folhas, provavelmente devido sua baixa umidade inicial, o que reflete de forma mais significativa no processo de difusão da água pelo material. O blend, assim como o coração, teve aumento semelhante na difusividade com o aumento na temperatura. Para estes materiais, conforme já previsto, a difusividade aumenta com o aumento da temperatura.

No entanto, para o fruto e pseudocaule foi observado que a difusividade aumenta entre as temperaturas de 70 e 105°C, mas tende a diminuir entre a temperatura de 105 e 120°C. Isso ocorre devido a efeitos de impedimento, como a incrustação ou formação de crosta na superfície do material, que limita o transporte de água pelo mesmo e que ocorrem em temperaturas mais elevadas de processo. Este efeito também depende muito das características do material que está sendo seco. Contudo, as variações dos valores a diferentes temperaturas foram de no máximo 26%.

O único material que teve o valor de sua difusividade diminuída com o aumento da temperatura foi o engaço, mesmo assim, pode-se dizer que a variação na difusividade não foi significativamente grande nas diferentes temperaturas, máximo de 15%. Este comportamento pode ser reflexo não só dos impedimentos devido o uso de altas temperaturas, mas também a influencia das características físicas deste resíduo, que é muito fibroso. Assim, pode-se dizer que inicialmente a água livre adsorvida no material fibroso é facilmente eliminada, contudo, a água ainda retida nas fibras, que é a eliminada por difusão, pode ter maior dificuldade de transporte do interior das células fibrosas até a superfície do material, mesmo quando a temperatura de secagem é maior, o que consequentemente pode gerar ressecamento e queima superficial do material, formando uma crosta que dificulta mais ainda a saída de água do material ao longo do tempo.

Alem disso, a viscosidade, que e uma propriedade que mede a resistência do fluido ao escoamento, interfere na difusão da água no produto (GONELI, 2008). Sendo assim, apesar de que o aumento da temperatura diminui a viscosidade da água liquida, favorecendo sua movimentação no produto, a viscosidade de um gás aumenta com o aumento da temperatura, reduzindo sua facilidade de transporte e consequentemente sua difusividade (MCCABE e SMITH, 1981). Assim, em alguns produtos, a água pode ter se movimentado diretamente no estado de vapor em temperaturas mais elevadas, ocasionando uma redução na difusividade efetiva do produto.

De um modo geral, pode-se dizer que a temperatura de 105^{o}C apresenta melhor desempenho para a secagem dos materiais, dentre as três temperaturas testadas. Nestas condições a temperatura causa menor interferência no material vegetal o que favorece a secagem.

5.5 Análise dos resultados da briquetagem

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da briquetagem dos resíduos da bananeira.

Os briquetes foram obtidos a partir da prensagem dos diferentes resíduos da bananicultura a 100^{o}C, temperatura esta que simula condições mínimas de plastificação da lignina e dos processos industriais de briquetagem (RAMOS e PAULA et. al., 2011). Como a temperatura e o tempo de prensagem são fatores importantes para a resistência mecânica dos briquetes, estabeleceu-se o tempo de 30 minutos para a briquetagem.

Se faz importante mencionar, que os diferentes resíduos da bananicultura, inclusive o blend, tiveram sua granulometria padronizada entre 5 e 10mm, assim como a umidade do pseudocaule (9,81%b.s.), engaço (11,52%b.s.), coração(8,52%b.s.), folha (10,33%b.s.), fruto(11,80%b.s.) e blend (9,68%%b.s.) antes do processo de briquetagem. Estes parâmetros foram estabelecidos com base em diversos trabalhos da literatura que investigaram a otimização do processo de briquetagem para diferentes materiais vegetais (MANI et. al, 2006; MORAIS, 2006 e LI e LIU, 2000). Vale destacar que o material excedente foi triturado até granulometria padronizada, com exceção de algumas partes fibrosas muito enoveladas, tanto do engaço quanto do caule. Além disso, para os diferentes briquetes, nenhum tipo de ligante foi adicionado, pois à temperatura de briquetagem estipulada, esperava-se que a lignina presente nos diferentes resíduos fosse suficiente para fazer o papel de ligante, gerando a aglomeração das partículas e formando briquetes de boa resistência mecânica.

A biomassa, já inserida no molde, foi aquecida até a temperatura de 100°C e prensada, reproduzindo assim as condições necessárias à plastificação da lignina e temperatura de briquetagem. Segundo estudos realizados por RAMOS e PAULA et. al. (2011), o tempo e a temperatura de prensagem são fatores de grande influência na resistência mecânica dos briquetes.

Durante a prensagem foram empregadas pressões de até sete toneladas,uma vez que a opção de empregar pressões mais elevadas foi descartada para que não houvesse influência sobre a capacidade energética dos briquetes. Em biomassas agrícolas com maior conteúdo de voláteis, o aumento da pressão reflete negativamente sobre o poder calorífico dos briquetes, uma vez que a elevação da temperatura aliada à alta pressão ocasiona perda de voláteis, reduzindo assim a capacidade térmica dos mesmos (FURTADO et. al., 2010). Os diferentes briquetes produzidos podem ser vistos na **Figura 33**

Figura 33: Resultado da briquetagem

Conforme nota-se na **Figura 33**, foi possível obter, nas condições estabelecidas, e com o sistema de prensagem proposto, briquetes reprodutíveis e bem dimensionados. Apesar de não haver sido realizado nenhum ensaio mecânico para avaliar a real resistência mecânica dos briquetes, foi subjetivamente possível dizer que, de um modo geral, os briquetes apresentaram boa resistência mecânica á tração por compressão, exceto o briquete obtido com os frutos da banana, conforme pode ser visto na **Figura 34.**

Figura 34: Briquete do fruto da banana

O fato de o briquete do fruto não ter se apresentado tão resistente quanto os briquetes obtidos a partir dos outros resíduos estudados provavelmente se deve à composição química da casca e da polpa do fruto da banana. Segundo SOUZA et. al. (2012) os teores de lignina na casca e na polpa da banana são de 2,05 e 2,2% respectivamente.

Segundo outros estudos da literatura, o teor de lignina no fruto alcança em torno de 7,2% (OBEROI et. al., 2011), ainda sendo uma porcentagem baixa se comparada com as demais amostras cujos teores de lignina, em geral, se apresentam na faixa de 8 a 24,3% (ALBINANTE et. al., 2012; LI et. al., 2010; ROMERO-ANAYA, 2011 e ROJA e NEVES, 2002).

Apesar de os teores de lignina não serem elevados para os resíduos da bananeira, a literatura aponta que são teores comumente encontrados em materiais vegetais, como bagaço de cana, palha de cana e casca de arroz (18 – 23%) (FERNANDES et. al., 2013), que também são utilizados para briquetagem. GOUVÊA (2012) aponta que um teor de 20% de lignina é suficiente para produzir briquetes com boa resistência e coesão entre as partículas.

Sendo assim, pode-se dizer que a temperatura e o teor de lignina naturalmente presente nos resíduos foram suficientes para gerar a plastificação da lignina, que passa a atuar como um aglutinante, unindo as partículas do material durante o aquecimento e a prensagem, impedindo que se descolem após o briquete resfriado e desenformado.

Pode-se dizer ainda que todos os resíduos da bananicultura demonstram potencial para serem utilizados como matéria prima na produção de briquetes, incluindo o fruto da banana, que apesar de isoladamente não demonstrar boas características para briquetagem, quando incorporado no blend de resíduos, gerou um material com bom potencial de briquetagem. Desta forma, todo o resíduo gerado na bananicultura pode ser utilizado no processamento de briquetes, tornando o uso destes resíduos viável, com agregação de valor ao subproduto, o que torna a cadeia da bananicultura mais sustentável e economicamente lucrativa.

A seguir serão apresentados os resultados das análises de densificação e análises térmicas realizadas com os resíduos antes e após briquetagem.

5.5.1 Avaliação da densidade dos resíduos antes e após briquetagem

O principal objetivo da briquetagem é aumentar a densidade dos materiais vegetais, principalmente quando estes possuem baixa densidade in natura, a fim de diminuir seu volume e concentrar sua capacidade energética, facilitando não só o transporte e armazenagem destes materiais, mas também melhorando a capacidade geradora de energia por m^3 de biomassa. Assim, o processo de briquetagem pode ser considerado um processo para densificação e concentração energética da biomassa (SRIVASTAVA et. al., 2014).

Relacionando a temperatura de briquetagem à densidade aparente, RAMOS e PAULA et. al. (2011) não constataram relação de nenhum tipo entre as duas variáveis, sendo que a temperatura máxima de briquetagem investigada foi igual a 125°C. No entanto,

QUIRINO et. al. (2012), demonstraram que temperaturas de prensagem mais elevadas (200°C), influenciam direta e positivamente na densidade dos briquetes.

Outro fator observado por PROTÁSIO$_2$ et. al., (2011), que estudou briquetes de resíduos de milho, casca de café e serragem de eucalipto, diz respeito a baixa variação da densidade aparente dos briquetes em relação ao tempo de armazenagem, sendo que a manutenção de uma densidade aparente mais elevada influi positivamente na densidade energética dos briquetes.

De um modo geral, pode-se dizer que quanto maior a densificação da biomassa pelo processo de briquetagem, maior será a concentração de energia por m^3 de biomassa e melhor a densidade energética. Sendo assim, tanto o tipo de material briquetado, quanto as condições de briquetagem podem interferir na densificação.

Na **Tabela 13** são apresentados os dados de densidade aparente obtidos para os briquetes produzidos, além de dados obtidos na literatura para diferentes briquetes obtidos a partir de variadas biomassas.

Tabela 13: Densidade aparente de briquetes de diferentes biomassas

Biomassa em forma de briquete		**Densidade Aparente (g.cm^{-3})**
Bananeira[a]	Pseudocaule	0,8136 ± 0,0049
	Engaço	0,6862 ± 0,0042
	Coração	0,7810 ± 0,0090
	Fruto	0,9955 ± 0,0109
	Folha	0,7909 ± 0,0276
	Blend	0,8361 ± 0,0462
Cana	Bagaço$_1$	0,606
	Palha$_1$	0,841
Arroz	Casca$_1$	1,077
	Casca$_2$	0,740
Madeira	Serragem$_1$	0,903
	Serragem$_3$	1,060
	Marvalha$_1$	0,850
Café	Caule$_1$	0,807
	Pergaminho$_1$	0,946
	Casca$_3$	1,248

1: RAMOS e PAULA (2010); 2: PROTASIO$_2$ et. al. (2011); 3:MORAIS et. al (2006).

[a] $\text{desvio padrão} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{n=1}^{n}(xi - \bar{x})^2} \quad n = 3$

Na **Tabela 13** pode-se notar que as densidades dos briquetes obtidos dos diferentes resíduos da bananeira variaram cerca de 30%, sendo a maioria dos valores compatíveis

com a densidade observada para outros tipos de briquetes. Assim, pode-se dizer que os resíduos da bananeira, de um modo geral, responderam bem ao processo de briquetagem ou densificação da biomassa.

A **Tabela 14** apresenta os valores de densidade aparente dos resíduos antes e após briquetagem. A partir destes valores é possível avaliar a eficiência do processo de briquetagem e a capacidade dos diferentes resíduos, quanto à tendência de compactação e o aumento da densidade da biomassa.

Tabela 14: Densidade aparente dos resíduos antes e após briquetagem

Resíduo	Densidade do resíduo[a] $g.cm^{-3}$	Densidade do briquete[a] $g.cm^{-3}$
Pseudocaule	0,1062 ± 0,0103	0,8136 ± 0,0049
Engaço	0,0816 ± 0,0306	0,6862 ± 0,0042
Coração	0,1509 ± 0,0063	0,7810 ± 0,0090
Fruto	0,2761 ± 0,0227	0,9955 ± 0,0109
Folha	0,1167 ± 0,0042	0,7909 ± 0,0276
Blend	0,1567 ± 0,0115	0,8361 ± 0,0462

[a] $\text{desvio padrão} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{n=1}^{n}(xi - \bar{x})^2} \quad n = 3$

Na **Tabela 14** observa-se o efeito positivo da compactação no aumento da densidade dos briquetes, conforme se esperava e conforme visto em outros trabalhos da literatura (QUIRINO et. al., 2012; PAULA, 2011. SRIVASTAVA et. al., 2014).

Nota-se também na **Tabela 14**, que as maiores densidades dos resíduos foram obtidas para os resíduos, que in natura, são menos fibrosos como o fruto e o coração, e as menores densidades para os resíduos mais fibrosos, como o pseudocaule e o engaço.

O volume do engaço, material que ocupa muito espaço devido a sua característica fibrosa, foi reduzido quase 9 vezes após a briquetagem. A menor densificação ocorreu para o fruto, sendo 3,6 vezes maior a densidade da biomassa após briquetagem. Assim, confirma-se o que apesar de a densidade dos briquetes dos resíduos menos fibrosos ser maior, o maior aumento da densidade, a partir da compactação, ocorre para os resíduos mais fibrosos, que possuem as menores densidades entre os diferentes briquetes de resíduos.

De acordo com pesquisas realizadas por FLORES et. al. (2009), através da briquetagem, pode-se reduzir de 4 a 11 vezes o volume do material de origem, dependendo da biomassa empregada. Para madeiras de espécies nativas, os mesmos autores, obtiveram uma redução de volume equivalente a 4,02 vezes, para o bagaço de cana-de-açúcar 6,84 vezes, e para o capim *Brachara sp.,* 11,09 vezes. Para QUIRINO et. al. (2012), a densidade ainda está intimamente ligada à densidade energética dos briquetes,

demonstrando assim, a importância do processo de briquetagem para a concentração energética da biomassa.

5.5.2 Análises térmicas

5.5.2.1 Avaliação do poder calorífico superior dos resíduos antes e após briquetagem

O poder calorífico superior é um parâmetro térmico muito importante que caracteriza a biomassa em termos de seu conteúdo energético. Conhecer este parâmetro, para as diferentes biomassas e combustíveis sólidos, é muito relevante em termos de simulação e projeto de sistemas térmicos onde as biomassas serão utilizadas (FERNANDES et. al, 2013).

Sendo assim, a **Tabela 15** apresenta os valores de poder calorífico superior (PCS) obtidos para os diferentes resíduos da bananeira antes e após briquetagem.

Observando a **Tabela 15** e considerando os desvios obtidos para as medidas de poder calorífico, pode-se verificar que de um modo geral, todos os resíduos antes da briquetagem apresentaram valores semelhantes para o poder calorífico. Isso demonstra que os diferentes resíduos possuem mesmo potencial energético, o que é positivo do ponto de vista de uso e valoração destes resíduos como combustíveis sólidos de queima. Comparando os valores do poder calorífico antes e após briquetagem, considerando os desvios envolvidos, também se pode dizer para a maioria dos resíduos, que o poder calorífico não foi alterado com o processo de densificação, esta observação se torna coerente, uma vez que esta grandeza é expressa em termos da massa do material.

Tabela 15: Poder calorífico superior (PCS) dos resíduos antes e após briquetagem

Amostra antes da briquetagem	PCS[a] (kcal/kg)	Amostra briquetada	PCS[a] (kcal/kg)
Pseudocaule	3368 ± 88,00	Briquete pseudocaule	3392 ± 88,00
Engaço	3316 ± 110,00	Briquete engaço	3476 ± 109,00
Coração	3672 ± 246,00	Briquete coração	4205 ± 50,00
Fruto	3483 ± 153,00	Briquete fruto	3532 ± 48,00
Folha	3470 ± 62,00	Briquete folha	3758 ± 82,00
Blend	3650 ± 156,00	Briquete blend	3688 ± 110,00

[a] $\text{desvio padrão} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{n=1}^{n}(xi - \bar{x})^2} \quad n = 3$

Sendo assim, esta comparação não reflete a efetiva acumulação de energia gerada pela briquetagem ou densificação dos resíduos. O parâmetro que efetivamente demonstra o efeito da densificação para a concentração de energia no briquete é a densidade energética, que expressa a energia da biomassa por volume.

Contudo, comparando-se os resultados apresentados na **Tabela 15** com resultados apresentados na literatura, é possível perceber que os resultados obtidos são coerentes e satisfatórios. Para o engaço da bananeira SOFFNER (2001) obteve um poder calorífico de 3157,00 kcal.kg^{-1}, valor muito próximo do obtido neste trabalho, de 3316,00 kcal.kg^{-1} . Para o pseudocaule MAIA (2013) obteve um valor de 3277,00 kcal.kg^{-1} para o poder calorífico, similar ao valor de 3368,00 kcal.kg^{-1} encontrado. Para a folha FERNANDES (2012) obteve um valor de 3909,09 kcal.kg^{-1}, diferindo um pouco do valor de 3470,00 kcal.kg^{-1} obtido no presente trabalho, provavelmente devido ao elevado teor de cinzas obtido para as folhas utilizadas (19,14%), o que pode ter contribuído para a redução da capacidade térmica do material.

Os maiores resultados de poder calorífico superior foram encontrados para o blend e para o coração, materiais estes com alto teor de carbono fixo (aproximadamente 22,05%), que juntamente com os altos teores de hidrogênio e materiais voláteis, atuaram colaborativamente para o valor de poder calorífico superior observado.

Os valores de poder calorífico obtidos para os resíduos da bananeira, também podem ser comparados com dados obtidos na literatura para diferentes resíduos agroindustriais utilizados como fonte alternativa de energias, segundo QUIRINO et. al. (2005), o poder calorífico para diferentes espécies florestais encontra-se entre 5260 kcal.kg^{-1} e 3350 kcal.kg^{-1}, PAULA et. al. (2011) reportam valores de poder calorífico para diferentes resíduos utilizados na briquetagem e como combustíveis sólidos, a saber, bagaço de cana (4,274 kcal.kg^{-1}), a casca de arroz (3,812 kcal.kg^{-1}), a casca de café (4,544 kcal.kg^{-1}) e serragem (4,435 kcal.kg^{-1}). Além disso, a norma sueca para briquetes exige que esta biomassa possua pelo menos 3869 kcal.kg^{-1} de poder calorífico, sendo assim, pode-se afirmar que os resíduos e os briquetes obtidos representam mais uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, demonstrando grande potencial para uso como biomassa de queima.

Conforme anteriormente mencionado, o poder calorífico pode ser correlacionado com a densidade do material antes e após briquetagem. Segundo QUIRINO e BRITO (1991), uma maior densidade aparente do briquete está ligada á ocupação de espaços vazios e consequentemente à sua qualidade e seu comportamento na combustão. Sendo assim, a densificação da biomassa gera uma concentração de energia na biomassa briquetada, logo a densidade energética, expressa em kcal.m^{-3}, é o parâmetro que reflete a eficiência da briquetagem no processo de acumulação de energia carregada pela biomassa.

Desta forma, os dados apresentados na **Tabela 14 e Tabela 15** puderam ser correlacionados e a densidade energética dos resíduos antes e após briquetagem avaliados.

5.5.2.2 Avaliação da Densidade Energética dos resíduos antes e após briquetagem

A **Tabela 16** apresenta os valores calculados para a densidade energéticas dos materiais antes e após briquetagem. A densidade energética é o parâmetro que demonstra a energia contida por volume de resíduo, e por isso reflete o efeito da compactação para o acúmulo de energia na biomassa briquetada.

Tabela 16: Densidade energética do resíduo e do briquete

Resíduos	Dens. energética resíduo ($Mcal.m^{-3}$)	Dens. energética briquete ($Mcal.m^{-3}$)
Pseudocaule	357,68	2759,73
Engaço	270,59	2385,23
Coração	554,10	3284,11
Fruto	961,66	3516,11
Folha	404,95	2972,20
Blend	571,96	3083,54

Observando a **Tabela 16** nota-se que, a briquetagem promoveu a concentração da energia disponível nos resíduos. A maior concentração de energia se deu para o engaço, que teve seu valor energético aumentado em 8,8 vezes por m^3. Isso ocorre principalmente devido a estrutura fibrosa do engaço, que assim como o pseudocaule ocupam grandes volumes, reduzidos através do processo de densificação.

SRIVASTAVA et. al. (2014) reportou aumentos de 10 a 15 vezes na densidade aparente de resíduos vegetais quando briquetados, que está intimamente relacionada com a densidade energética dos mesmos. Já MANI et. al. (2006) encontrou valores de densidade aparente até 23 vezes maior que a densidade aparente do resíduo seco, no caso, a palha do milho.

Presume-se que diversos fatores influenciam na densificação da biomassa e consequentemente no aumento de sua densidade energética. Dentre eles pode-se citar as características da biomassa em questão, a umidade antes da briquetagem, a pressão exercida durante a briquetagem e a elevação da temperatura, se houver.

Apesar destas análises, a densidade energética permanece sendo o produto da densidade e do poder calorífico, o que faz com que a maior densidade energética do briquete seja registrada para o fruto com $3516,11Mcal.m^{-3}$, sendo assim o briquete de resíduo com maior quantidade de energia por m^3, seguido do coração, com $3284,11Mcal.m^{-3}$ e do blend com $3083,54\ Mcal.m^{-3}$.

5.5.2.3 Análises termogravimétricas (TGA)

A seguir, serão apresentados os dados para a análise de degradação térmica realizada para os diferentes resíduos da bananicultura. Assim, analisando a curva de TGA pode-se observar a decomposição dos componentes do material, através de eventos térmicos representados por patamares. Com a curva de DTG (derivada da curva TGA) pode-se visualizar as temperaturas correspondentes ao início e final do evento térmico, além da temperatura em que a velocidade de reação é máxima, representada por um pico (DENARI e CAVALHEIRO, 2012).

