



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS**

**MARCELO RODRIGUES PONTE**

**BLENDAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: Caracterização das**  
**Propriedades e Investigação da Viabilidade Técnica**

**ACARAPE – CEARÁ**  
**2017**

**MARCELO RODRIGUES PONTE**

**BLENDAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: Caracterização das Propriedades e  
Investigação da Viabilidade Técnica**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias.

**Orientadora:** Professora Dra. Ada Amelia Sanders Lopes

**Co-Orientadora:** Professora Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema Integrado de Bibliotecas da Unilab(SIBIUNI)  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Ponte, Marcelo Rodrigues.

P859b

Blendas de bagaço de cana-de-açúcar: caracterização das propriedades e investigação da viabilidade técnica / Marcelo Rodrigues Ponte. - Acarape, 2017.

69f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2017.

Orientadora: Professora Dra. Ada Amelia Sanders Lopes.

Coorientadora: Professora Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios.

1. Sustentabilidade. 2. Biomassa. 3. Resíduos agrícolas.  
4. Briquetes. 5. Energia. I. Título

---

**MARCELO RODRIGUES PONTE**

**BLENDAS DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: Caracterização das Propriedades e  
Investigação da Viabilidade Técnica**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energias do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias.

Aprovado em 25/05/2017

**BANCA EXAMINADORA**

---

Professora Dra. Ada Amelia Sanders Lopes

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

---

Professora Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Professor Dr. Aluísio Marques da Fonseca

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

A Deus.

À minha mãe, Maria das Dores Rodrigues, e  
minha eterna avó, Elisa Rodrigues (*in  
memoriam*).

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por manter a energia do universo também a meu favor.

Aos meus tios, tias, primos, primas, padrinho e amigos que atuam como família, por saberem entender que eu precisei me afastar para atingir meus objetivos e, mesmo assim, mantiveram-se dispostos a ajudar-me sempre.

À minha namorada, Rafaela Coutinho, pelo suporte moral e emocional; pela compreensão nas minhas faltas, pelo carinho dedicado e por acreditar e apostar em mim.

À minha turma da Unilab, 2011.1, que viveu muitos momentos de construção, enfrentando perdas e lutando por melhorias. Agradeço, em especial, àqueles que por muito tempo foram minha segunda família e que utilizávamos de toda a força de vontade de estudar para aprendermos juntos, sorrindo: Alysson Christian, Verônica Dantas, Lidiane Sabino, Jairo Lima, Mardônio Rodrigues, Milton Honorio, Ivan Bandeira, Guilherme Meneses, Aldemario Morais, Pedro Henrique, Matheus Melo e, em especial, à Mabrysa Torres. Todo esse tempo, que não foi pouco, foi possível conhecer que cada um dos citados tem um coração enorme, mas são tímidos em demonstrar isso.

Especialmente, à Profa. Dra. Maria Aleksandra de Sousa Rios e a Profa. Dra. Ada Amelia Sanders Lopes, pelas honrosas orientações, por sempre estarem dispostas a moverem montanhas para que os objetivos da pesquisa fossem alcançados.

À Pós-doutora Yguatyara Luna, que, além de apoio técnico, repetiu para mim muitas vezes a importância da gratidão; ensinamento que faço questão de absorver.

Aos que cederam os recursos que viabilizaram as análises no Laboratório de Referência em Biocombustíveis (Larbio), da Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (Nutec), em parceria com o Grupo de Inovações Tecnológicas e Especialidades Químicas (Gritequi): o técnico Jackson Malveira, os técnicos Ronaldy A. da Silva, Erick Felipe da Silva e Rosali Barbosa Marquesrick.

Aos graduandos em Engenharia Mecânica e voluntários: Kevyn Matheus Vieira Nogueira e João Vitor da Silveira Nunes, por toda a dedicação e carinho por esta pesquisa.

Aos agricultores e empreendedores do Maciço de Baturité que forneceram os resíduos agrícolas.

Aos que propiciaram os resultados provenientes das análises termogravimétricas e das análises elementares, que por sua vez foram realizadas no Laboratório de Produtos e Tecnologia em Processos (LPT/UFC), Antônio Eufrazio da Costa Júnior e o Professor Diego Lomonaco.

Aos responsáveis pelo laboratório de ensaios mecânicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil/Astef, nas pessoas dos estagiários Sergio Luiz e Sabrina Cavalcante, que auxiliaram na parte operacional do ensaio de compressão diametral.

Ao Prof. Dr. Mário