De um modo geral, a literatura reporta que, a partir da análise das curvas termogravimétricas de vários materiais lignocelulósicos, compostos por hemicelulose, celulose e lignina, é consenso entre diversos autores a definição de temperaturas de degradação bem definidas para cada um dos compostos lignocelulósicos (FERNANDES, 2012; LIRA et. al., 2010; LUENGO et al., 2008; MAIA, 2013; MARABEZI, 2009; YANG et. al, 2007; SINGH et. al.,2005). Sendo assim, uma vez que o estudo térmico de vários tipos de materiais lignocelulosicos trouxe evidências de sua homogeneidade de resultados (SINGH et. al., 2005), os critérios descritos na literatura, certamente podem ser aplicados a outros tipos de biomassa vegetal.

Portanto, a literatura reporta que a perda de massa que ocorre a uma temperatura menor que 100°C se deve principalmente à evaporação de água e de outras substâncias de baixa massa molar. A perda de água dos materiais pode ser identificada até temperaturas de 180°C, podendo variar para menos, dependendo da origem da biomassa vegetal analisada. A temperatura mínima de início da degradação de hemicelulose é de 136°C, se estendendo até 315°C, seguida pela degradação da celulose, de 290 a 400°C. Já a lignina se decompõe mais lentamente, em uma faixa de temperatura ampla e abrangente, que pode ir desde 150 até 900°C (FERNANDES, 2012; LIRA et. al., 2010; LUENGO et al., 2008; MAIA, 2013; MARABEZI, 2009; YANG et. al, 2007; SINGH et. al.,2005).

Isso ocorre devido à natureza química e diferença na estrutura dos três componentes lignocelulósicos. A hemicelulose é composta de vários sacarídeos (xilose, manose, glicose, galactose, etc), apresentando uma estrutura amorfa e rica em ramificações que são mais facilmente degradadas a menores temperaturas com liberação de voláteis. Diferentemente da hemicelulose, a celulose é um polímero constituído por longas cadeias de glicose, sem ramificações, sua estrutura garante uma maior estabilidade térmica. Já a lignina tem uma estrutura mais complexa, repleta de anéis aromáticos com diversas ramificações, o que faz com que a mesma alcance amplas faixas de temperaturas de degradação (YANG et. al., 2007).

A seguir da **Figura 35 a Figura 40** serão apresentados os perfis de degradação térmica para os diferentes resíduos da bananicultura secos. As analises foram realizadas em triplicada, e a massa inicial de cada amostra variou entre 5 a 7 mg.

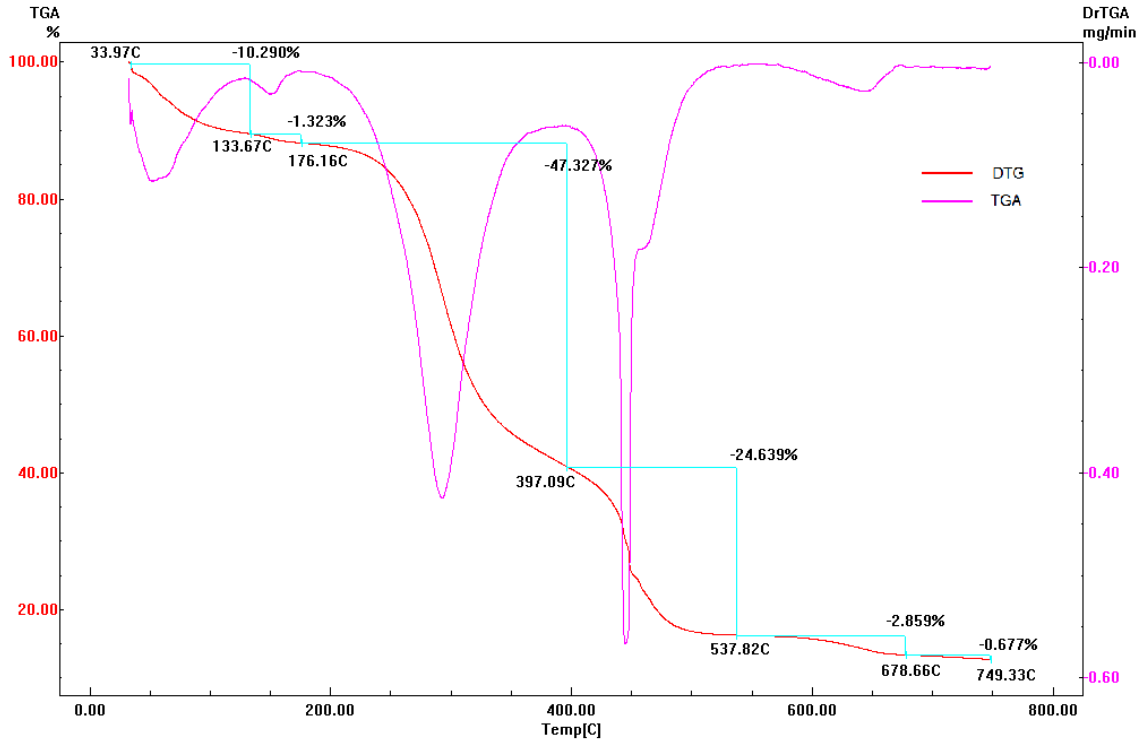


Figura 35: DTG e TGA do pseudocaule

Através da análise das curvas de TGA e DTG do pseudocaule (**Figura 35**), observa-se que até 176°C houve uma perda de massa de aproximadamente 11,61%, equivalentes à evaporação da umidade residual e de outras substâncias de baixa massa molar.

Observam-se ainda dois picos de mínimo distintos, um a temperatura próxima de 350°C e outro a 450°C, que de acordo com a literatura equivalem à decomposição da hemicelulose e celulose, respectivamente (LIRA et. al., 2010; LUENGO et. al., 2013; MARABEZI, 2009; SINGH et. al.,2005; YANG et. al., 2007). Pelo diagrama apresentado na **Figura 35**, nota-se que durante a degradação da hemicelulose, cerca de 47% da massa do material foi perdida, enquanto que para a degradação da celulose uma massa de aproximadamente 25% foi perdida. Porém é importante lembrar que a lignina se decompõe mais vagarosamente, em amplas faixas de temperatura, que compreendem também as faixas onde a hemicellulose e celulose são degradadas. A decomposição da hemicelulose, celulose e lignina se iniciam à temperatura de aproximadamente 176°C, se estendendo até 749°C, onde o processo se estabiliza. Até o fim da queima, em temperaturas de aproximadamente 750°C, as partes não degradadas corresponderam a 12,89%, valor este próximo do obtido para a análise de cinzas no pseudocaule.

Pode-se notar ainda na **Figura 35** que entre as temperaturas de 250 a 500°C a velocidade de degradação é maior. Para este resíduo, o tempo total de degradação foi de 64 minutos.

Para FERNANDES (2012) a perda de massa relativa a desidratação da amostra de pseudocaule se inicia em 154°C. As perdas de materiais voláteis ocorrem de 154 a 681°C, segundo o autor a perda de massa nessas temperaturas também está relacionada à degradação da celulose, hemicelulose e parte da lignina. Entre as temperaturas de 300 e 600 ºC ocorre a liberação de grande quantidade de energia, devido à degradação da fração volátil, correspondente à quebra de ligações das cadeias lignocelulósicas das biomassas.

Para MAIA (2013), a perda de água ocorre até 105°C para o pseudocaule, sendo que a degradação de materiais voláteis, hemicelulose, celulose e parte da lignina se inicia a 136°C perdurando até 560°C, quando a decomposição se estabiliza.

Pode-se dizer que os dados da literatura corroboram com o comportamento observado na **Figura 35** para a degradação térmica do pseudocaule.

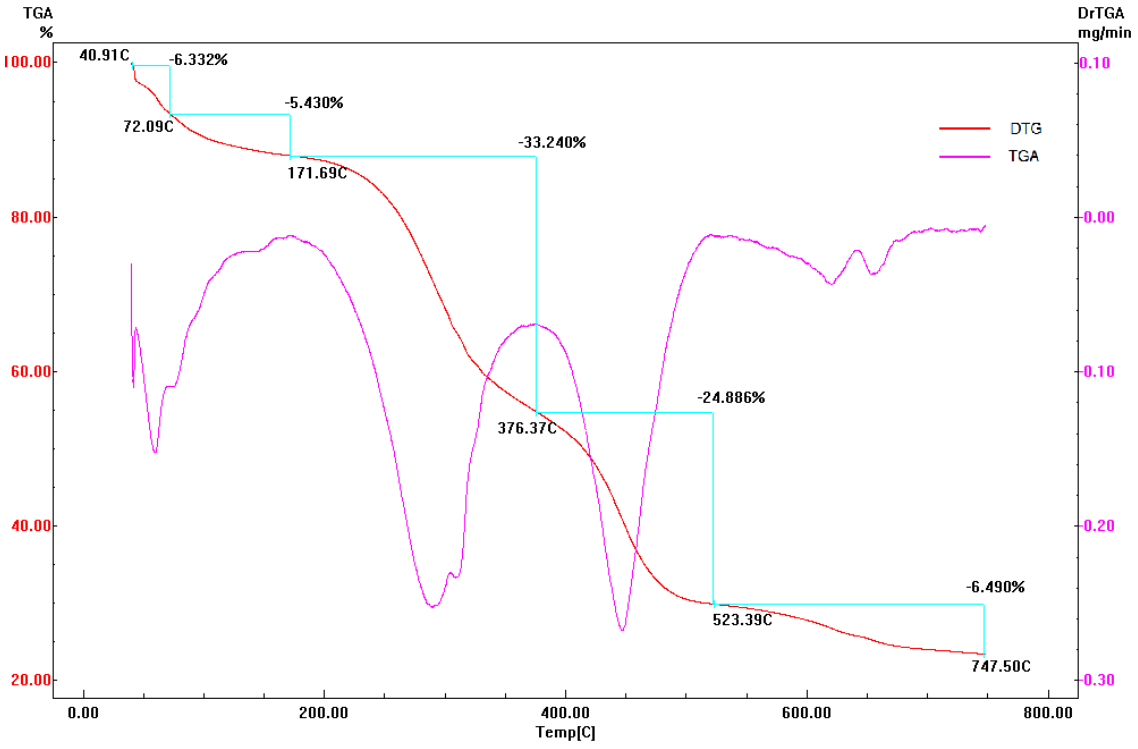


Figura 36: DTG e TGA do engaço

Na **Figura 36** nota-se que a primeira perda de massa foi equivalente a 11,76%, onde se indicou a perda da água ainda retida no engaço. Esta perda perdura até a temperatura de 171°C aproximadamente. Observam-se também dois picos de mínimo distintos, um a temperatura de aproximadamente 300°C e outro a 450°C, o primeiro equivale à degradação da hemicelulose e parte da lignina, com perda de massa de aproximadamente 33%, seguido da degradação da celulose e parte da lignina, com perda de massa de 25%

aproximadamente. A degradação se estabiliza a aproximadamente 747,5°C, com 23,62% da amostra não degradada. A maior velocidade de degradação é identificada na faixa de temperatura de 250 a 500°C, sendo o tempo total de degradação de 71 minutos.

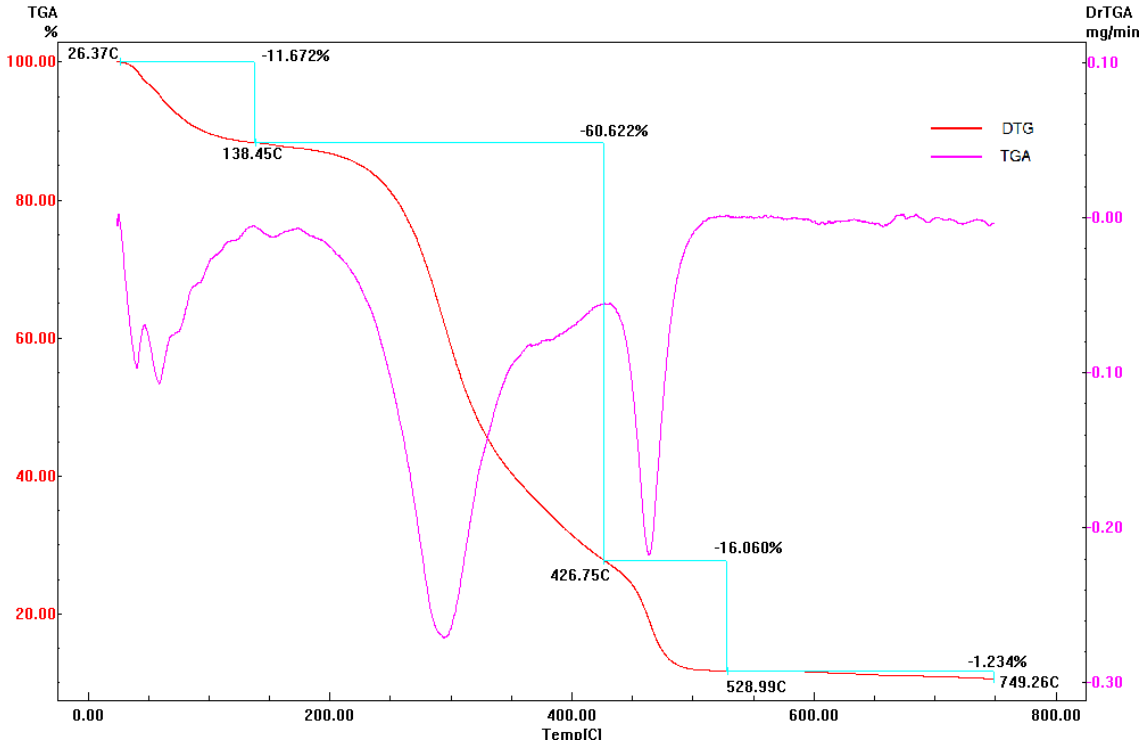


Figura 37: DTG e TGA do coração

Para o coração da bananeira, nota-se na **Figura 37**, que houve perda de massa, equivalente a 11,67%, devido à retirada da umidade até a temperatura de 138,45°C. A degradação da hemicelulose, celulose e lignina ocorreu principalmente entre 138,45 a 749,26°C, sendo dois picos de mínimo distintos obtidos, um a 300°C e outro a 475°C, correspondentes a degradação de hemicelulose e parte da lignina e de celulose e parte da lignina, respectivamente. As perdas de massa foram de quase 61% e 16%, respectivamente. Até a temperatura final de degradação de 750°C, a massa restante sem decomposição foi de 10,42%, sendo o tempo total de queima de 51 minutos. Pode-se notar claramente nos dados de degradação térmica para o coração, que este material possui uma perda de massa muito grande em temperaturas menores que 450°C, sendo consequentemente seu tempo de degradação térmica baixo. Provavelmente devido o alto teor de hemicelulose contido neste resíduo, o que o torna pouco atraente como biomassa de queima. Sendo a faixa de temperatura de máxima velocidade de queima entre 250°C e 475°C.

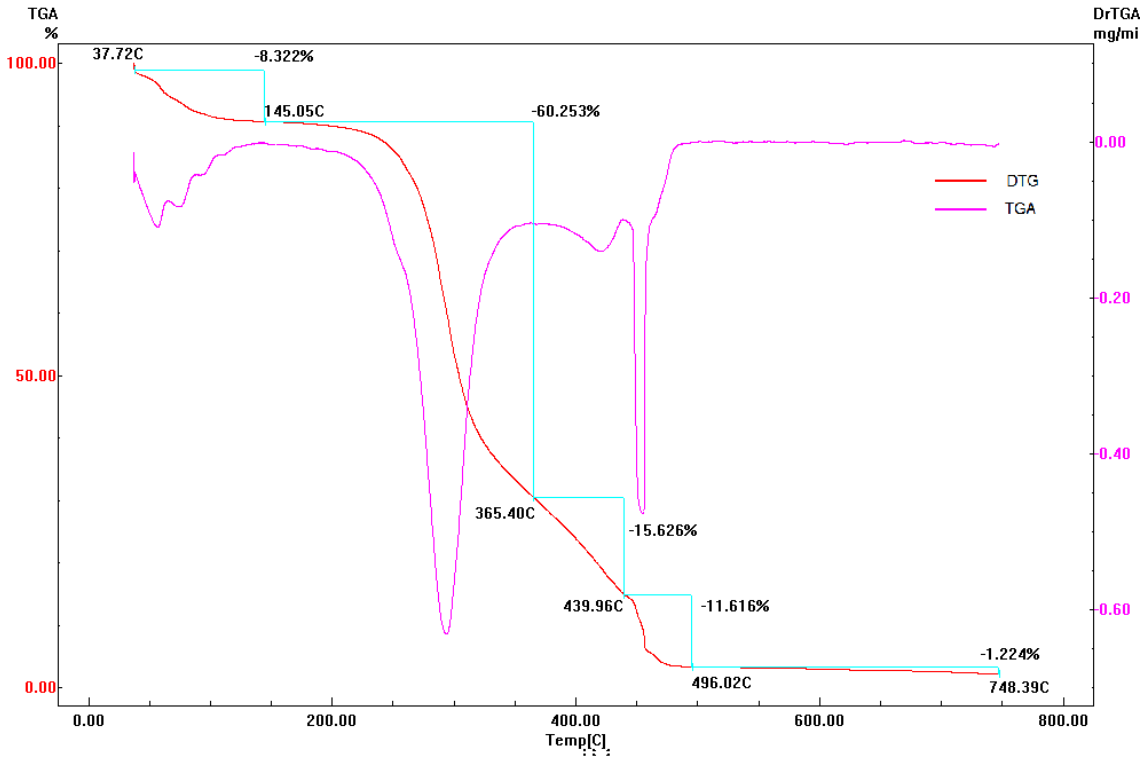


Figura 38: DTG e TGA da banana

Através da observação das curvas de TGA e DTG da banana (**Figura 38**), pode-se concluir que sua decomposição foi a mais acelerada dentre todos os materiais analisados, mostrando sua última decomposição a uma temperatura de 496,02°C. Essa decomposição mais acelerada pode ter ocorrido devido à maior área superficial por massa da amostra analisada, já que, apesar de todas as amostras terem sido padronizadas através de uma peneira de 100 mesh (0,149mm), a banana foi a que apresentou visivelmente maior volume de finos. Este fato também é identificado em dados na literatura que demonstram que para biomassa com maior área superficial, menor é a resistência à degradação térmica (PEREIRA et. al.,2013). Nota-se na **Figura 38**, que na temperatura de aproximadamente 350°C, quando ocorre principalmente máxima degradação da hemicelulose, cerca de 60% da massa foi perdida. A massa de água perdida inicialmente até 145^{o}C foi de 8,32%. Até o fim da queima, em 748,39°C, o material residual sem degradação foi de 2,96%. O tempo total de degradação foi de 47 minutos, o que mais uma vez desfavorece o uso deste resíduo como combustível de queima.

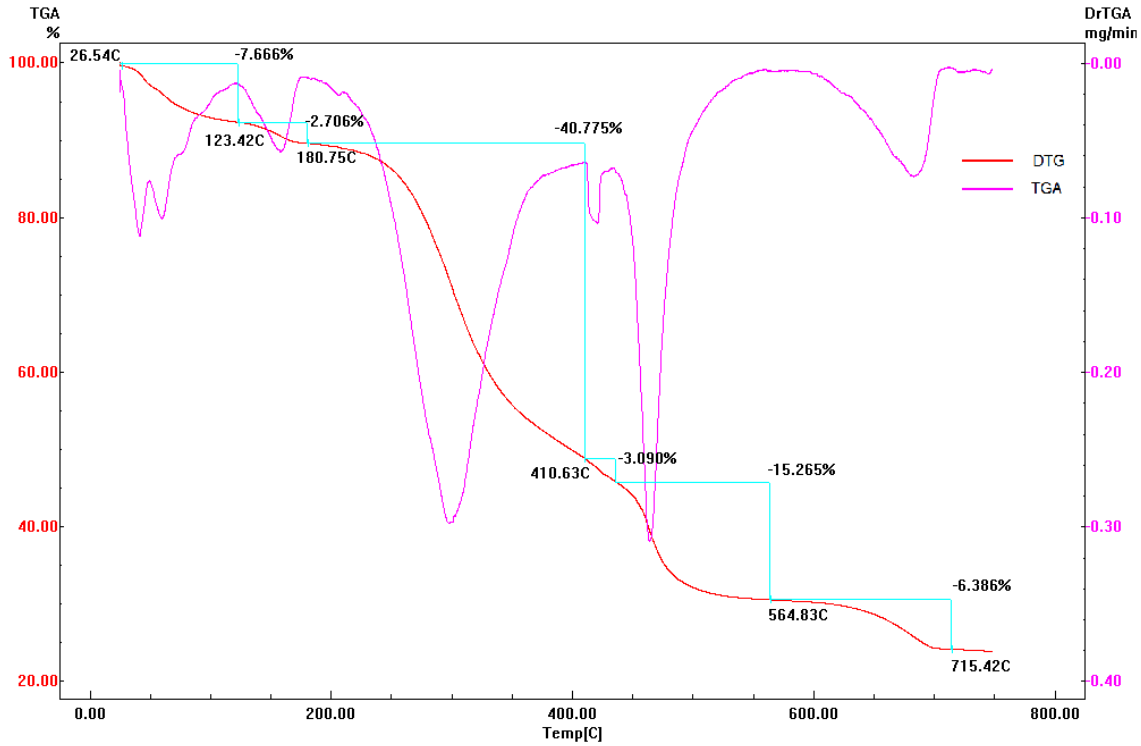


Figura 39: DTG e TGA da folha

Como pode-se observar na **Figura 39**, para a folha, a perda de água residual e de compostos de baixo peso molar ocorreu até 180,45°C, com 10,37% de massa eliminada. A 300°C a decomposição da hemicelulose foi máxima, com uma perda de massa de 41% e a 460° houve a decomposição máxima da celulose, com redução de 18% da massa. A lignina se decompõe ao longo do processo, sendo um último pico observado em 715,42°C, o que provavelmente pode caracterizar a calcinação de elementos inorgânicos, uma vez que foi identificado na folha um alto teor de cinzas. A parte não degradada foi de 24,11%. Nota-se na **Figura 39**, que para a folha, a faixa de degradação é extensa e gradativa, sendo o material degradado ao longo de toda a extensão de temperatura, o tempo total de queima foi de 69 minutos, valor próximo do obtido para o engaço, o que os caracterizam como potenciais alternativas para combustível de queima.

Para FERNANDES (2012) a perda de massa relativa à desidratação da folha ocorre até 152°C. Sendo que de 152 a 683°C ocorrem as perdas de materiais voláteis, que se deve a degradação da celulose, hemicelulose e lignina. Para MAIA (2013) a perda de água ocorre até 105°C, seguida da degradação de materiais voláteis, hemicelulose, celulose e parte da lignina, entre 145 a 585°C, com estabilização a 585°C.

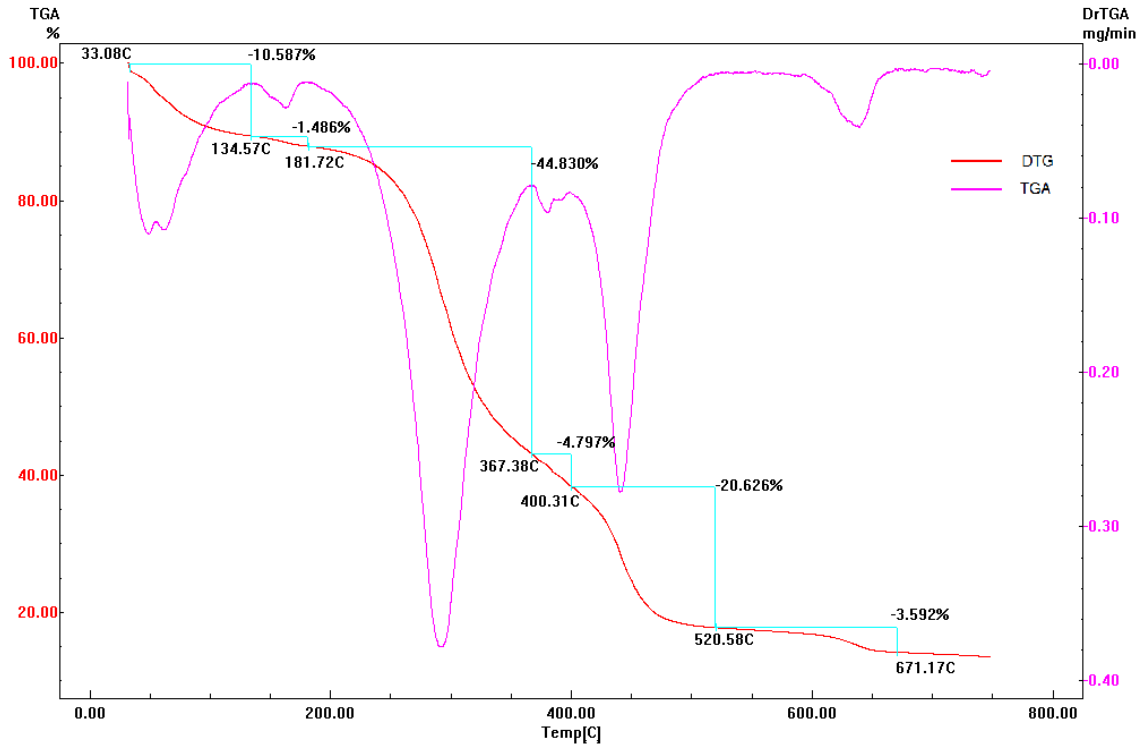


Figura 40: DTG e TGA do blend

Através da **Figura 40** nota-se que para o blend, a perda de massa (12,07%) devido à evaporação da umidade residual se prolongou até a temperatura de 181,72°. De 181,72°C até 671,17° ocorreu a degradação dos compostos lignocelulósicos, com picos distintos para a hemicelulose em aproximadamente 290°C e celulose em 450°C. As perdas de massa para estas frações foram respectivamente, 45% e 26%. A estabilização do processo ocorreu em 671,17°C, com 14,08% da amostra ainda não degradada. O blend de resíduos degradou-se num tempo de 64 minutos. Mais uma vez pode-se dizer que o blend dos resíduos da bananicultura é uma boa alternativa para viabilizar o uso de todas as partes da bananeira como biomassa de queima, apesar de algumas partes quando isoladas não demonstrarem bom potencial como biomassa, como é o caso do fruto e coração, quando reunidos em um blend com outras partes, gera uma biomassa com características químicas e térmicas que a torna uma alternativa renovável para geração de energia.

De uma forma geral, pode-se dizer que, para todos os resíduos, a primeira reação ocorre muito lentamente (perda de água e voláteis), seguida por reações rápidas (degradação de materiais lignocelulósicos). Além disso, observa-se um pequeno pico nas curvas de DTG de quase todos os materiais, entre 650 e 700°C. Para YANG et. al. (2007) este pico representa parte da decomposição da lignina. Uma outra hipótese é de que os picos observados para o blend, folha, engaço e pseudocaule sejam devido a calcinação, devido elevada quantidade de carbonatos, cujas temperaturas de decomposição variam de aproximadamente 400°C para o MgCO3 a 900°C para o CaCO3 (HECK).

Nota-se ainda que os únicos materiais que não obtiveram picos significativos a essa temperatura foram o coração e o fruto da banana, que como relatado anteriormente, possuem baixíssimos teores de lignina, menos de 7%.

6 CONCLUSÃO

Os resíduos da bananicultura, de um modo geral, demonstraram grande potencial de uso como biomassa alternativa para queima na geração de energia.

A composição química e térmica de algumas partes da bananeira se destacaram, como foi o caso do coração e frutos da bananeira, principalmente devido seu alto teor de carbono elementar, hidrogênio e carbono fixo, o que reflete positivamente no poder calorífico e densidade energética. No entanto estes mesmos materiais, demonstraram um comportamento de degradação térmica desfavorável, provavelmente devido o baixo conteúdo de lignina, pois degradam muito rapidamente, o que é industrialmente desvantajoso. Além disso, o briquete obtido a partir da banana mostrou-se quebradiço, o que também inviabiliza sua aplicação.

No entanto, os demais resíduos, como o engaço e caule, que correspondem a quase 76% de todo o resíduo gerado na bananicultura, também demonstraram composição química e térmica atraentes, contendo teores de carbono elementar, hidrogênio e carbono fixo apreciáveis, além de poder calorífico compatível com varias biomassas utilizadas na briquetagem e na matriz energética brasileira. Além disso, demonstraram na briquetagem um ótimo desempenho de densificação, concentrando energia da biomassa com o mínimo volume. Os briquetes obtidos também tiveram boa estabilidade mecânica. Demonstram ainda ter gradativa degradação térmica, sendo degradados lentamente, o que industrialmente é desejável.

Contudo, o destaque foi o blend de resíduos preparado com 20% de cada material, esta biomassa reúne todas as características favoráveis das partes da bananeira, minimizando as características indesejáveis de algumas partes. Assim, o blend obteve bom desempenho de briquetagem com boa densificação do material, bom potencial calorífico e bom desempenho de queima. Assim, o uso desta biomassa viabiliza a utilização como um todo de todo o resíduo gerado na bananicultura, agregando valor aos resíduos e contribuindo para a diversificação da matriz energética brasileira.

O processo de briquetagem, nas condições investigadas, mostrou ser uma boa alternativa para agregar valor aos resíduos da bananicultura, além de ser uma opção para tratar os resíduos que apresentam grande volume. Assim, o processo de compactação permite economizar com transporte e armazenagem da biomassa, concentrando seu potencial energético através da briquetagem.

Contudo, os resíduos apresentam grande teor de umidade, o que é desfavorável para a biomassa de queima, assim a eliminação de umidade é essencial para permitir o uso destes resíduos como combustíveis sólidos. A pré-prensagem dos resíduos mostrou ser uma alternativa barata e viável para remover parte da água contida nos resíduos, o que

minimiza os gastos no processo de secagem. A secagem foi utilizada como tratamento adicional na redução de umidade dos resíduos. Neste estudo pode-se perceber que os diferentes resíduos, apesar de comportarem-se diferentemente durante a secagem, apresentaram difusividade efetiva para remoção da água na faixa de $1x10^{-7}$ a $2\ x10^{-8}$ $m^2.s^{-1}$, muito compatível com o observado para diversos materiais vegetais. A temperatura de 105°C mostrou ser eficiente para a secagem de todos os resíduos. Mais uma vez o blend demonstrou bom comportamento na secagem, sendo a alternativa mais interessante para se tratar os resíduos coletados no campo.

Assim, pode-se afirmar que todas as partes da bananeira possuem potencial aceitável para uso como biomassa de queima e produção de briquetes, sendo o blend a forma mais viável de utilização destes resíduos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo da viabilidade econômica e energética para a produção de briquetes de resíduos de bananeira;
- Estudo do comportamento mecânico dos briquetes produzidos a partir de diferentes blend de resíduos da bananeira;
- Estudo em escala piloto da produção dos briquetes;
- Estudos de outras aplicações para a biomassa da bananicultura envolvendo a produção de combustíveis alternativos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** 236p. 3 ed. Brasília: Aneel, 2008.

AKGUN, N. A.; DOYMAZ, I. Modelling of olive cake thin-layer drying process. **Journal of Food Engineering.** Vol. 68, pp. 455–461, 2005.

ALARUA, M.; KUKKC, L.; OLTB, J.; MENINDB, A.; LAUKA, R.; VOLLMERA, E.; ASTOVERC, A. Lignin content and briquette quality of different fibre hemp plant types and energy sunflower. **Field Crops Research**. Vol. 124, pp. 332–339,2011.

ALBINANTE, S. R.; PACHECO, E. B. A. V.; VISCONTE, L. L. Y. ; TAVARES, M. I. B. Caracterização de Fibras de Bananeira e de Coco por Ressonância Magnética Nuclear de Alta Resolução no Estado Sólido. **Polímeros,** São Carlos, v.22, n.5, 2012, Disponível em: <http://dx.doi.org/10,1590/S0104-14282012005000057 >. Acesso em: mar. 2014.

ANDRADE, P. F. de S. **Fruticultura-** Análise da Conjuntura Agropecuária. SEAB - Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento. Paraná, 2012.

ANWAR, S. I.; TIWARI, G.N. Convective heat transfer coefficient of crops in forced convection drying – an experimental study. **Energy Conversion and Management**. vol. 42, pp. 1687-1698, 2001.

ARAUJO, J. P. C. **Crescimento e marcha de absorção de nutrientes de bananeira (Musa sp. AAA), 'Grande Naine' no primeiro ciclo de produção.** 80 f. Tese. (Doutor em Agronomia). Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2008.

ARIAS, B.; PEVIDA, C.; FERMOSO, J.; PLAZA, M.G.;RUBIERA, F.; PIS, J.J. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. **Fuel Processing Technology**.vol. 89, pp. 169-175, 2008.

ASTM D1762-84(2013), Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org, DOI: 10.1520/D1762.

ASTM D2854-09(2014). Standard Test Method for Apparent density of activated carbon, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org, DOI: 10.1520/D2854-09R14.

ASTM D5057-10(2010). Standard Test Method for Screening apparent specific gravity and bulk density of waste, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, www.astm.org, DOI: 10.1520/D5057-10.

ASTM D5468-02(2007), Standard Test Method for Gross Calorific and Ash Value of Waste Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org, DOI: 10.1520/D5468-02R07.

ASTM E1755-01(2007), Standard Test Method for Ash in Biomass, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org, DOI: 10.1520/E1755-01R07.

ASTM E1757-01(2007), Standard Practice for Preparation of Biomass for Compositional Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007, www.astm.org, DOI: 10.1520/E1757-01R07.

ASTM E871-82(2013), Standard Test Method for moisture Analysis of Particulate Wood Fuels, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org, DOI: 10.1520/E0871.

ASTM E872-82(2013), Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org, DOI: 10.1520/E0872.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2012, **Balanço Energético Nacional 2012** - Ano base 2011: Resultados Preliminares. 51p. Rio de janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2012.

BASTOS, D. C**. Estudo da redução da hidrofilicidade de filmes biodegradáveis de amido de milho termoplástico com e sem reforço de fibra de bananeira através do tratamento por plasma SF_6**, 109 f. Tese. (Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

BATIDZIRAI, B.; MIGNOT, A.P.R.; SCHAKEL, W.B.; JUNGINGER, H.M.;FAAIJ, A.P.C. Biomass torrefaction technology: Techno-economic status and future Prospects. **Energy**. Vol. 62, pp. 196-214, 2013.

BLEY Jr., C.; LIBÂNIO, J. C.; GALINKIN, M.; OLIVEIRA, M. M. **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais**. 2 ed. Foz do Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional , FAO, Technopolitik Editora. 2009.

BORGES, A. L.; SOUZA, L. S. **O Cultivo da Bananeira**. 279 p. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2004.

BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. Ciência & Engenharia (**Science & Engineering Journal**), v.17, n.1/2, p.27-32, Joinville, SC, 2008.

BORGES, S. V.; MANCINI, M. C.; CORRÊA, J. L. G. C.; LEITE, J. B. Drying kinetics of banana by natural convection: influence of temperature, shape, blanching and cultivar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v. 35, n. 2, p. 368-376, mar./abr., 2011.

BRIANE, D.; DOAT, J. **Guide technique de la carbonisation: la fabrication du charbon de bois**. Aix-en-Provence, ÉDISUD. 180p. 1985.

BRIDGEMAN, T.G.; JONES, J.M.;SHIELD, I.; WILLIAMS, P.T. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. **Fuel.** Vol. 87, pp. 844–856, 2008.

CAPOTE, F. G. **Caracterização e classificação de coprodutos compactados da biomassa para fins energéticos.** 71 f. Dissertação (Mestre em Bioenergia). Programa de Pós-graduação Interinstitucional em Bioenergia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2012.

CELESTINO, S. M. C. **Princípios de secagem de alimentos.** Documentos/Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111, ISSN online 2176-5081; 276, Platina, DF: Embrapa Cerrados, 51 p., 2010.

CELMA, A. R.; ROJAS, S.; LOPEZ-RODRIGUEZ, F. Mathematical modelling of thin-layer infrared drying of wet olive husk. **Chemical Engineering and Processing.** v. 47, p. 1810–1818, Spain, 2008.

CENTRO DE SOCIOECONOMIA E PLANEJAMENTO AGRÍOLA. **Banana**. CEPA: 2009, Disponível em: <http://cepa.epagri.sc.gov.br> Acesso em: 20 de mar. 2013.

CHEN, D.; LIU, X.; ZHU, X. A one-step non-isothermal method for the determination of effective moisture diffusivity in powdered biomass. **Biomass and bioenergy**. Vol. 50, pp. 81-86, 2013.

CHEN, D.; ZHENG, Y.; ZHU, X. Determination of effective moisture diffusivity and drying kinetics for poplar sawdust by thermogravimetric analysis under isothermal condition. **Bioresource Technology.** Vol. 107, 451–455, 2012.

CHEW, J.J.; DOSHI, V. Recent advances in biomass pretreatment-Torrefaction fundamentals and technology**. Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 15, pp. 4212–4222, 2011.

CHIES, V. **Possibilidades de uso da biomassa para produção de biocombustiveis na Biotech 2012,** EMBRAPA, 2012, Disponível em: <http://www.embrapa.br/imprensa/noticias/2012/novembro/1a-semana/possibilidades-de-uso-da-biomassa-para-producao-de-biocombustiveis-na-biotech-2012/> Acesso em: 09 de jun. de 2013.

COATES, W. Using cotton plant residue to produce briquettes. **Biomass and Bioenergy**. vol. 18, pp. 201-208, 2000.

CORDEIRO, Z. J. M. **Cultivo da banana para o estado de Rondônia.** EMBRAPA, mandioca e frulticultura, 2003, Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Banana/BananaRondonia/index.htm >. Acesso em: 19 de mar. 2013.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia.** 734p. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2008.

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

CRUZ, P. de T. de A.; NOGUEIRA, M. F. M. Oportunidades para o desenvolvimento da biomassa energética no Brasil. **Biomassa e Energia**, Renabio, v. 1, n. 1, p. 37-44, 2004.

DENARI, G.B.; CAVALHEIRO, E. T. G. Princípios e aplicações de análises térmicas. São Carlos: Universidade de São Paulo. Instituto de Química de São Carlos.(IQSC). 40p, 2012.

e o armazenamento sob condições controladas. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa – UFV. 188p. 2008.

EROL, M.; HAYKIRI-ACMA, H.; KUCUKBAYRAK, S. Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. **Renewable Energy**, Vol. 35, pp. 170–173, 2010.

FAO - FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION. 2013, Disponível em: <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Counprof/Brazil/Brazil.htm>. Acesso em: 15 de jul. de 2013.

FELFLI, F. F. ; MESA, J. M.; ROCHA, J. D.; FILIPPETTO, D.; LUENGO, C. A. PIPPO, W. A. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and Bioenergy.** v. 35, n. 1, p. 236-242, Campinas, SP, 2011, Disponível em: <http://www.elsevier.com/ locate/biombioe>. Acesso em: mar. 2014.

FELLOWS, P. J. **Tecnología del processado de los alimentos -** principios y práctica. Título Original: Food Processing Technology - Principles and Practice. 575 p. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 2000.

FERNANDES, E. R. K. **Valorização de resíduos gerados na bananicultura por conversão termoquímica por pirólise.** 88f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Processos). Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, SC. 2012.

FERNANDES, E. R. K.; AFUSO, R. K. S.; SCITT, C. C.; SELLIN, N.; Souza, O.; MEDEIROS, S. H. W. Avaliação do potencial para reaproveitamento de resíduos da bananicultura por pirólise. In: **II Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais.** Foz do Iguaçu, PR. 5-17 mar, 2011.

FERNANDES, E.R.K; MARANGONI, C.; SOUZA, O.; SELLIN N. Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. **Energy Conversion and Management.** Vol. 75, pp. 603–608, 2013.

FERREIRA, P. e PROENÇA, M. B. Estudo sobre o uso de casca de banana, folha e tronco de bananeira como biomassa para substituição de lenha em caldeiras flamotubulares. **5° Foro científico estudantil do instituto superior Tupy** – Fociest. Santa Catarina, 2010.

FERREIRA, R. A. dos R. **Contribuição ao estudo cinético e balanço energético da pirólise autotérmica da palha de cana-de-açúcar através de análises termogravimétricas e calorimetria.** 81 f. Dissertação. (Mestre em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Química. Uberlândia, 2012.

FILLIPETTO, D. **Briquetagem de resíduos vegetais:** Viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado. 61 f. Dissertação (Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos). Faculdade de Engenharia mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2008.

FLORES, W. de P.; YAMAJI, F. M.; VENDRASCO, L.;COSTA, D. R. da. Redução do volume biomassa no processo de briquetagem**. Revista da madeira**. ed. 121, 2009, Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1419&subject=E%20mais&title=Redu%E7%E3o%20do%20volume%20de%20biomassa%20no%20processo%20d%20briquetagem>. Acesso em 03 ago.2014.

FURTADO, T. S.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; BELLOTE, A. F. J. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.30, p.101-106, Florianópolis, SC, 2010.

GAVA, J. A. **Princípios de Tecnologia de Alimentos.** 284p. São Paulo: Nobel, 1984.

GEANKOPLIS, J. C. **Transport Processes and Separation Process Principles.** 1026p. 4 ed. Massachusetts: EUA, 2012.

GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e Economia do Briquete de Madeira**. Tese (Doutor em Ciências Florestais). Universidade de Brasília – UnB, Brasília. 2008.

GEORGES, F. **Caracterização da palha de cana-de-açúcar do Rio Grande do Sul e de seus produtos de Pirólise**. 102 f. Dissertação (Mestre em Ciências dos Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, RS. 2011.

GILBERT, P.; RYU, C.; SHARIFI, V.; SWITHENBANK, J. Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops. **Fuel**. Vol. 88, pp. 1491–1497, 2009.

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

GOMES, A. L.; SILVA, A. L.; BATISTA, D. C.; MOREIRA, F. R. B.; FLORI, J. E.; OLIVEIRA, J. E. de M.; ARAÚJO, J. L. P.; PINTO, M. J.; CASTRO, J. M. da C.; MOURA, M. S. B.; AZOUBEL, P. M.; CUNHA, P. J. F.; SILVA, S. de O.; CORDEIRO, Z. J. M. **Sistema de Produção da bananeira irrigada. EMBRAPA semiárido, 2009.** Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/BananaBananeiraIrrigada /index.htm >. Acesso em: 19 de mar. 2013.

GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P.; LEÃO, A. L. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.5, p.657-661, 2009.

GONELI, A. L. D. **Dinâmica da variação das propriedades físico-mecânicas e da**

GOUVÊA, A. de F. G. **Produção de briquete a partir da adição da lignina Kraft com resíduo da indústria moveleira.** 101 f. Tese (Doutora de Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, MG, 2012.

GOUVEIA, J. P. G. de; ALMEIDA, F. de A. C. A.; FARIAS, E. da S.; SILVA, M. M. da; CHAVES, M. da C. V.; REIS, L. S. Determinação das curvas de secagem em frutos de cajá. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Especial, n.1, p.65-68, Campina Grande, 2003.

HECK, N. C. Calcinacao. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06632/Calcinacao.pdf>**.** Acesso em 15 de jan. de 2014.

HIRSMARK, J. **Densified Biomass Fuels in Sweden**. Swedish University of Agricultural Sciences. Master of Science Thesis. Examensarbeten n. 38, Uppsala. 2002, Universidade Sueca de Ciências Agrícolas. Dissertação (Mestre em Ciências). Teses No. 38, Uppsala, 2002.

HUSAIN, Z.; ZAINAC, Z.; ABDULLAH, Z. Briquetting of palm Fibre and shell from the processing of palm nuts to palm oil. **Biomass and Bioenergy**. vol. 22, pp. 505 – 509, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola:** pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. Rio de Janeiro: IBGE. v. 25, n.02, p.1-88, fev. 2012.

KIST, B. B.; VENCATO, A. Z.; SANTOS, C.; CARVALHO C. de; REETZ, E. R.; POLL, H.; BELING, R. R. **Anuário brasileiro da fruticultura 2012,** 128 p. Santa Cruz do Sul, RS: Editora Gazeta Santa Cruz do Sul, 2012.

Li YD, Liu H. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. Biomass & Bioenergy. vol. 19 pp.177-86, 2000.

LI, K.; FU, S.; ZHAN, H.; ZHAN, Y; LUCIA, L. A. Analysis of the chemical composition and morphological structure of banana pseudo-stem. **BioResources**. 5, vol.2, p. 576-587, 2010.

LIMA, O. C. da M.; PEREIRA, N. C.; MENDES, E. S. Análise da cinética de secagem de papel artesanal com ar ambiente em convecção forçada. **Acta Scientiarum Maringá**, v. 24, n. 6, pp. 1665-1671, 2002.

LIRA, T. S.; SANTOS, K. G.; MURATA, V. V.; GIANESELLA, M.; BARROZO, M. A. S. The Use of Nonlinearity Measures in the Estimation of Kinetic Parameters of Sugarcane Bagasse Pyrolysis. **Chemical Engineering Technology**. Vol. *33*, n. 10, 1699–1705, 2010.

LUENGO, C. A.; FELFLI, F. E.; BEZZON, G. **Pirólise e torrefação da biomassa.** *In*: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. "**Biomassa para energia".** 734p. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2008.

MAIA, B. G. O. **Valorização de resíduos da bananicultura e da rizicultura na produção de briquetes.** 92 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Processos), Universidade da Região de Joinville – Univille, Joinville, SC. 2013.

MANALULA, F. e MEINCKEN, M. An evaluation of South African fuelwood with regards to calorific value and environmental impact. **Biomass and Bioenergy**, v. 3 3 n. 3 p. 415-420, Western Cape, South Africa, 2009, Disponível em: <http://www .elsevier.com/locate/biombioe>. Acesso em: jun. 2014.

MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. Specific energy requirement for compacting corn stover. **Bioresource Technology.** Vol 97, pp. 1420–1426, 2006.

MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. Specific energy requirement for compacting corn stover. **BioResource Technology.** 97, p.1420–1426, Elsevier, Canada, 2006.

MARABEZI, K. **Estudo sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores de lignina e holocelulose em amostras de bagaço e palha de cana-de-açúcar.** 142 f. Dissertação. (Mestre em Ciências Físico-Química), Instituto de química de São Carlos/Universidade de São Paulo - IQSC/USP, São Carlos, SP. 2009.

MARCINKOWSKI, E. A. **Estudo da cinética de secagem, curvas de sorção e predição de propriedades termodinâmicas da proteína texturizada de soja.** Dissertação. 128f. (Mestre em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2006.

MARTINS JÚNIOR, F. L. **Calcário Agrícola.** Sumário mineral 2013, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Disponível em: https://sistemas.dnpm.gov.br/ publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=8971 Acesso em: jul. 2014.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C. **Operaciones básicas de ingeniería química**. Reverte, v. 1, 498 p. 1981.

MELO FILHO, A. B. de e VASCONSELOS, M. A. S. **Química de Alimentos.** 78 p. Apostila. Recife, UFRPE, 2011.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. MAPA. **Estatísticas.** Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/estatisticas>. Acesso em: 21 jun 2013.

MINISTÉRIO MINAS ENERGIA. MME. **Plano Nacional de Energia 2030,** 248p. MME/ Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2007.

MORAIS, D. M. **Briquetes de resíduos lignocelulósicos como potencial energético para a queima de blocos cerâmicos**: aplicação em uma indústria de cerâmica vermelha que abastece o Distrito Federal. 229 f. Tese. (Doutor em Estruturas e Construção Civil). Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Abiental. Distrito Federal, 2007.

MORAIS, M. R.; SEYE, O.; FREITAS, K. T. de; RODRIGUES, M.; SANTOS, E. C. S. dos; SOUZA, R. C. R. Obtenção de briquetes de carvão vegetal de cascas de arroz utilizando baixa pressão de compactação. **Anais – 6, Encontro de Energia no Meio Rural.**

Campinas, SP, 2006, Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/ scielo.php?pid=MSC0000000022006000200019 &script=sci_arttext>. Acesso em: abr. 2014.

NUNES, W.A.G.A. **Efeitos da irrigação com água de poços tubulares e do Rio Gorutuba sobre propriedades de solos da região de Janaúba-MG.** 167 f. Tese (Doutor em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

NYER, B.; MATSUMURA, K. **Jatropha fuel briquettes.** 16p.Colorado: University of Colorado. 2011.

OBEROI, H.S.; VADLANI P.V.; SAIDA, L.; BANSAL, S.; HUGHES, J.D. Ethanol production from banana peels using statistically optimized simultaneous saccharification and Fermentation process. **Waste Management**. Vol 31, pp. 1576–84, 2011.

OLIVEIRA, A. J. de e RAMALHO, J. **Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011,** 110 p. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Produção e Agroenergia. 2, ed. - Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica, 2006.

OLIVEIRA, A. L. P. **Extracção e Caracterização de Constituintes da Bananeira 'Dwarf Cavendish'.** 250 p. Tese (Doutor em Química). Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2007.

PAGLARINI, C. de S.; DA SILVA, F. S.; PORTO, A. G. P.; DOS SANTOS, P.; PIASSON, D. Estudo do fenômeno de encolhimento no processo de secagem de fatias de abacaxi pérola. **Enciclopédia Biosfera**, Centro científico conhecer. Vol. 8, n. 14, pp.1914, 2012.

PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D. Secagem: Fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, v.16, n.1, pp.93-127, 2014.

PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para a pèra bartlett (Pyrus sp.) com e sem desidratação osmótica. **Ciência e Tecnologia de Alimentos.** vol 21, ed. 1, pp. 73-77, 2001.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. de C. O.; CARVALHO, A. ,. ,. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. C. Estudo da Degradação Térmica da Madeira de *Eucalyptus* Através de Termogravimetria e Calorimetria. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.3, p.567-576, 2013, Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rarv/v37n3/ a20v37n3,pdf>. Acesso em: 10 ago. 2014.

PROTÁSIO, T. de P.; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.;RIBEIRO, M. X.; TRUGILHO, P. F.; LEITE, E. R. da S. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** v.16, n.11, p.1252–1258, 2012.

PROTÁSIO$_1$, T. de P.; ALVES, I. C. N.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; BALIZA, A. E. R. M. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira,** Colombo, v.31, n. 68, p. 273-283, out./dez. 2011.

PROTÁSIO$_2$, T. de P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES Jr., M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira,** Colombo, v.31, n. 66, p. 113-122, abr./jun. 2011.

qualidade das sementes de mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem

QUIRINO, W. F. e BRITO. J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal.** 18p. (série técnica 13). Brasília: IBAMA, LPF, 1991.

QUIRINO, W. F.; PINHA, I. V. de O.; MOREIRA, A. C. de O..; SOUZA, F. de; TOMAZELLO, M. filho. Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. **Scientia Florestalis**, v. 40, n. 96, p. 525-536, Piracicaba, dez. 2012.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T. do; ANDRADE, A. P. A. de; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. dos S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**. n. 89, pag 100-106, abril, 2005.

RAHMAN, N.; KUMAR, S. Evaluation of convective heat transfer coefficient during drying of shrinking bodies. **Energy Conversion and Management**. vol. 47, pp. 2591–2601, 2006.

RAMOS e PAULA, L. E.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne,** Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, abr./jun. 2011.

REIS, R. C.; BARBOSA, L. S.; LIMA, M. de L.; REIS, J. de S.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R. Modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, PB, v.15, n.4, p.347-353, 2011.

RENDEIRO, G. e NOGUEIRA, M. **Combustão e Gaseificação de Biomassa Sólida:** Soluções energéticas para a Amazônia. 192p. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

ROJA, M. L. B. e NEVES, J. M. Caracterização de fibras de bananeira “Nanicão” (Musa Grupo AAA, “Giant Cavendish”) como possível matéria-prima para produção de pasta celulósica para fabricação de papel. Anais - **Congreso Iberoamericano de Investigación em Celulosa y Papel.** Campinas, SP, 2002.

ROMERO-ANAYA, A.J.; MOLINA, G. P.; RUIZ-COLORADO, A.A.; LINARES-OLANO, A.; LECEA, C.S. Phosphoric acid activation of recalcitrant biomass originated in ethanol production from banana plants. **Biomass and Bioenergy**. Vol 35, pp. 119-204, 2011.

ROSA, M. F.; SOUZA FILHO, M. S. M.; FIGUEIREDO, M. C. B.; MORAIS, J. P. S.; SABTAELLA, S.T., LEITÃO, R.C. Valorização de resíduos da agroindústria**. II Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais** - II SIGERA 15 a 17 de mar. de 2011.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira.** 448p. Campinas, SP: Editora Unicamp.Tradução de: Industrial uses of biomass energy: the example of Brazil. 2005.

SANT’ANNA, M. C. S.; LOPES, D. F. C.; CARVALHO, J. B. R.; SILVA, G. F. da. Caracterização de briquetes obtidos com resíduos da agroindústria**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais,** v.14, n.3, p.289-294, Campina Grande, 2012.

SANTOS, C. T.; BONOMO, R. F.; CHAVES, M. A.; FONTAN, R. da C. I.; BONOMO, P. Cinética e modelagem da secagem de carambola (*Averrhoa carambola* L.) em secador de bandeja. **Acta Scientiarum Technology.** Vol. 32, n. 3, pp. 309-313, 2010.

SENADEERA, W.; BHADARI, B. R.; YOUNG, G.; WIJESINGHE, B. Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. **Journal of Food Engineering**, v.58, p.277- 283, 2003.

SEYE, O.**;** CORTEZ, L. A. B. ; GOMEZ E. O. Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos. **Encontro de Energia no Meio Rural,** AN. 3, Campinas, SP, 2003, Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo. php?> Acesso em 21 jan. 2014.

SILVA, J. T. A. da; BORGES, A. L.; CARVALHO, J. G.; DAMASCENO, J. E. A. Adubação com potássio e nitrogênio em três ciclos de produção da bananeira prata-anã. **Revista Brasileira de Fruticultura,** v. 25, n. 1, p. 152-155, Jaboticabal, SP, Abril 2003.

SILVA, M. B.; MORAIS, A. S**.** Avaliação energética do Bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação. **XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção** – ENEGEP: A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável. Rio de Janeiro, RJ, 13 a 16 de outubro de 2008.

SILVA. C. A. **Estudo técnico-econômico da compactação de resíduos madeireiros para fins energéticos.** 68 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP. 2007.

SINGH, R.; SINGH, S.; TRIMUKHE, K.D.; PANDARE, K.V.; BASTAWADE, K.B.; GOKHALE, D.V.; VARMA, A.J. Lignin–carbohydrate complexes from sugarcane bagasse: Preparation, purification, and characterization. **Carbohydrate Polymers**. Vol. 62, 57–66, 2005.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. Drying kinetics of Jatropha seeds. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 59, n.2, p. 171-177, mar/abr, 2012.

SOFFNER, M. de L. A. P. **Produção de polpa celulósica a partir de engaço de bananeira.** 56 f. Dissertação (Mestre em Ciências e tecnologia de Madeiras). Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2001.

SOUZA, O. ; SCHULZ M. A.; FISCHER, G. A. A.; WAGNER, T. M.;SELLIN, N. Energia alternativa de biomassa: Bioetanol a partir da casca e da polpa de banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v.16, n.8, p.915–921, Campina Grande, 2012.

SRIVASTA, N.S.L.; NARNAWARE, S.L.; MAKWANA, J.P.; SINGH, S.N.; VAHORA, S. Investigating the energy use of vegetable market waste by briquetting. **Renewable Energy.** Vol. 68, pp. 270-275, 2014.

STELT, M.J.C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J.H.A.; PTASINSKI, K.J.. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**. vol. 35, pp.3748-3762, 2011.

STOLARSKI, M. J.; SZCZUKOWSKI, S.; TWORKOWSKI, J.; KRZY_ZANIAK, M.; GULCZY_NSKI, P.; MLECZEK, M. Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass. **Renewable Energy**. Vol. 57, pp. 20-26, 2013.

VAMVUKA, D.; SFAKIOTAKIS, S. Combustion behaviour of biomass fuels and their blends with lignite. **Thermochimica Acta**. Vol 526, pp 192–199, 2011.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**. vol. 89, pp. 913–933, 2010.

VÉLEZ, H. A. V. **Aplicações de Secagem para o Aproveitamento de Resíduos da Banana, Visando sua Aplicação na Indústria.** 88f. Dissertação (Mestre em Engenharia e

Ciência de Alimentos). Universidade Estadual Paulista. UNESP, São José do Rio Preto, SP. 2011.

WILAIPON, P. The Effects of Briquetting Pressure on Banana-Peel Briquette and the Banana Waste in Northern Thailand. **American Journal of Applied Sciences**, vol. 6 n. 1, p. 167-171, Phitsanulok, Thailand, 2009.

YAMAJI, F. M.; VENDRASCO, L.; CHRISOSTOMO, W. FLORES, W. de P. Análise do comportamento higroscópico de briquetes. **Energia Agrícola,** Botucatu, vol. 28, n.1, p.11-15, janeiro-março,2013.

YAMAN, S.; AHAN, M. S.; HAYKIRI-ACMA, K. S.; KUCUKBAYRAK, S. Production of fuel briquettes from olive refuse and paper mill waste. **Fuel Processing Technology.** Vol. 68, pp. 23–31, 2000.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis**. Fuel**. Vol. 86, pp. 1781–1788, 2007.

ZERBINATTI, O. E**. Briquetagem de resíduos da cultura de café cultivado no sistema safra zero.** 42f. Dissertação. (Mestre em sistema de produção na agropecuária). Universidade José do Rosário Vellano. Alfenas, 2012.

ANEXO A

Trabalho de conclusão de curso de MBA

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS – FGV

MBA EM GESTÃO EMPRESARIAL

TURMA GE-08

VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UMA PLANTA FABRIL PARA PRODUÇÃO DE BRIQUETES COMBUSTÍVEIS

CAROLINA SAMPAIO ATHAYDE

Montes Claros - MG

2013

Carolina Sampaio Athayde

VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UMA PLANTA FABRIL PARA PRODUÇÃO DE BRIQUETES COMBUSTÍVEIS

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Abreu

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de MBA em Gestão Empresarial de Pós-Graduação *latu sensu*, Nível de Especialização, do Programa FGV Management como pré-requisito para obtenção do título de especialista

Turma GE-08

Montes Claros - MG

2013

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Sérgio e Carla, pais queridos que me servem de apoio e exemplo diariamente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor orientador Dr. José Carlos Abreu pela compreensão, auxílio e correções ao trabalho.

Á FGV Montes Claros, que cedeu sua estrutura durante agradáveis dois anos, anos estes que só me acrescentaram conhecimento e agregaram valores para que fosse possível o desenvolvimento deste trabalho; além de promover o principal, a inspiração para possíveis projetos futuros.

Aos colaboradores da FGV Montes Claros, pelo apoio, disposição em nos auxiliar como alunos e principalmente pela paciência louvável.

Não poderia deixar de agradecer, é claro, à excelente companhia durante estes anos da turma GE 08, que através de um clima descontraído e agradável permitiu que os módulos densos e cheios de conteúdo transcorressem com leveza. Sentirei saudades.

Finalmente, agradeço a Deus por me proporcionar mais uma conquista e aos meus pais, familiares e amigos, que sempre estiveram ao meu lado.

RESUMO

Athayde, Carolina Sampaio; Abreu, José Carlos.

Os resíduos compactados em briquetes possuem como vantagens em relação aos seus substitutos _lenha, gás natural e óleo combustível_ o fato de causar um menor impacto ambiental por ser um combustível renovável, produzido de forma sustentável. Além disso, o briquete é um combustível compacto e homogênio, de fácil manuseio e transporte. Sabe-se ainda que seu mercado é pouco explorado e tende a se expandir nos próximos anos, em que a busca por fontes renováveis de energia será uma crescente. Esta pesquisa abordou a proposta de implantação de uma fábrica de compactação de biomassa, agregando valor a resíduos originados da agricultura e silvicultura. Foram estudados três casos; o primeiro caso avaliou a produção de briquetes sem redução de impostos, que se mostrou inviável, devido aos altos valores de impostos incidentes sobre a venda de briquete. O segundo caso avaliou a produção de briquetes com uma redução de 20% no valor de compra da tonelada de matéria prima, viabilizando o investimento. O terceiro caso avaliou a produção de briquetes com uma redução de 6,3% no imposto ICMS, o que também viabilizou o investimento, comprovando o impacto da carga tributária brasileira sobre a viabilidade econômica de um projeto.

Palavras-chave: Viabilidade técnico-econômica, biomassa, briquetes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.2 _ Briquetes em formato de cilindro.....11
Figura 1.3 _ Imagens do processo industrial de briquetagem.....13
Figura 2.1.2 _ Mapa das empresas de briquetagem no Brasil.....15
Figura 2.1.3.1_ Balanço global de energia do estado de Minas Gerais no ano de 2010,.....17

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 2.1.3 _ Ranking da área plantada com eucalipto e pinus no Brasil em 2010.....16
Gráfico 2.1.3.2 _ Demanda de energia por fonte no estado de Minas Gerais no ano de 2010.....17
Tabela 2.1.4 (a) _Análise SWOT apresentada por Celiktas e kocar (2006).....18
Tabela 2.1.4 (b) _ Análise SWOT apresentada por Alakangas (2002).....19
Gráfico 2.2.2 _ Preço de venda dos briquetes no mercado brasileiro.....21
Tabela 3.1.1 _ Preço dos equipamentos de briquetagem.....22
Tabela 3.1.2 _ Regime de trabalho.....23
Tabela 3.2.3 _ Investimento fixo em ativos tangíveis.....23
Tabela 3.2.4 _Custo operacional para a capacidade de 3,168 t/h.....24
Tabela 3.2.5 _Impostos incidentes na venda dos briquetes.....24
Tabela 3.2.5.1 _Custo unitário e preço de venda.....25
Tabela 3.2.5.2 _Fluxo de caixa para os próximos 10 anos.....26
Tabela 3.2.6 _ Custo operacional para a capacidade de 3,168 t/h com custo de matéria prima reduzido em 20%.....27
Tabela 3.2.6.1 _Custo unitário e preço de venda.....27
Tabela 3.2.6.2 _ Fluxo de caixa para os próximos 10 anos.....28
Tabela 3.2.7 _ Impostos incidentes na venda dos briquetes.....28
Tabela 3.2.7.1 _Custo unitário e preço de venda.....29
Tabela 3.2.7.2 _ Fluxo de caixa para os próximos 10 anos.....29

SUMÁRIO

Pág.

SUMÁRIO EXCECUTIVO.....09
CAPÍTULO I
1 DESCRIÇÃO DO NEGÓCIO.....10
1.1 **BIOMASSA.....10**
1.2 **BRIQUETES.....10**
1.3 O PROCESSO INDUSTRIAL DE BRIQUETAGEM.....11
CAPÍTULO II
2 PLANO DE NEGÓCIO.....14
2.1 PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO.....14
2.1.1 Matéria-Prima.....14
2.1.2 Concorrentes.....14
2.1.3 Sugestão de localização da nova planta fabril.....15
2.1.4 Produtos Substitutos.....17
2.1.5 Análise SWOT.....18
2.2 PLANO DE MARKETING.....19
2.2.1 Mercado do briquete.....19
2.2.2 Preço de venda.....20
2.2.3 O marketing verde.....21
CAPÍTULO III
3 PLANO FINANCEIRO.....22
3.1 ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA.....22
3.1.1 Produção e equipamentos.....22
3.1.2 Regime de trabalho.....22
3.2 ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA.....23
3.2.3 Investimento.....23
3.2.4 Custos fixos e variáveis.....23
3.2.5 Estudo de Caso – Caso 1: Produção de briquetes sem isenção de impostos.....24
3.2.6 Estudo de Caso – Caso 2: Produção de briquetes com redução no custo da matéria-prima.....26
3.2.7 Estudo de Caso – Caso 3: Produção de briquetes com redução do ICMS.....28
3.3 ANÁLISES E CONCLUSÕES.....30
3.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....30
4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....31

SUMÁRIO EXECUTIVO

O Brasil dispõe de grandes volumes de resíduos vegetais, e a queima dessa biomassa como fonte de energia para geração de calor representa um enorme e crescente mercado em qualquer parte do mundo. A compactação desses resíduos, além de trazer vantagens operacionais, logísticas e econômicas, é uma tecnologia ambientalmente correta e socialmente sustentável. Os resíduos vegetais compactados em forma de briquetes são uma fonte renovável de energia, sendo assim uma alternativa para a substituição dos combustíveis fósseis. Além disto, a redução no consumo dos derivados de petróleo também diminui a emissão de gases promotores do efeito estufa.

Em maior ou menor grau, a maioria das nações do mundo busca promover ações para que as energias alternativas renováveis tenham participações significativas nas suas matrizes energéticas. Nesse contexto, a utilização de processos tecnológicos como a briquetagem e a implantação de indústrias fabris que atendam esse nicho de mercado necessita ser previamente avaliada quanto a sua viabilidade técnico-econômica.

Nesse sentido, o presente trabalho desenvolve um estudo técnico-econômico sobre a viabilidade da implantação de uma fábrica de compactação de biomassa para fins energéticos. O estudo sugeriu a implantação de uma planta fabril com capacidade anual de 3,168 toneladas de briquetes, operando a um regime de 44 horas semanais. No trabalho foram avaliados três casos, o primeiro caso simulou a produção dos briquetes sem isenção de impostos, o segundo caso simulou a redução no custo da matéria-prima em 20%, e o terceiro caso estudou a redução do imposto ICMS com o objetivo de avaliar o impacto da carga tributária brasileira no setor em questão, o de briquetagem da biomassa.

O objetivo final do trabalho foi a viabilização da entrada do produto ‘briquete’ no mercado nacional, utilizando-o em substituição aos combustíveis fósseis e evitando a exploração indiscriminada das florestas para produção de lenha, e sobretudo aproveitando os resíduos da silvicultura e da agricultura de forma ambientalmente sustentável e financeiramente inteligente.

CAPÍTULO I
1 DESCRIÇÃO DO NEGÓCIO

1.1 BIOMASSA

Todo material que provém de matéria orgânica, vegetal ou animal, pode ser considerado biomassa. Toda essa matéria contém certa quantidade de energia, que pode ser reutilizada diretamente através da combustão ou através de tecnologias de conversão mais eficientes, como a pirólise e a gaseificação (ANEEL, 2008).

O Brasil possui condições naturais e geográficas favoráveis à produção de biomassa, podendo se destacar no cenário mundial através da produção e uso desse material vegetal e de seus resíduos como recurso energético. Devido ao fato de estar localizado nas faixas tropical e subtropical o país recebe intensa radiação solar, o que torna seu clima propício para a produção de biomassa vegetal (MMA, 2013)

Outro importante dado é que o aumento na utilização da biomassa pode estar associado à redução no consumo de combustíveis fósseis, como o petróleo e seus derivados. Esses combustíveis, além de fontes de energia não renovável, estão associados à emissão de gases agravantes do efeito estufa (CRUZ E NOGUEIRA, 2004).

No Brasil, em 2012, a biomassa, com participação de 15,7% na matriz energética, foi a segunda principal fonte de energia, superada apenas por petróleo e derivados (38,6%) segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2012.

Nos países em desenvolvimento, a biomassa é a fonte de energia mais importante, representando aproximadamente 33% do total da energia consumida, os habitantes desses países representam nada menos que três quartos da população mundial. Sendo assim, o fato de que, no ano de 2050, aproximadamente 90% da população mundial estará vivendo em países em desenvolvimento sugere grande presença da biomassa como fonte de obtenção de energia (ROSILLO-CALLE et. al, 2005).

1.2 BRIQUETES

A briquetagem consiste no processo de densificação do resíduo através da compactação utilizando uma prensa. Para melhorar as características de combustão dos briquetes, os resíduos devem passar por uma processo de cominuição e homogeneização, para assim a adição de um aglomerante, quando necessário, e posterior compactação. Os produtos gerados são os briquetes, como representado na **Figura 1.2** (MORAIS et. al, 2006).

Apesar de estar sendo amplamente conhecida mais recentemente, a primeira patente relacionada à briquetagem foi concedida a William Easby, em 1848. O processo desenvolvido por Easby possibilitava a formação de aglomerados sólidos de tamanho e forma variados, a partir de frações finas de qualquer tipo de carvão, por meio da pressão

exercida sobre esse material. O produto podia então ser utilizado em máquinas a vapor e em fornos caseiros, permitindo assim recuperar os finos considerados como rejeito do beneficiamento do carvão (CARVALHO E BRINCK, 2004).

Figura 1.2: Briquetes em formato de cilindro

A briquetagem é uma forma bastante eficiente de se concentrar a energia disponível na biomassa. QUIRINO (1991), considera que 1,00 m³ de briquetes, contém pelo menos 5 vezes mais energia que 1,00 m³ de resíduos, levando-se em consideração a densidade a granel e o poder calorífico médio desses materiais.

A briquetagem influencia positivamente nas propriedades dos resíduos quando se trata de eficiência energética, facilidade de operação, logística e transporte. A compactação promove o aumento da densidade dos resíduos, facilitando seu armazenamento e garantindo sua disponibilidade por períodos maiores. A redução do volume ocupado pelo material ainda facilita o transporte e manuseio. Além disso, a briquetagem possibilita uma maior eficiência energética, pois devido à pressão de compactação ocorre um aumento no poder calorífico da biomassa (RODRIGUES et. al, 2002).

1.3 O PROCESSO INDUSTRIAL DE BRIQUETAGEM

O processo industrial de briquetagem de resíduos vegetais se encontra representado na **Figura 1.3**. Resumidamente, o processo conta com o transporte dos resíduos vegetais do campo para os locais de beneficiamento com sua respectiva cominuição. Quando os resíduos são de origem industrial o processo se torna facilitado, uma vez que não são necessárias as etapas de operação e transporte no campo. Depois de triturados, os resíduos são secos e encaminhados para a briquetadeira, principal equipamento do

processo. Com o briquete pronto, esfriado, e embalado, a última etapa é o transporte até o consumidor.

Uma unidade produtora de briquetes deve ter, além da briquetadeira, silos de armazenagem, picadores, moinhos e secadores para atender as etapas de pré-tratamento da matéria-prima. Após a produção, os briquetes podem ser ensacados ou empilhados e embalados para transporte e distribuição (EMBRAPA, 2012).

(A) Biomassa no campo

(B) Transporte e cominuição da biomassa

(C) Secagem da biomassa

(D) Briquetagem

(E) Briquete pronto

(F) Embalagem em saco-granel

(G) Embalagem em sacos arrumados

(H) Armazenagem

(I) Carregamento

(J) Transporte ao consumidor

(K) Fornalha Industrial

(L) Forno Doméstico

Figura 1.3: Imagens do processo industrial de briquetagem

Fonte: GENTIL, 2008 (Modificado pelo autor)

CAPÍTULO II

2 PLANO DE NEGÓCIO

O plano de negócios apresenta os objetivos de um negócio e quais os passos devem ser dados para que esses objetivos sejam alcançados, diminuindo os riscos e as incertezas. Ele detalha informações sobre o ramo, os produtos e serviços que irá oferecer, seus clientes, concorrentes, fornecedores e, principalmente, sobre os pontos fortes e fracos do seu negócio, contribuindo para a identificação da viabilidade de sua idéia e na gestão da empresa (ROSA, 2009).

2.1 PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO

2.1.1 Matéria-Prima

Os briquetes podem ser produzidos a partir de qualquer biomassa em forma de pequenas partículas com o conteúdo reduzido de umidade. No Brasil e na maior parte do mundo, o tipo de biomassa mais utilizado é o de origem florestal, em forma de serragem ou resíduos da sivilcultura. Resíduos agrícolas e agroindustriais também são muito utilizados, a saber os resíduos da produção de grãos como soja, milho, algodão e da indústria de beneficiamento de arroz. O bagaço das usinas de cana também é um dos resíduos mais utilizados como fonte de matéria prima para co-geração de energia no Brasil (EMBRAPA, 2012).

Em um levantamento feito por FILIPPETTO (2008) no mês de maio de 2007, quase a totalidade das empresas de briquetagem brasileiras declarou briquetar resíduos de madeira, discriminados entre: serragem, maravalha, resíduos florestais e casca de eucalipto. Foi encontrada uma empresa que, além de maravalha, compactava também casca de arroz (em Mato Grosso). Outra empresa de São Paulo compactava resíduos da produção de lápis. Segundo o autor, uma firma de briquetadeiras (Biomax) declarou ter vendido equipamentos para empresas que processam outros resíduos, tais como bagaço de cana, algodão e casca de café, mas estas empresas não constam nos dados relacionados pela pesquisa.

2.1.2 Concorrentes

Segundo levantamento feito por FILIPPETTO (2008), no mês de maio de 2007, foram encontradas 15 empresas produtoras de briquetes em atividade, distribuídas entre os Estados de São Paulo (4 firmas), Santa Catarina (4 firmas), Mato Grosso (2 firmas), Espírito Santo (2 firmas), e uma firma em cada um dos estados de Goiás, Pará e Tocantins. A localização de cada uma dessas firmas está representada na **Figura 2.1.2**.

A maioria das empresas tem como fonte primária e exclusiva de renda a fabricação de briquetes, sendo os resíduos ali utilizados originados de terceiros. Mas existem algumas

firmas onde a atividade de briquetagem surgiu como um modo de agregar valor aos resíduos que antes eram descartados (FILIPPETTO, 2008).

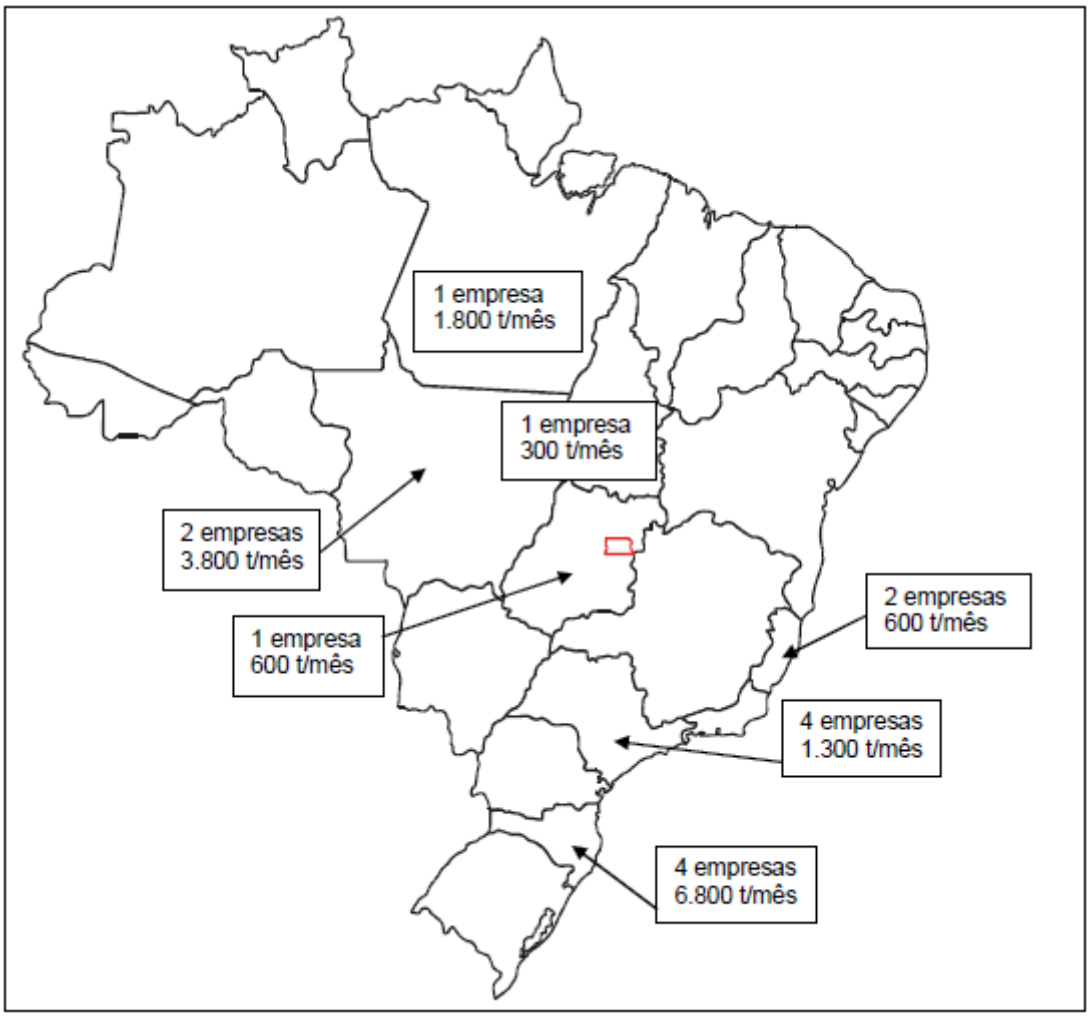


Figura 2.1.2: Mapa das empresas de briquetagem no Brasil.

Segundo PEREIRA (2009), no Brasil, duas empresas se destacam na produção de briquetes a partir de finos de carvão, sendo que uma delas não se encontra representada no mapa da **Figura 2.1.2.** Elas estão localizadas nas cidades de Santa Catarina e Sete Lagoas. Vale destacar que apesar de o Brasil ser grande produtor e consumidor de carvão vegetal, não tem tradição de uso de briquetes de carvão.

2.1.3 Sugestão de localização da nova planta fabril

O fato de se ter o registro de apenas uma empresa atuante na fabricação e venda de briquetes no estado de Minas Gerais, aliado ao fato de o estado ter a maior área plantada de Eucalipto e Pinus, o torna atrativo à futuras fábricas produtoras de briquetes, através tanto dos resíduos gerados da industrialização da madeira quanto dos resíduos da agricultura, outro forte potencial da região. Pode-se verificar o total de hectares em área

plantada em Minas no ano de 2010, em comparação as de outros estados através da tabela 2.1.3.

Tabela 2.1.3: Ranking da área plantada com eucalipto e pinus no Brasil em 2010

Posição	Estado	Total (ha)	Eucalipto (ha)	Pinus (ha)
1º	Minas Gerais	1.536.310	1.400.000	136.310
2º	São Paulo	1.206.818	1.044.813	162.005
3º	Paraná	847.931	161.422	686.509
4º	Bahia	658.034	631.464	26.570
5º	Santa Catarina	647.992	102.399	545.592
6º	Rio Grande do Sul	441.997	273.042	168.955
7º	Mato Grosso do Sul	392.042	378.195	13.847
8º	Espírito Santo	207.431	203.885	3.546
9º	Pará	148.656	148.656	-
10º	Maranhão	151.403	151.403	-

Fonte: ABRAF, 2011, citado por SEAPA, 2012

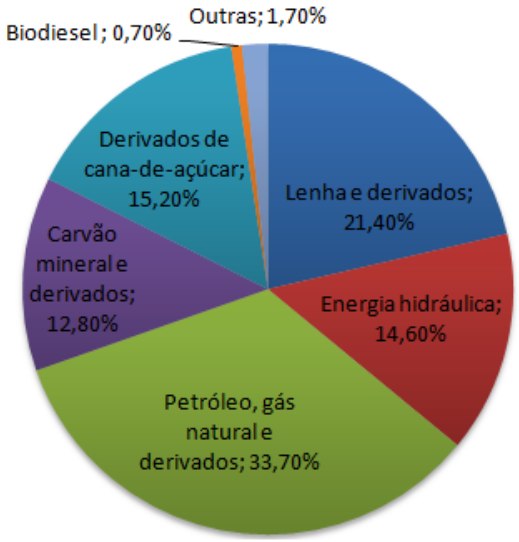
Além da ausência de empresas concorrentes e da abundância de matéria prima, o estado de Minas Gerais conta ainda com um mercado regional abrangente. Segundo O BALANÇO ENERGÉTICO DA CEMIG do ano de 2010, a demanda total de energia em Minas Gerais, em 2010, alcançou 35,8 milhões de tEP (tonelada equivalente de petróleo), valor equivalente a 13,2% da demanda total de energia no Brasil, apresentando um crescimento de 13,3% em relação ao ano de 2009, A importação global de energia pelo Estado em 2010, 20,5 milhões de tEP , representa 57,3% da demanda total. O elevado montante de importação de energéticos em Minas Gerais ocorre em função, principalmente, da necessidade de petróleo e seus derivados e de carvão mineral. A exportação inclui a energia elétrica e alguns derivados de petróleo. Esses dados são demonstrados pela **Figura 2.1.3.1.** A demanda de energia de acordo com a fonte está representada pelo **Gráfico 2.1.3.2**, em que o item “outras” inclui a energia proveniente das seguintes fontes: licor
Negro (fluido processual da indústria do papel e celulose), resíduos de biomassa industriais e agrícolas, e oleaginosas.

Figura 2.1.3.1: Balanço global de energia do estado de Minas Gerais no ano de 2010

[1] Tonelada equivalente de petróleo.

Fonte: BALANÇO ENERGÉTICO DA CEMIG, 2010

Gráfico 2.1.3.2: Demanda de energia por fonte do estado de Minas Gerais no ano de 2010



Fonte: BALANÇO ENERGÉTICO DA CEMIG, 2010

Além desses fatores, se faz necessário observar também o custo de transporte, que vai influenciar diretamente no preço de venda do produto, na margem de lucro obtida pela empresa e consequentemente na viabilidade do projeto como um todo. Para traçar uma estratégia mais acertada uma sugestão é adotar o modelo da “Teoria da Localização”, proposto por Weber (1929, citado por PES et. al, 2012), que estabelece que a localização mais adequada de uma indústria pode ser estabelecida com base em três fatores gerais: custos de transporte, mão-de-obra e forças aglomerativas (custos de insumos e produtos, disponibilidade de recursos, dificuldades administrativas, etc.).

2.1.4 Produtos Substitutos

Segundo estudos feitos por SILVA (2007), o briquete pode ser um substituto de outros tipos de energéticos, a saber, lenha, gás natural e óleo combustível, contribuindo com a redução da emissão dos gases de efeito estufa. Para tal basta se utilizar de processos adequados, que possuam uma boa eficiência na transformação em outros vetores energéticos.

Os estudos de SILVA (2007) fizeram uso do Poder Calorífico Inferior (PCI) aproximado dos briquetes e de cada um de seus materiais substitutos, calculando assim o rendimento energético médio de cada um. Segundo o autor, a eficiência energética não deve ser o único item a ser considerado na escolha do produto, como também a estabilidade de preços, a valorização do produto nacional e a sustentabilidade ambiental.

2.1.5 Análise SWOT

No Brasil o mercado do briquete ainda não é muito estudado, portanto são apresentadas análises SWOT desenvolvidas nos mercados da Turquia por CELIKTAS e KOCAR (2006, citado por GENTIL, 2008, p.102) e da Finlândia, por ALAKANGAS (2002, citado por GENTIL, 2008, p.102). Seguem as **Tabelas 2.1.5 (a) e 2.1.5 (b)** com as análises feitas por estes dois pesquisadores em relação à oferta e demanda dos briquetes combustíveis em suas respectivas nações.

Tabela 2.1.5 (a): Análise SWOT apresentada por Celiktas e Kocar (2006, citado por Gentil, 2008)

Pontos fortes da oferta	Pontos fracos da oferta
• Fácil de estocar • Possibilidade de agregar valor • Poucas emissões e odores na queima • Muitas opções de uso • Redução dos custos dos produtores rurais • Ausência de descartes químicos ou físicos • Sem afetar o solo agrícola • Aspectos ambientais • Possibilidade de aumento de empregos • Pouca poeira e cinza • Possibilidade de uso em fogões a lenha	• Falta de padronização e Normas • Ausência de *know how* do setor • Falta de uso na agroindústria • Falta de políticas de sustentabilidade agrícola • Concorrência • Instabilidade de custos • População com consciência ambiental do briquete • Fraca distribuição do produto • Confiabilidade
Oportunidades da demanda	**Ameaças da demanda**
• Crescimento da economia agrícola • Aumento do uso de energias renováveis • Existência de nichos de mercado • Posição geográfica favorável • Transporte fácil • Negócios e desenvolvimento de produtos • Informação e pesquisa do setor • Sócios, agentes e distribuição • Impacto sazonal	• Efeitos políticos e legislativos • Inovações • Sustentabilidade • Dificuldades de penetração no mercado • Resistência com outras energias concorrentes • Organizadas cadeias de energias concorrentes • Sazonalidade agrícola da produção • Doenças e pragas da agricultura • Ausência de forças competitivas

Tabela 2.1.5 (b): Análise SWOT apresentada por Alakangas (2002, citado por Gentil, 2008)

Pontos fortes da oferta	Pontos fracos da oferta
• Combustível renovável • Combustível compacto e homogêneo • energia ambiental, em relação ao CO_2 • Fácil uso, manuseio e transporte • Queima limpa e com baixo teor de cinza • Pouco exigente em armazenamento • Alto teor de energia e preço estável • Baixo preço da matéria-prima • Flexibilidade de uso, de fogões a grandes indústrias geradoras de energia	• Pequeno conhecimento entre os consumidores • Mercado recente • Equipamentos caros frente aos outros concorrentes • Altos custos de transporte e distribuição, assim como ausência de veículos apropriados para o transporte • Ausência de normas para o briquete • Estar o briquete ainda imaturo • Fontes longínquas de energia
Oportunidades da demanda	**Ameaças da demanda**
• Instabilidade dos combustíveis importados principalmente petróleo • Aumento crescente dos preços da eletricidade • Política energética favorecendo a energia local • Melhoria na qualidade das máquinas e equipamentos industriais do processamento da madeira, reduzindo assim o preço da matéria-prima • Grande potencial de crescimento • Melhoria do meio ambiente	• Política ambiental não-disponível ainda • Paralisação das exportações para a Suécia e Dinamarca • Escassez de matéria-prima. Se a matéria prima é desviada para outros fins ou se há menos fabricação de máquinas para o processamento da madeira • Redução dos preços dos combustíveis importados • Competição com alternativas locais como cavaco de madeira

2.2 PLANO DE MARKETING

2.2.1 Mercado do briquete

O mercado consumidor é o fator que mais contribui na viabilidade da implantação de uma planta fabril para produção de briquetes. O mercado Brasileiro consome grandes volumes de carvão vegetal, sendo assim, os briquetes produzidos serão facilmente absorvidos pelo mercado interno. Esses combustíveis são utilizados principalmente em pizzarias e no setor industrial, para o aquecimento de caldeiras. As pizzarias com fornos a lenha, embora usem pequenas quantidades em relação às indústrias, pagam melhor pelos briquetes (MAPA, 2012).

Uma pesquisa de mercado feita por SILVA (2007), mostra que a maioria dos comerciantes não têm preferências pelo tipo e nem a origem da lenha. Quando questionados sobre o fator determinante na decisão da compra, em primeiro lugar está a disponibilidade do produto, seguidos do preço e da qualidade.

Ainda segundo o autor, os resultados da pesquisa demonstraram concorrência praticamente nula entre os briquetes e a lenha. O mercado tende ainda a favorecer os produtos ambientalmente sustentáveis, como os briquetes, uma vez que seu uso é uma forma de evitar o uso de combustíveis fósseis e a exploração indiscriminada das florestas para a produção de lenha, e de, sobretudo, aproveitar de forma ecologicamente correta os resíduos madeireiros e agrícolas.

Em uma segunda pesquisa feita diretamente com empresas produtoras de briquetes, objetivou-se avaliar a extensão geográfica do mercado de venda de briquetes. Segundo o autor, FELIPPETTO (2008), a maioria das empresas se focalizavam em mercados regionais, tipicamente de abrangência estadual ou interestadual. Uma empresa afirmou que trabalha num raio econômico de 300 km. Outra metade das empresas declarou vender para todo o Brasil e, além disso, quatro dessas firmas ainda exportam para os Estados Unidos e/ou para Europa. A escolha da extensão do mercado não é estritamente relacionada com a quantidade de briquetes produzidos, pois, por exemplo, há uma indústria que vende todas as 3,500 toneladas de produção mensal num mercado regional, enquanto alguns produtores de menor porte conseguem atingir mercados estrangeiros.

2.2.2 Preço de venda

Por ser um produto relativamente novo em termos comerciais, ainda não existem informações consolidadas de mercado, nem normas de especificações técnicas ou comerciais. Na compra do briquete os compradores baseiam na unidade volumétrica (m^3) ou mássica (toneladas), como ocorre com a lenha, e isto gera distorções em função da variação da densidade energética. Neste caso o preço é por metros cúbicos ou toneladas e não pelo agente principal do uso, que é a energia e assim o ideal seria o preço por unidade energética, $R\$.kcal^{-1}$ (ZAKRISSON, 2002 citado por GENTIL, 2008).

Como é de se esperar, os preços dos briquetes sofrem variações de acordo com as regiões em que são produzidos e de acordo com o mercado consumidor (externo/interno, indústrias/pizzarias). Segundo GENTIL (2008), existem hoje no Brasil cerca de 60 usinas de briquetagem, produzindo um volume anual de 450 mil toneladas de briquetes, com preços variáveis entre R$ 150,00/ton a R$ 400,00/ton.

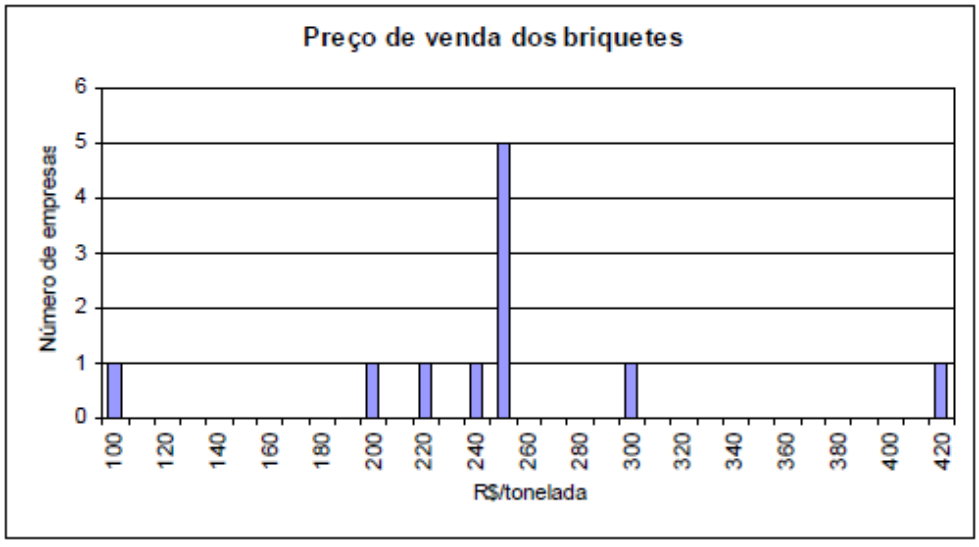


Figura 2.2.2: Preço de venda dos briquetes no mercado brasileiro.

Fonte: FILIPPETTO (2008).

FILIPPETTO (2008) em sua coleta de dados, que ocorreu em maio de 2007, encontrou a variação de preços entre R$100,00/ton e R$420,00/ton. O autor frisa ainda que o preço de venda do briquete varia em relação ao tipo de cliente, a quantidade encomendada e da distância da entrega. Pode-se observar na **Figura 2.2.2** que excluindo os dois valores extremos mencionados, o restante dos preços levantados oscilou entre R$200/ton e R$305/ton no mercado interno, com prevalência de valores perto de R$250/ton.

2.2.3 O marketing verde

O marketing verde é um meio de diferenciação da empresa em relação aos outros concorrentes, também é um meio de agregar valor aos produtos oferecidos ao mercado consumidor. Através dessa prática, a empresa demonstra responsabilidade social e ambiental, envolvendo os consumidores, colaboradores e a sociedade como um todo (SCARPINELII E RAGASSI, 2003).

Além de fortalecer a imagem da marca, o marketing verde possibilita que o cliente se sinta atraído por esta imagem, se tornando assim parceiro da marca. Com o intuito de compreender o marketing verde como uma vantagem competitiva, um estudo foi realizado em uma empresa de briquetes. Segundo o autor da pesquisa, FONSECA (2008), embora a empresa não realizasse operações de marketing, a mesma era bem vista pelo cliente pela qualidade dos produtos. O autor frisou ainda que se fossem adotadas ações de marketing para divulgação dos diferenciais do briquete como um combustível renovável e ambientalmente correto essas ferramentas com certeza proporcionariam vantagens competitivas revertidas, consequentemente, em maior lucratividade.

CAPÍTULO III

3 PLANO FINANCEIRO

3.1 ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA

A planta fabril idealizada deverá ter dimensões de aproximadamente 220 m² divididas em usina de briquetagem e armazém para produto acabado. A energia elétrica pode ser fornecida pela companhia de energia local por meio de ligação trifásica de alta tensão de 13800 V e rebaixada por um transformador de 150 KVA. O abastecimento da água pode ser feito por meio de poço que abasteça a caixa d'água com capacidade para no mínimo 2000 litros ou por meio da companhia de abastecimento local. O local de implantação do projeto deverá ser próximo as áreas geradoras de resíduos, para facilitar o transporte reduzindo custos de manuseio e operação. A capacidade anual da fábrica será de 3,168 toneladas, podendo variar de acordo com a quantidade de resíduo disponível.

3.1.1 Produção e equipamentos

A fábrica em análise possui capacidade para produzir 1500 kg/h, podendo beneficiar até 12 toneladas de resíduos diários. O equipamento utilizado para este processo terá um espaço destinado na planta de 25m², juntamente com o galpão de armazenamento, onde ficarão alocados os briquetes embalados, prontos para o transporte ao consumidor. Os briquetes serão de formato cilíndrico, tendo em média 93 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento. Especificações que vão de acordo com a briquetadeira comprada. Na **Tabela 3.1** estão representados dados a respeito do equipamento selecionado.

Tabela 3.1.1: Preço dos equipamentos de briquetagem

Equipamento	Capacidade Kg/h	Potência KW	Valor R$
Briquetadeira Mecânica	1.200 a 1.800	75	160.000,00
Total na Fábrica	1.200 a 1.800	75	160.000,00

3.1.2 Regime de trabalho

O regime de trabalho será estabelecido de acordo com o horário de funcionamento de uma empresa madeireira, exemplo de indústria onde uma planta fabril pode ser instalada aproveitando os custos reduzidos dos descartes madeireiros, e utilizando-os como matéria prima para fabricação de briquetes combustíveis. Nesta fabrica, o regime de trabalho é feito em um turno de 8 h, de segunda à sexta-feira, e aos sábados, em um turno de apenas 4 h, como pode se observar na **Tabela 3.1.2.**

Tabela 3.1.2: Regime de trabalho

Produção da máquina briquetadeira	1.500 kg/h	
Regime de trabalho	8 h/dia (segunda-feira a sexta-feira) 4 h/dia (sábado)	176 h/mês
Total de briquetes/mês	264.000 Kg/mês	

3.2 ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA

3.2.3 Investimento

Em sua pesquisa, Silva (2007) levantou dados de Investimento fixo em ativos tangíveis para uma fábrica de médio porte. Como pode ser observado na **Tabela 3.2.3**, o autor considerou uma depreciação de 10 % para máquinas, móveis e utensílios e 4% para edifícios, considerando 10 anos a vida útil das máquinas, móveis e utensílios e 25 anos para os edifícios.

Tabela 3.2.3: Investimento fixo em ativos tangíveis

Quantidade	Equipamentos	Custo Unitário (R$)	Depreciação anual (R$)
1	Equipamento de briquetagem	160.000,00	16.000,00
1	Instalação industrial	14.800,00	1.480,00
1	Móveis e equip. diversos	5.000,00	500,00
1	Construção civil	103.388,00	4.136,00
	Total	283.188,00	22.116,00

Fonte: GENTIL (2008), Modificado pelo autor.

3.2.4 Custos fixos e variáveis

Baseando nos dados avaliados por SILVA (2007), para uma empresa de briquetes de médio porte, foi elaborada a **Tabela 3.2.4** de custos operacionais, projetada para a capacidade de produção anual de 3,168 toneladas.

Tabela 3.2.4: Custo operacional para a capacidade de 3.168 t/h

Especificação	Valor R$	R$/t
Custos Fixos	34.783,00	10,98
Depreciação do maquinário	16.000,00	5,05
Pró-labore mão de obra administrativa	10.136,00	3,20
Manutenção	2.532,00	0,80
Depreciação predial e industrial	6.115,00	1,93
Custos Variáveis	412.299,00	130,14
Mão de obra	10.998,00	3,47
Matéria-prima	316.800,00	100,00
Material de embalagem	47.520,00	15,00
Combustível e lubrificantes	301	0,10
Energia	31.680,00	10,00
Despesas comerciais	5.000,00	1,58
Impostos	0,00	0,00
Total geral	447.082,00	141,12

3.2.5 Estudo de Caso – Caso 1: Produção de briquetes sem isenção de impostos

No primeiro caso foi avaliada a viabilidade econômica da instalação de uma planta fabril para a produção de briquetes sem isenção de impostos. Os impostos incidentes sobre a venda dos briquetes se encontram discriminados na **Tabela 3.2.5**. De acordo com dados fornecidos por outras fontes bibliográficas e dados pesquisados pelo autor, obteve-se também o custo unitário de fabricação e o preço médio de venda do briquete, que segundo FELFLI (2005) varia de R$ 180,00/t e R$ 220,00 FOB (Free on Board) no Brasil. Esses dados se encontram na **Tabela 3.2.5.1.**

Tabela 3.2.5: Impostos incidentes na venda dos briquetes

ICMS	18,00%
IR	4,80%
CSLL	1,00%
PIS/Confins	3,65%
CPMF	0,38%

Tabela 3.2.5.1: Custo unitário e preço de venda

Capacidade instalada (t/ano)	3.168,00
Custo unitário de fabricação (R$/t)	141,12
Imposto (27,83%) sobre a venda unitária (R$/t)	61,23
Custo unitário variável com impostos (R$/t)	202,35
Preço de venda do briquete (R$)	220

Através desses dados, é possível encontrar o valor presente líquido (VPL[1]) e a taxa interna de retorno (TIR[2]), que serão os indicadores financeiros utilizados para a análise da viabilidade econômica da produção do briquete combustível.

Para a montagem do fluxo de caixa será utilizada a **Equação 1**, que descreve o cálculo do Lucro Operacional (MACHADO, 2002 citado por SILVA, 2007).

$$LO = (Pvu \cdot Qv) - Cf - (Cvu \cdot Qv)$$

Equação 1

Sendo:

LO=Lucro operacional

Qv = volume de vendas em unidades

Pvu = preço de venda por unidade

Cf = custo operacional fixo por período

Cvu=custo operacional variável por unidade

[1] VPL é a soma algébrica dos benefícios líquidos do projeto devidamente atualizados (utilizando a taxa de desconto relevante). Para a tomada de decisão através deste indicador deve ser observado que se o VPL for positivo, então o projeto é viável. Se for negativo a taxa é menor que a esperada e é melhor não correr o risco de investir.

[2] TIR é a taxa de desconto com a qual o VPL é igual a zero. O indicador obtido com o cálculo da TIR serve para analisar a alternativa risco e retorno. Na dimensão retorno ela pode ser interpretada como um limite superior para a rentabilidade de um projeto de investimento (BOTTEON, 2009).

Tabela 3.2.5.2: Fluxo de caixa para os próximos 10 anos

Ano	LO anual (R$)
0	(-283.188,00)
1	55.914
2	55.914
3	55.914
4	55.914
5	55.914
6	55.914
7	55.914
8	55.914
9	55.914
10	55.914

Para análises dos indicadores financeiros a taxa mínima de atratividade (TMA) foi definida por SILVA 2007 em suas pesquisas como sendo 15% ao ano. Utilizando os dados do fluxo de caixa e ferramentas do programa Microsoft Excel (2010), obteve-se o valor de VPL igual a – R$ 2,568, O valor negativo do VPL indica uma perda de valor financeiro do ativo do investidor, mesmo que pequena, inviabilizando o projeto. O valor da TIR foi igual a 14,76%, sendo pouco menor que a taxa mínima de atratividade, confirmando assim a não indicação de se investir no projeto devido ao alto risco de perda de valor.

3.2.6 Estudo de Caso – Caso 2: Produção de briquetes com redução no custo da matéria-prima.

No segundo caso foi avaliada a viabilidade econômica da instalação de uma planta fabril para a produção de briquetes ainda sem isenção de impostos, mas neste caso, com uma redução de 20% no custo da matéria-prima. Os dados do custo operacional modificados são apresentados na **Tabela 3.2.6.** O custo unitário e preço de venda segue na **Tabela 3.2.6.1**. E por fim, o fluxo de caixa modificado se encontra na **Tabela 3.2.6.2.** Todos esses dados serão utilizados em seguida para calcular o efeito da redução de 20% no custo da matéria prima em relação à viabilidade financeira da produção de briquetes.

Tabela 3.2.6: Custo operacional para a capacidade de 3168 t/h com custo de matéria prima reduzido em 20%

Especificação	Valor R$	R$/t
Custos Fixos	34.783,00	10,98
Depreciação do maquinário	16.000,00	5,05
Pró-labore mão de obra administrativa	10.136,00	3,20
Manutenção	2.532,00	0,80
Depreciação Predial e industrial	6.115,00	1,93
Custos Variáveis	348.939,00	110,14
Mão de obra	10.998,00	3,47
Matéria-prima	253.440,00	80,00
Material de embalagem	47.520,00	15,00
Combustível e lubrificantes	301	0,10
Energia	31.680,00	10,00
Despesas comerciais	5.000,00	1,58
Impostos	0,00	0,00
Total geral	383.722,00	121,12

Tabela 3.2.6.1: Custo unitário e preço de venda

Capacidade instalada (t/ano)	3.168,00
Custo unitário de fabricação (R$/t)	121,12
Imposto (27,83%) sobre a venda unitária (R$/t)	61,23
Custo unitário variável com impostos (R$/t)	182,35
Preço de venda do briquete (R$)	220

Tabela 3.2.6.2: Fluxo de caixa para os próximos 10 anos

Ano	LO anual (R$)
0	(-283.188,00)
1	119.274
2	119.274
3	119.274
4	119.274
5	119.274
6	119.274
7	119.274
8	119.274
9	119.274
10	119.274

O VPL obtido nesta situação foi igual a R$ 315,420,00. Como o VPL é positivo, ocorrerá aqui um aumento de valor no ativo de R$ 315,420,00. O valor da TIR foi igual a 41,74%, perceptivelmente maior que a taxa mínima de atratividade estabelecida de 15%. Neste caso o investimento é aconselhável, uma vez que estes indicadores comprovam sua viabilidade.

3.2.7 Estudo de Caso – Caso 3: Produção de briquetes com redução do ICMS.

No terceiro caso foi estudada a redução do imposto ICMS em 6,3%, passando de 18% para 11,7%. Esta porcentagem foi baseada na redução que ocorreu em março de 2012 no estado de Santa Catarina, como medida de incentivo fiscal à madeira de reflorestamento comercializada no estado (SEF, 2012). Os impostos modificados se encontram na **Tabela 3.2.7**. Na **Tabela 3.2.7.1** encontra-se o custo unitário e o preço de venda modificado, e em seguida o fluxo de caixa na **Tabela 3.2.7.2**.

Tabela 3.2.7: Impostos incidentes na venda dos briquetes

ICMS	11,70%
IR	4,80%
CSLL	1,00%
PIS/Confins	3,65%
CPMF	0,38%

Tabela 3.2.7.1: Custo unitário e preço de venda

Capacidade instalada (t/ano)	3.168,00
Custo unitário de fabricação (R$/t)	141,12
Imposto (21,53%) sobre a venda unitária (R$/t)	47,37
Custo unitário variável com impostos (R$/t)	188,49
Preço de venda do briquete (R$)	220

Tabela 3.2.7.2: Fluxo de caixa para os próximos 10 anos

Ano	LO anual (R$)
0	-283.188,00
1	99.823
2	99.823
3	99.823
4	99.823
5	99.823
6	99.823
7	99.823
8	99.823
9	99.823
10	99.823

Neste caso o VPL obtido foi de R$ 217,800,00. Como o VPL é positivo, ocorrerá aqui um aumento de valor no ativo. O valor da TIR foi igual a 33,25%, maior que a taxa interna de retorno de 15%, refletindo o aumento de valor percebido e tornando o investimento viável, com a condição de que haja incentivos fiscais por parte do governo.

3.3 ANÁLISES E CONCLUSÕES

O mercado de briquetes combustíveis no Brasil ainda é pouco explorado, mas está em amplo crescimento energético. A utilização da tecnologia de compactação de biomassa, atendendo este nicho de mercado mostrou-se técnico e economicamente viável, através das simulações feitas por este estudo.

O primeiro caso estudado, em que se empregou a técnica de briquetagem sem a redução de impostos sobre a venda do produto mostrou-se economicamente inviável, devido aos altos valores de juros incidentes sobre a venda dos briquetes, com um VPL de – R$ 2,568 e uma TIR de 14,76%.

Numa segunda análise, verificou-se a viabilidade econômica do projeto com a redução de 20% no custo da matéria prima em toneladas. Neste projeto o VPL foi de R$ 315,420,00, e a TIR de 41,74%, tornando-o viável. Considera-se esta alternativa como a melhor solução para a implantação da planta fabril para produção de briquetes combustíveis. Sendo a matéria prima originária em sua maioria de resíduos agrícolas, agroindustriais e da silvicultura, uma busca por redução de seu custo, com um consequente aumentando na margem de lucro se torna uma possibilidade bastante realista.

Na terceira análise, a redução do imposto ICMS de 18% para 11,7%, se mostrou uma alternativa viável para a implantação da planta fabril e produção de briquetes, uma vez que obteve resultados de VPL e TIR iguais a R$ 217,800,00 e 33,25% respectivamente. Apesar dos resultados positivos, a dependência de incentivos fiscais por parte do governo para a viabilização do projeto impede a segurança no investimento.

3.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- **Avaliar o emprego de fontes de energia alternativa na matriz energética de uma planta fabril produtora de briquetes, utilizando fontes mistas como o biogás, a energia solar e elétrica, objetivando a redução de custos e a sustentabilidade do projeto.**
- **Avaliar o potencial energético de biomassas de origens diferentes das já utilizadas atualmente, para a definição da aplicabilidade do material em estudo como combustível de queima.**
- **Avaliar a possibilidade de instalação da planta fabril em regiões rurais, onde a energia elétrica é mais barata, reduzindo os custos variáveis de produção.**

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAKANGAS, E. **Bionergy in Finland**. IN: International Training Programme - Wood fuel production for small scale and district heating plants. Joensu, Finland. 2005.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** 3 ed. Brasília: Aneel, 2008, 236p.

BALANÇO ENERGÉTICO DA CEMIG. **26º Balanço energético do estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: Companhia Energética de Minas Gerais/Governo de Minas. 190 f. 2011.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2012, Balanço Energético Nacional 2012 – Ano base 2011: Resultados Preliminares. Rio de janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2012, 51p.

BOTTEON, C. **Indicadores de rentabilidade.** Brasília: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão/ Secretaria de Planejamento e Investimentos Estratégicos, mai. 2009, Apostila.

CARVALHO, E., A.; BRINCK, V. **Tratamento de minérios:** Cap. 15: Briquetagem. 4 ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM)/ Ministério da Ciência e Tecnologia. p. 613-636, dez, 2004.

CELIKTAS, M.; KOCAR, G. **A perspective on pellet manufacturing in Turkey with a SWOT Analysis.** Proceedings. 2d World Conference on Pellets. Ed. SVEBIO Jonkoping. 2006.

CRUZ, P., T, A.; NOGUEIRA, M., F., M. **Oportunidades para o desenvolvimento da biomassa energética no Brasil.** Biomassa e Energia: Renabio, v. 1, n. 1, p.37-44, 2004.

EMBRAPA Agroenergia. **Briquetagem e peletização de resíduos agrícolas e florestais.** Brasília, DF: Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA). Folder, 1,500 exemplares, ago. 2012,

FILLIPETTO, D. **Briquetagem de resíduos vegetais:** Viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado. Dissertação (Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos). Faculdade de Engenharia mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 61 f. 2008.

FONSECA, P., K., A. **O marketing verde como uma vantagem competitiva na empresa M.C. briquetes.** Monografia (Bacharel em Administração). Departamento de Ciências Administrativas e Econômicas, Centro Universitário de João Pessoa, João Pessoa. 63 f. 2008,

GENTIL, L., V., B. **Tecnologia e economia do briquete de madeira.** Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Publicação EFL TD. Departamento de Engenharia Florestal. Universidades de Brasília. Brasília. DF, 195p. 2008.

MACHADO J A P. 2002, **Projetos Econômicos:** Uma abordagem Prática de Elaboração. São Paulo,ed. Nobel, 182 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Energias Renováveis.** Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biomassa>. Acesso em: 28 de mai. 2013.

MORAIS, M., R.; SEYE, O.; FREITAS, K., T.; RODRIGUES, M.; SANTOS, E., C., S.; SOUZA, R., C., R. **Obtenção de briquetes de carvão vegetal de cascas de arroz utilizando baixa pressão de compactação.** An. 6, Encontro de Energia no Meio Rural, 2006.

PEREIRA, F., A. **Efeito da granulometria e de aglutinantes nas propriedades de finos de briquetes de carvão vegetal.** Dissertação (Mestre em Ciência Florestal). Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 50 f. 2009.

PES, D., A.; PEREIRA, C., K.; LUCIANO, E., M.; OLIVEIRA, J. **Localização ótima de novas indústrias de briquete no estado de Mato Grosso.** Revista de economia: Anápolis, v.8, n.2, p. 64-81, jul./dez. 2012.

QUIRINO, W. F.; BRITO. J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal.** Brasília: IBAMA, LPF, 1991, 18p. (série técnica 13).

RODRIGUES, L., D.; SILVA, I., T.; ROCHA., B., R., P.; SILVA, I., M., O. **Uso de briquetes compostos para a produção de energia no estado do Pará**. An. 4, Encontro de Energia no Meio Rural, 2002.

ROSA, C., A. **Como elaborar um plano de negócio.** Brasília: SEBRAE, 2009, 120 p.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira.** Campinas, SP: Editora Unicamp, 2005, 448p. Tradução de: Industrial uses of biomass energy: the example of Brazil.

SCARPINELLI, M.; RAGASSI, G., F. **Marketing verde:** Ferramenta de gestão ambiental nas empresas. Revista eletrônica de ciências contábeis. n. 2, Out. 2003.

SEAPA- Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Perfil do agronegócio de base florestal de Minas Gerais.** Governo de Minas: Superintendência de Desenvolvimento Rural Sustentável/Superintendência de Política e Economia Agrícola. 62 f. fev, 2012.

SEF-SECRETARIA DE ESTADO DA FAZENDA. **Governador reduz ICMS para madeira de reflorestamento catarinense.** Disponível em:<http://www.sef.sc.gov.br>. Acesso em: 05 jun. 2013.

SILVA, C., A. **Estudo técnico-econômico da compactação de resíduos madeireiros para fins energéticos.** Dissertação (Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos). Faculdade de Engenharia mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 68 f. 2007.

ZAKRISSON, M. **A comparison of international pellet production costs**. Swedish University of Agricultural Sciences. Examensarbeten nr 39, Uppsala. 2002.

ANEXO B

ATHAYDE e CREN, 2014 - Artigo submetido a revista Fuel

ANALYSIS OF THE BANANA CROP WASTES AS A BIOMASS SOURCE FOR BRIQUETTES PRODUCTION

Carolina Sampaio Athayde[a], Erika Cristina Cren[a]

[a] Chemical Engineering Department, School of Engineering, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil. Av. Antônio Carlos, 6627, Engineering building, Block 2, 5th floor, Pampulha Campus, CEP 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brazil. E-mail: carol_samp@hotmail.com, erika.cren@gmail.com.

Abstract - The generation of energy, its sustainable and efficient use is one of the most investigated issues. In this sense, the use of agricultural wastes as a source of energy becomes a topic very relevant to industry and agriculture. Banana crop is one of the cultures that most generates wastes on the field and therefore may be a promising alternative for energy generation. However, few data concerning the chemical composition and energy potential of these materials are currently available. The present study aimed to evaluate different residues of banana culture (*musa sp.*) through proximate analysis (fixed carbon, ash and volatile matter), besides the elemental analysis (C, H, N). The potential use of these wastes as a source of energy from burning was also evaluated by determining the calorific value of the biomass, and briquettes produced. Moreover, briquetting process was evaluated by the energy density which correlates the energy concentration due biomass compaction. As a result of this work, was possible to conclude that all the banana crop wastes studied exhibited characteristics that enable their use as fuel for burning. The preparation of briquettes blending different banana crop wastes produce a solid fuel with high power capability, enabling the full use of the biomass generated by the banana crop in a sustainable and efficient way.

Keywords: biomass, *musa sp.*, briquettes, calorific value.

1. Introduction

Biomass has emerged globally as one of the energy sources with greatest potential for growth in the coming years. In developing countries, biomass can represent up to about 33 % of total consumed energy, whereas the inhabitants of these countries represent no less than three quarters of the world population [1]. In addition, new technologies involving the use of food, agriculture, industrial and urban wastes, which still retain some potential energy themselves, are being developed constantly. Besides the energy potential, another factor that has attracted increasing interest to the biomass is the possibility to reduce the use of fossil fuels with the advantage to minimize the environmental impact, promoting a sustainable development with efficient use of renewable resources.

The biomass generated by banana crop is an example of a large volume of agricultural waste in Brazil, which may also be studied further, since there have been few data concerning the energetic potential about this waste in the literature. Banana is the second most consumed fruit in the world, with 10,38 kg/inhabitant/year, behind only orange fruit, with 12,83 kg/inhabitant/year. In 2011 were produced worldwide over 106,54 million tons of bananas. Only in Brazil, this volume was about 7,3 million of tons, which was equivalent to 6,9 % of the total global production, giving to the country the fifth place among the largest banana producers in the world, with India being the largest producer (27,8 %), followed by China (10,0 %), Philippines (8,6 %) and Ecuador (7,0 %) [2].

The amount of waste generated by the banana crop is significant. For every ton of harvested banana fruit, about four tons of waste is generated. The pseudostem of banana plant represents most of this total, generating around three tons of waste; leaves are responsible for about 480 kg, banana peel by 440 kg, stalks by 160 kg and rejected fruits generate about 100 kg [3]. Part of these wastes are used as natural fertilizing, however the volume generated exceeds the amount needed, so these exceed wastes generally result in transportation costs and environmental problems, such as soil contamination or insects proliferation.

Industrially, the banana crop wastes are used only as a source of fiber. These fibers are used in the manufacture of tissue and also in the manufacture of paper and craft products. However, there is still little use of these wastes mainly to explore its energy potential. New studies that evaluate the efficient reuse of the residues generated by the banana crops are already underway. As examples, can be cited the ethanol production from banana peel [4] and the use of treated banana fiber as an adsorbent for metal removal from aqueous effluents [5].

Briquetting is a very efficient way to concentrate the energy available in the biomass by compressing it, optimizing the energy potential of these residues. According to the literature, 1,00 m^3 of briquettes contains at least 5 times more energy than 1,00 m^3 of waste [6]. So, this leads to conclude that the briquetting is an alternative waste treatment which enables the use of the biomass as a solid fuel for burning. Furthermore, densification of biomass facilitates transportation, handling and storage, reducing the cost of such operations due to reduced volume. The concentration of energy obtained through briquetting is represented by the energy density of the material that reflects directly on its energy potential.

The briquettes production from agricultural wastes, in Brazil, is still incipient. Residues like sawdust, wood shaving and eucalyptus barks are the most used for briquetting. However, several successful researches have been developed with different agricultural wastes, such as residues from bean, soybean, rice, coffee, sugar cane and corn crops [7], which demonstrate the potential use of these wastes as feedstock for the briquettes production.

For briquette formulation an important component is the binder, which gives strength and hardness to the solid fuel. For materials with high content of lignocellulosic compounds, the briquettes production using temperatures around 100^{o}C has generated products with greater mechanical strength and good inter-particle adhesion, due its lignin content that, in this temperature, becomes a natural binder [8].

For briquette production, the choice of the biomass used is very important, because it reflects not only in the energetic potential, but also on its mechanical characteristics. Some desirable

characteristics for the biomass are: good availability, low humidity and proper chemical composition, such as high carbon, hydrogen and fixed carbon content.

In this way, considering the information's presented above and the scarce literature data for the banana crop wastes, the present work was conducted to determine the chemical and thermal characteristics of the different banana crop wastes, such as: pseudostem, inflorescence, stalk, leaf and rejected fruits, to evaluate its potential as energy source. The chemical and thermal characteristics of the wastes studied were the proximate composition (moisture, fixed carbon, volatile matter and ash), the elemental composition (carbon, hydrogen, and nitrogen) and the calorific value. In addition, the production of briquettes from different banana crop wastes, including a blend of them, was also evaluated.

The proposed studies are relevant to provide information that will lead to a sustainable and efficient reuse of the wastes generated by the banana crop, not only as an energy source but also for other purposes.

2. Material and Methods

2.1. Origin and preparation of the wastes

The residues of banana variety 'prata' (*musa sp.*) studied (pseudostem, inflorescence, stalk, leaf and rejected fruits) were collected in the north of Minas Gerais, Brazil. The fresh residues were placed in plastic bags and refrigerated until use. The different wastes were prepared following 3 different steps, such as milling, crush and drying. The milling was used to shred the wastes and employed a crusher (Model EM-6800, Nogueira, Minas Gerais, Brazil). This procedure facilitates, in the following steps, the elimination of large amount of water present in the banana crop wastes. The crush process used a hydraulic press (Model P15000, Charlotte, Minas Gerais, Brazil). The wastes were submitted to a pressure of 7 tons for 5 minutes. It was satisfactory to reducing the moisture content of the wastes, minimizing the energy required in the next step, the drying. The drying process used a drying oven at the temperature of 105 ^{o}C and speed air of 1,5 m.s^{-1} (Model 394/4, Tecnal, Minas Gerais, Brazil). This procedure eliminated the moisture that couldn't be reduced using the press , adjusting the moisture content of the wastes until adequate levels for briquetting and storage.

The final moisture content was fixed between 5 and 12 (wt %). The dried wastes were storage in plastic bags under vacuum at room temperature of 25°C until the time of chemical and thermal analysis and briquetting.

All studies were performed using the different banana crop wastes separately and a blend of them. The blend was prepared using 20 (wt %) of each banana crop wastes. The chemical and thermal analysis followed the ASTM standards procedure for biomass. Details about the analysis and the briquetting are described below.

2.2. Chemical Composition

The knowledge of chemical composition of the different banana crop wastes is important to enable the use of these residues as raw material for various industrial processes, such as for energy production, linking the sustainability and the banana agribusiness. The chemical composition of each part of the banana plant is variable, so each one may be used properly, considering the individual characteristics and their potentials.

The proximate analysis were made considering the following ASTM standards: for moisture content and volatile matter the ASTM E871-82 and ASTM E872-82, respectively, for ash content the ASTM E1755-01 and for fixed carbon content the ASTM E1757-01, These analyzes were made in the Laboratory of Chemical Analysis of the Chemical Engineering Department at UFMG.

The elemental analysis was made by the Analytic Center of the Institute of Chemistry in the State University of São Paulo (USP). These analyzes provided the content of carbon (C), hydrogen (H) and nitrogen (N) for the wastes.

2.3. Briquettes production

For briquetting, the different banana crop wastes and a blend of wastes were used. As mentioned above, the biomass was prepared by milling, crush and drying, until the moisture content of 5 to 12 (wt %). In order to select and homogenize the particle size of the dry wastes, a system of sieves (Model N1554, Bertel, Minas Gerais, Brazil) with meshes of 3/8 and 4 was used. So, the biomass had its particle sized between 5 to 10 mm. In some cases, additional comminuting was required to reduce the particle size to the range mentioned, and

an industrial blender was used (Model LQ 40, Visa, Minas Gerais, Brazil). In this way, 6 different briquettes were produced using different banana crop wastes (pseudostem, inflorescence, stalks, leafs, rejected fruits) and a blend with 20 (wt %) of each waste. To simulate the briquetting process, a mold of steel (120 mm high x 75 mm diameter) was used in the hydraulic press. This mold had linked to it a heating system, allowing the temperature control during the briquetting at 100 ° C.

For the briquettes production, amounts of 25 to 40 g of dry and milled wastes were added to the heated mold and a pressure of 7 tons during 30 minutes was applied by hydraulic press. After compaction, the briquette was removed from the mold and cooled at room temperature. All the briquettes produced were packed in plastics bags and stored for determination of their calorific value, as well as its apparent and energy densities. As comparison, these determinations were also made to the dry wastes before the briquetting.

The operational parameters used in this work, as reference for briquettes production, like the moisture content, the particle size and the temperature of briquetting, were set in accordance to different studies reported in the literature that combine practical and economic approaches for briquetting production [8]-[10].

2.4. Calorific Value

The high calorific value (heat released by combustion with the original and generate water in a condensed state) was determined using a calorimetric bomb (Model 1341, Plain Jacket calorimeter Parr, Minas Gerais, Brazil) following the methodology described in ASTM D5468-02, suitable for wastes materials. The calorific value was obtained to the dry wastes and the briquettes, being expressed in $kcal.kg^{-1}$ of material. This analysis was made in the Laboratory of Chemical Analysis of the Chemical Engineering Department at UFMG.

2.5. Apparent density and energy density

To determine the apparent density for the dry wastes and the briquettes, were used the following ASTM standards for hygroscopic materials, ASTM D5057-10 and ASTM D2854-09, respectively. The apparent density was expressed by $kg.m^{-3}$ of material. These

determinations were made in the Laboratory of Chemical Analysis of the Chemical Engineering Department at UFMG.

Thus, the energy densities of the wastes before and after the briquetting can be calculated by the product of apparent density and the calorific value, being expressed as $Mcal.m^{-3}$ of material.

3. Results and Discussion

3.1. Proximate analysis

The knowledge of the waste composition is important to evaluate its potential as biomass for burning. In this way, according to Table 1, all the banana crop wastes have characteristics that demonstrate this potential.

For the moisture content, presented in Table 1, it is observed that the inflorescence was the waste with the highest moisture content and the leaves the lowest one. In general, all residues had a high moisture content, above 75 (wt %), as the majority of the vegetable products. This suggests that the banana crop wastes, in nature, are not suitable as biomass for burning, because of the energy expended to evaporate the water during the biomass burning. So, to be used as an efficient solid fuel, the wastes need to be treated for having a moisture reduction.

The water excess present in some agricultural wastes can be easily reduced by compression, using for example, a hydraulic press and employing minimal energy consumption. In this way, this process also minimizes the energy required for an additional drying.

Therefore, to the banana crop wastes, the use of a hydraulic press elimineted about 16 (wt %) of the moisture originally present in the residues. Nevertheless, the conventional drying was used to adjust the optimum moisture content of 5 to 12 (wt %) for briquetting.

Another component that has an important role during the early stages of ignition and combustion of biomass, is the volatile matter. [11].

At Table 1, it can be observed that, for all the banana crop wastes, the banana rejected fruits has the highest value of volatile matter, reaching 81 (wt % db). This value is similar to that

one observed for forest residues, which have 79,9 (wt % db) of volatile matter, being also very similar to biomass of wood [12]. The inflorescence is the residue with less content of volatile matter, reaching the value of 68,9 (wt % db). For comparison, some materials already used for briquettes production, as rice straw, have around 61 (wt % db) of volatile matter [13]. Thus, the banana crop wastes, by presenting more than 65 (wt % db) of volatile matter, show a suitable characteristic for burning and production of briquettes.

The fixed carbon content of the wastes has a direct and positive influence on its calorific value. So, as higher is this value, slower is the burning, that is a desirable characteristic for the solid fuels [7].

According to Table 1, the inflorescence has the highest fixed carbon content, with a value of 22 (wt % db). However, others banana crop wastes showed values to the fixed carbon of 13 (wt % db), value that is comparable to agricultural wastes already used in the briquettes production, such as rice husks, which has 17,3 (wt % db) of fixed carbon content [7].

A relevant observation, that must be done, is related to the physical and chemical similarity between the stalk and the pseudostem of the banana plant, these residues together represent 76 % of the total banana crop wastes. Due the chemical characteristics and the volume generated, these residues have a great potential to be used as a solid fuel.

In general, literature data that report the chemical composition of the different banana crop wastes are still scarce, being the pseudostem the waste more investigated.

As comparison, for the pseudostem the literature report levels of fixed carbon and volatile matter of 17,49 (wt % db) and 74,47 (wt % db), respectively [3]. These values are consistent with that presented in Table 1,

However, the ash content of the wastes had certain variability, when compared with the values reported in the literature. The ash content obtained to the pseudosteam, even though high, is within the range reported for the rice straw of 20,3 (wt % db) [14]. The banana leaf had the most discrepant ash content when compared with the observed and reported value.

This result shows a significant presence of minerals, such as calcium, sodium, magnesium, iron, phosphorus, lead, chloride and their components in the banana leaves. Literature

reports that high levels of calcium (Ca), magnesium (Mg) and sodium (Na) in vegetable plants could be associated with the irrigation using tubular wells [15]. Furthermore, the literature report that the north of Minas Gerais has a calcareous soil [16], which contributes to the elevation of calcium levels on the soil and consequently at the banana crop wastes. It is important to emphasize that the great ash content does not necessarily influence the combustion behavior of the briquettes or wastes [6]. Nevertheless, ashes are inert materials, during the burning, but in high levels can alter the thermal capacity for the material, reducing its calorific value [17].

An important data shown in Table 1, is about the blended wastes. The blend had its chemical composition comparable to that reported for the sugar cane straw, which presents 74,7 (wt % db) of volatile matter, 10,3 (wt % db) of ash and 15,0 (wt % db) of fixed carbon [1]. It demonstrates the great potential of use of the blended wastes, as biomass, allowing the total use of the banana crop wastes as a source of renewable energy.

3.2. Elemental analysis

The elemental composition of agricultural wastes is an important information to predict and evaluate the thermal capacity for the wastes, and so, its applicability as biomass for burning. Therefore, Table 2 presents the elemental analysis for the banana crop wastes.

According to Table 2, the inflorescence and the rejected banana fruits were the wastes with the highest content of carbon (C) and hydrogen (H) on its compositions. The values obtained are very similar to those reported in the literature for some agricultural wastes, already used in the renewable energy matrix of Brazil, such as the sugar cane bagasse, that has the carbon (C) and hydrogen (H) content of 43 (wt % db) and 6 (wt % db), respectively [12], and the cotton husk, with 46 (wt % db) of carbon (C) and 6 (wt % db) of hydrogen (H) [11].

To lignocellulosic materials, the higher contents of carbon (C) and hydrogen (H) of its composition are indicative of a big thermal capacity, due to the high energy released, by these components, during the combustion process. Based on that, the high levels of these elements are desirable when the wastes are used as biomass for burning [7], [17].

All the banana crop wastes investigated shown levels of carbon (C) and hydrogen (H) above 36 (wt % db) and 4 (wt % db), respectively. This result reinforces the applicability of these wastes as solid fuel, since their compositions are similar to those observed for wastes usually used as solid fuel, such as rice husk, cotton husk, sugar cane bagasse, corn, straw, soybean, among others [12]-[13].

Considering the data shown in Table 2, for nitrogen (N) content, it is observed that these values are higher than that one reported to agricultural wastes generally used for burning, such as sawdust, coffee husk and sugar cane straw, which have values between 0,1 (wt % db) and 2,06 (wt % db) for the nitrogen (N) content [7], [13].

For the leaves and pseudostem of banana plant, the literature reports value for the nitrogen (N) content of 1,31 (wt % db) and 0,44 (wt % db), respectively. These values are still lower than that observed in Table 2 [3]. The higher values obtained to the nitrogen (N) content for the banana crop wastes can be a consequence of the fertilization during the banana plant cultivation.

In general, high levels of nitrogen (N) in the biomass composition are not desirable to the wastes used for burning. As higher is the content of nitrogen (N) of the biomass, higher is the formation of environmental undesirable compounds during the combustion, like toxic nitrogen, oxides and nitric acid. In addition, the nitrogen (N) content negatively influences the heat capacity to the biomass, since it competes with the carbon during the combustion [18].

However, the levels of nitrogen (N) observed to the banana crop wastes are considered acceptable and may not interfering in the potential of these wastes as solid fuel [19].

3.3. Evaluation of briquetting

The briquetting process is a procedure used to concentrate the available energy present in the biomass. The process success is closely dependent of the operational parameters used in the briquette elaboration, as the particle size and the moisture of the material, time, temperature and pressure of briquetting.

In this way, each parameter has your own function during the briquette production, as well as acts even in synergy with one another. So, simultaneously, the particle size, moisture

content, time, temperature and pressure of briquetting, affects the particles cohesion, mechanical resistance, density and heat capacity to the briquettes.

In this work, the used parameters have their values fixed based on the literature. So, for briquette production, the moisture content of the different banana crop wastes, such as pseudostem, stalk, inflorescence, leaf, rejected banana fruits and blend, were 9,81 (wt %), 11,52 (wt %), 8,52 (wt %), 10,33 (wt %), 11,80 (wt %) and 9,68 (wt %), respectively.

The briquettes production simulates the industrial briquetting, in this way, during the industrial briquetting the process temperature can reaches value around 100 °C, the increase in the temperature has positive effects. According to the literature, it facilitates the lignin fluidization, which works as a particle binder, improving the particle cohesion [8]. For lignocelullosic materials with lignin content like observed to sawdust with 21,88 (wt %) and wood shaving with 20,62 (wt %) of lignin, no extra addition of binder is required for the briquette production [7].

Thus, in this work, no binder was used for the briquettes formulation and the pressing time used was sufficient to the briquette center reaches the temperature of 100 ° C. In addition, the pressure up to seven tons was employed.

In general, studies using the banana plant biomass for briquette productions are still scarce . However, the briquettes produced, in this work, had qualitatively good mechanical resistance, except the briquette produced with the rejected banana fruits, probably due its chemical composition.

The lignin content of the rejected banana fruits is about 7,2 (wt %) [4]. This lignin content is low compared to the lignin content of other parts of the banana plant, like the leafs, that can reaches a lignin content of 24,3 (wt %) [20]. As mentioned before, this lignin level is sufficient to acts as a natural binder, connecting the particles of the material during the briquetting process, due the heating and the pressing.

However, an important data obtained in this work concerns the briquette produced by the blend of the banana crop wastes. The wastes blend shows to be a feasible option to the

briquette production. The briquette obtained showed a good particle compaction, even using the leaves of the banana plant.

In this way, the lignin content of the biomass directly influences the briquette formulation, and so, the amount of additional binder agent needed to produce briquettes with good mechanical characteristics.

In this work was possible to produce briquettes from almost all the banana crop wastes even without additional binder agent, resulting in an economic and useful process. Thus, the main advantage of briquetting is the waste densification, that promotes the biomass energy accumulation, besides optimizes the biomass transport and storage.

So, to evaluate the briquetting process and the briquettes produced, the density values to the banana crop wastes were determined before and after briquetting. These data are shown in Table 3.

As expected, the briquetting increases the wastes density. The stalk, which takes up a lot of volume because of its fiber content, has its volume reduced in eight times, after briquetting. Furthermore, the biomass densification is closely related with the briquettes quality, since that it influence the energy capacity of the briquette, and so, the quantification of biomass energy density reflects its potential for briquette production.

3.4. Calorific value and Energy density

The calorific value reflects the amount of energy produced by biomass burning. This data is very important to evaluate the applicability of waste as an energy source. The biomass calorific value is dependent of different factors, such as the biomass composition, density and the briquetting process.

Table 4 shows the calorific value and energy density obtained for the banana crop wastes, before and after briquetting.

The calorific value of the wastes, presented in Table 4, had a little increasing after the briquetting. However, considering the standard deviations of analyzes, the calorific value of the wastes, before and after briquetting, can be considered invariable. This observation is expected, since the calorific value is expressed by $kcal.kg^{-1}$ of biomass.

In the same way, comparing the calorific value to the different banana crop wastes, including the blend, is possible to note that the values are distributed between 3216 and 3918 $kcal.kg^{-1}$, considering the analyzes standard deviations. In other words, the different banana crop wastes had similar burning energy potential.

The calorific value obtained for the banana crop wastes are comparable to that observed to some wastes and solid fuels, already used as renewable energy source in Brazil, such as wood shavings, with 4291 $kcal.kg^{-1}$ [7], sugar cane bagasse, with 4050 $kcal.kg^{-1}$ [21] and other biomass, which have calorific value between 3680 and 4660 $kcal.kg^{-1}$ [22]. In this way can be noted that the banana crop wastes are a promising source of biomass, with high potential to be used as solid fuel for burning.

Studies made with pseudostem and leaves of the banana plant were reported. The briquettes produced with these wastes had calorific values of 3565 $kcal.kg^{-1}$ and 4234 $kcal.kg^{-1}$, respectively [23]. Comparing these results with that presented in Table 4, can be noted that the calorific value reported by the author to the pseudostem briquette was similar to that obtained in this work, however for the leaves briquette the literature reports a calorific value higher than that presented in Table 4, The observed difference for the results probably is related with the chemical composition of the leaves, in particular, due its high ash content, which negatively influence the briquette energy capacity.

In addition, the behavior correlated with the calorific value and the chemical composition of the waste is also observed to the inflorescence data. This waste had the highest calorific value presented in Table 4, this result corroborates with its chemical composition presented in Table 1 and Table 2, which shows the high fixed carbon content (22,05 wt % db), besides high levels of carbon (C) and hydrogen (H), that allows to a satisfactory calorific value.

Other important data presented in Table 4, is the energy density ($Mcal.m^{-3}$) that reflects the briquetting efficiency, in order to concentrate the energy originally retained in the biomass.

As expected, the briquetting process concentrated the biomass energy, so an increasing up to 8,8 times was observed to the energy contained in $1m^3$ of waste, after the biomass compaction. Thus, as higher is the waste densification; higher is the energy capacity of the

briquette. The wastes with low density (kg.m^{-3}), that occupies a large volume, once compacted, it reflects a better waste densification, and so, a higher energy accumulation. In general, the energy density of the briquettes reaches values above 2385,23 Mcal.m^{-3}, against values up to 961,66 Mcal.m^{-3} to the wastes.

The minimum energy densification was observed to the rejected banana fruits (increase of 3,6 times in the energy capacity per m^3 of biomass). However, the briquettes produced with the wastes blend showed a good energy densification, being, once more, an efficient alternative for briquette production, adding value to the banana crop wastes, improving the diversification of the renewable energy resource.

4. Conclusion

In general, all the banana crop wastes had calorific values higher than 3300 kcal.kg$^{-1,}$ This value is comparable to those observed for different solid fuels and biomass, already used as renewable energy resources.

However, the high ash content in banana leaves influenced negatively the calorific value. This high level was caused by different factors, associated with the location, season and crop treatment. On the other hand, the inflorescence had the highest calorific value, mainly due its high value of fixed carbon, carbon (C) content and hydrogen (H) content.

Regarding the briquettes production, can be observed that almost all the banana crop wastes have the potential to briquetting. As expected, the waste compaction concentrates the energy contained in 1m3 of biomass. An increasing up to 8,8 times could be observed to the energy density after briquetting.

In addition, the briquette produced by the wastes blend showed to be a good alternative to the efficiently use of the banana crop wastes, due its good calorific value and energy density.

Finally, based on the results obtained, it can be concluded that the banana crop wastes have the potential to be used as a renewable energy source. The briquetting process was feasible and produced briquettes with high energy capacity, also adding value to the agricultural wastes, making the banana production chain more sustainable.

Acknowledgment

The authors would like to thanks the Chemical Engineering Department of UFMG and CAPES, for the financial support.

References

[1] Rosillo-Calle F, Bajay SV, Rothman H. Industrial Uses of Biomass Energy- The example of Brazil. London: Taylor & Francis; 2000.

[2] FAO- Food and Agriculture Organization. 2013, Available in: <http://www.fao.org >. Access in: 15 de jul. de 2013.

[3] Fernandes ERK, Marangoni C, Souza O, Sellin N. Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. Energy Conversion and Management, 2013;75:603–8.

[4] Oberoi HS, Vadlani PV, Saida L, Bansal S, Hughes JD. Ethanol production from banana peels using statistically optimized simultaneous saccharification and fermentation process. Waste Management, 2011;31:1576–84.

[5] Barreto ACH, Costa MM, Sombra ASB, Rosa DS, Nascimento RF, Mazzetto SE, et. al. Chemically Modified Banana Fiber: Structure, Dielectrical Properties and Biodegradability. Polym. Envirom. 2010;18:523-31.

[6] Quirino WF. Características de briquetes de carvão vegetal a seu comportamento na combustão [Tesis]. Piracicaba (SP): College of Agriculture “Luiz de Queiroz”; 1991.

[7] Ramos e Paula LE, Trugilho PF, Napoli A, Bianchi ML. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. Cerne Lavras. 2011; 17:237-46.

[8] Stelte W, Holm JK, Sanadi AR, Barsberg S, Ahrenfeldt J, Henriksen UB. A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. Biomass and Bioenergy. 2011; 35:910-8.

[9] Li YD, Liu H. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. Biomass & Bioenergy. 2000; 19:177-86.

[10] Chou C, Lin S, Peng C, Lu W. The optimum conditions for preparing solid fuel briquette of rice straw by a piston-mold process using the Taguchi method. Fuel Processing Technology. 2009; 90:1041–6.

[11] Vamvuka D, Stelios S. Combustion behaviour of biomass fuels and their blends with lignite. Thermochimica Acta. 2011; 526:192–9.

[12] Vassilev SV, Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG. An overview of the chemical composition of biomass. Fuel. 2010; 89:913-33.

[13] Cuipinga L, Chuangzhia W, Yanyongjieb, Haitaoa H. Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. Biomass and Bioenergy. 2004; 27:119-30.

[14] Binod P, Sindhu R, Singhania RR, Vikram S, Devi L, Nagalakshmi S, et. al.. Bioethanol production from rice straw: An overview. Bioresource Technology. 2010; 101:4767-74.

[15] Medeiros J.F., Lisboa RA, Oliveira M, Silva Jr MJ, Alves LP. Characterization of the groundwater used for irrigation in the melon producing area of the Apodi Plateau. Agriambi. 2003;7:469.

[16] Nunes WAGA, Ker JC, Neves JCL, Ruiz HA, Beirigo RM, Boncompani ALP. Características químicas de solos da região de Janaúba, MG, irrigados com água de poços tubulares e do rio Gorutuba. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 2008; 32:227-36.

[17] Parikh J, Channiwala SA, Ghosal GKA. Correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. Fuel. 2005; 84:487-94.

[18] Manalula F, Meincken M. An evaluation of South African fuelwood with regards to calorific value and environmental impact. Biomass and Bioenergy. 2009; 33:415-20.

[19] Komilis D, Evangelou A, Giannakis G, Lymperis C. Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes. Waste Management. 2012; 32:372-81.

[20] Romero-Anaya AJ, Molina A, Garcia P, Ruiz-Colorado AA, Linares-Olano A, Lecea CS. Phosphoric acid activation of recalcitrant biomass originated in ethanol production from banana plants. Biomass and Bioenergy. 2011; 35:119-204.

[21] Gupta N, Tripathi S, Balomajumder C. Characterization of pressmud: A sugar industry waste. Fuel. 2011; 90:389-94.

[22] Erol M, Haykiri-Acma H, Kucukbayrak S. Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. Renewable Energy. 2010; 35:170–3.

[23] Maia BGO. Valorização de resíduos da bananicultura e da rizicultura na produção de briquetes. [dissertation]. Joinville (SC): University of Joinville region; 2013.

Table 1 – Proximate analysis of banana culture wastes

Wastes	Moisture [a] (wt %)	Volatile matter [a] (wt % db)	Ash [a] (wt % db)	Fixed [a] Carbon (wt % db)
Pseudosteam	91,14 ± 0,61	76,62 ± 0,86	9,19 ± 0,23	14,19 ± 0,72
Stalk	90,35 ± 0,05	69,12 ± 0,21	14,40 ± 0,04	16,33 ± 0,18
Inflorescence	91,65 ± 0,13	68,09 ± 0,53	9,86 ± 0,11	22,05 ± 0,44
Rejected Fruits	76,86 ± 0,18	81,05 ± 0,76	3,04 ± 0,03	15,91 ± 0,62
Leaf	25,71 ± 2,36	70,86 ± 0,66	19,14 ± 0,54	10,00 ± 0,69
Blend	75,15 ± 2,29	75,45 ± 0,66	11,25 ± 0,09	13,30 ± 0,55

[a] $\text{standard deviation} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{n=1}^{n}(xi - \bar{x})^2}$

Table 2 – Elemental analysis of banana culture wastes

Wates	Carbon [a] (wt % db)	Hidrogen [a] (wt % db)	Nitrogen [a] (wt % db)
Pseudosteam	39,32 ± 0,22	5,64 ± 0,08	1,61 ± 0,11
Stalk	36,35 ± 0,27	4,66 ± 0,08	3,28 ± 0,08
Inflorescence	46,20 ± 0,17	5,73 ± 0,13	4,07 ± 0,55
Rejected Fruits	41,09 ± 0,11	6,48 ± 0,08	1,03 ± 0,04
Leaf	39,85 ± 0,04	5,57 ± 0,01	1,86 ± 0,27
Blend	38,50 ± 1,24	5,24 ± 0,16	2,25 ± 0,02

[a] $\text{standard deviation} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{n=1}^{n}(xi - \bar{x})^2}$

Table 3 – Wastes and briquettes densities

Wastes	Wastes density [a] ($kg.m^{-3}$)	Briquettes density [a] ($kg.m^{-3}$)
Pseudosteam	106,20 ± 10,30	813,60 ± 4,90
Stalk	81,60 ± 30,60	686,20 ± 4,20
Inflorescence	150,90 ± 6,30	781,00 ± 9,00
Rejected Fruits	276,10 ± 22,70	995,50 ± 10,90
Leaf	116,70 ± 4,20	790,90 ± 27,60
Blend	156,70 ± 11,50	836,10 ± 46,20

[a] $\text{standard deviation} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{n=1}^{n}(xi - \bar{x})^2}$

Table 4 – Calorific Value and Energy Density of wastes and briquettes

Wastes	Calorific value of waste [a] ($kcal.kg^{-1}$)	Calorifc Value of briquete [a] ($kcal.kg^{-1}$)	Waste Energy Density ($Mcal.m^{-3}$)	Briquette Energy Density ($Mcal.m^{-3}$)
Pseudosteam	3368,00 ± 88,00	3392,00 ± 88,000	357,68	2759,73
Stalk	3316,00 ± 110,00	3476,00 ± 109,00	270,59	2385,23
Inflorescence	3672,00 ± 246,00	4205,00 ± 50,00	554,10	3284,11
Rejected Fruits	3483,00 ± 153,00	3532,00 ± 48,00	961,66	3516,11
Leaf	3470,00 ± 62,00	3758,00 ± 82,00	404,95	2972,20
Blend	3650,00 ± 156,00	3688,00 ± 110,00	571,96	3083,54

[a] $\text{standard deviation} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{n=1}^{n}(xi - \bar{x})^2}$

ANEXO C

Dados de secagem (umidade em base úmida e base seca)

Folha 70°C		
T (min)	media Xb.u.	media Xb.s.
0	25,94	0,35
15	18,66	0,23
30	11,86	0,13
45	9,84	0,11
60	8,18	0,09
75	7,73	0,08
90	7,47	0,08
105	7,21	0,08
120	6,37	0,07
135	6,44	0,07
150	6,27	0,07
165	5,9	0,06
180	5,81	0,06
195	6,16	0,07
210	5,46	0,06
225	5,22	0,06
240	5,17	0,05
255	5,1	0,05
270	4,73	0,05

Folha 105°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	25,94	0,35
15	13,08	0,15
30	7,86	0,09
45	6,86	0,07
60	6,45	0,07
75	6,14	0,07
90	5,7	0,06
105	5,12	0,05
120	4,73	0,05
135	4,48	0,05
150	4,4	0,05
165	4,06	0,04
180	3,95	0,04
195	3,95	0,04
210	3,76	0,04
225	3,76	0,04
240	3,69	0,04
255	3,79	0,04
270	3,76	0,04

Folha 120°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	25,94	0,35
15	10,24	0,11
30	6,24	0,07
45	6,28	0,07
60	5,92	0,06
75	5,42	0,06
90	5,11	0,05
105	5,12	0,05
120	4,8	0,05
135	4,42	0,05
150	4,41	0,05

Banana 70°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	64,18	1,79
15	62,81	1,69
30	60,58	1,54
45	58,44	1,41
60	55,85	1,27
75	53,59	1,15
90	50,72	1,03
105	47,66	0,91
120	44,29	0,8
135	40,89	0,69
150	36,3	0,57
165	32,29	0,48
180	29,46	0,42
195	25,11	0,34
210	21,79	0,28
225	18,65	0,23
240	15,76	0,19
255	13,45	0,16

Banana 105°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	64,18	1,79
15	59,18	1,45
30	55,85	1,27
45	52,19	1,09
60	48,69	0,95
75	44,12	0,79
90	38,58	0,63
105	34,14	0,52
120	29,54	0,42
135	24,53	0,33
150	20,02	0,25
165	15,07	0,18
180	12,71	0,15
195	11,58	0,13
210	10,29	0,12
225	10,24	0,11
240	7,95	0,09
255	7,72	0,08

Banana 120°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	64,18	1,79
15	61,25	1,58
30	54	1,17
45	44,58	0,8
60	32,92	0,49
75	16,7	0,2
90	6,02	0,06
105	6,02	0,06
120	6,02	0,06
135	6,02	0,06
150	6,02	0,06
165	6,02	0,06

Caule 70°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	74,76	2,96
15	72,25	2,6
30	70,39	2,38
45	67,11	2,04
60	64,69	1,83
75	61,06	1,57
90	56,52	1,3
105	50,99	1,04
120	46,73	0,88
135	40,44	0,68
150	36,39	0,58
165	28,16	0,4
180	23,64	0,31
195	17,82	0,22
210	14,11	0,17
225	11,37	0,13
240	9,1	0,1
255	8,42	0,09
270	7,2	0,08
285	6,54	0,07
300	6,54	0,07

Caule 105°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	74,76	2,96
15	70,29	2,37
30	63,29	1,72
45	56,7	1,31
60	45,53	0,84
75	34,59	0,53
90	18,76	0,24
105	6,55	0,07
120	1,13	0,01
135	1,13	0,01
150	1,13	0,01
165	1,13	0,01

Caule 120°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	74,76	2,96
15	71,24	2,48
30	64,24	1,8
45	57,35	1,35
60	50,58	1,02
75	40,06	0,67
90	28,03	0,39
105	19,25	0,24
120	12,04	0,14
135	7,33	0,08
150	4,19	0,04
165	3,65	0,04
180	3,12	0,03
195	3,21	0,03

Engaço 70°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	72,85	2,7
15	68,57	2,22
30	64,18	1,84
45	60,34	1,55
60	54,61	1,24
75	48,44	0,98
90	37,41	0,63
105	27,23	0,39
120	18,88	0,24
135	10,88	0,12
150	6,53	0,07
165	1,33	0,01
180	0,98	0,01
195	1,13	0,01
210	1,18	0,01
225	1,18	0,01

Engaço 105°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	76,92	3,33
15	67,49	2,08
30	59	1,44
45	39,42	0,73
60	22,06	0,34
75	3,49	0,05
90	1,14	0,01
105	1,14	0,01
120	1,14	0,01
135	1,14	0,01
150	1,14	0,01
165	1,14	0,01

Engaço 120°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	72,92	2,69
15	63,7	1,76
30	56,35	1,29
45	46,78	0,88
60	36,6	0,58
75	26,67	0,36
90	20,6	0,26
105	18,39	0,23
120	17,81	0,22
135	17,4	0,21
150	17,65	0,22
165	18,01	0,22

Umbigo 70°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	79,74	3,94
15	77,42	3,43
30	75,53	3,09
45	73,68	2,8
60	71,46	2,51
75	69,34	2,26
90	66,65	2
105	63,62	1,75
120	59,76	1,49
135	56,81	1,32
150	51,9	1,08
165	45,98	0,85
180	42,31	0,74
195	35,43	0,55
210	29,53	0,42
225	24,05	0,32
240	18,94	0,23
255	15,47	0,18
270	12,31	0,14
285	9,39	0,1
300	9,62	0,11
315	9,49	0,11
330	9,58	0,11

Umbigo 105°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	79,74	3,94
15	76,27	3,21
30	73,84	2,82
45	67,73	2,1
60	63,51	1,74
75	53,49	1,15
90	45,15	0,82
105	31,66	0,46
120	21,24	0,27
135	6,53	0,07
150	2,21	0,02
165	1,29	0,01
180	1,22	0,01
195	0,88	0,01
210	0,83	0,01

Umbigo 120°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	79,74	3,94
15	76	3,17
30	72,73	2,67
45	64,06	1,78
60	54,49	1,2
75	46,1	0,86
90	34,47	0,53
105	15,97	0,19
120	3,42	0,04
135	0,62	0,01
150	0,34	0
165	0,34	0
180	0,34	0
195	0,34	0

Blend 70°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	63,27	1,72
15	59,54	1,47
30	55,15	1,23
45	51,46	1,06
60	46,56	0,88
75	42,47	0,74
90	37,53	0,61
105	31,67	0,47
120	27,31	0,38
135	23,36	0,31
150	20,48	0,26
165	16,24	0,2
180	14,57	0,17
195	13,47	0,16
210	12,89	0,15
225	13,12	0,15

Blend 105°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	63,27	1,72
15	58,55	1,41
30	49,56	0,98
45	41,94	0,72
60	30,08	0,43
75	20,96	0,27
90	10,03	0,11
105	4,8	0,05
120	2,1	0,02
135	2,01	0,02
150	1,97	0,02
165	1,8	0,02
180	1,82	0,02
195	1,93	0,02
210	1,76	0,02

Blend 120°C		
T (min)	média Xb.u.	Média Xb.s.
0	63,27	1,72
15	52	1,08
30	43,15	0,76
45	29,45	0,42
60	20,29	0,26
75	9,95	0,11
90	4,86	0,05
105	2,75	0,03
120	1,63	0,02
135	1,2	0,01
150	1,19	0,01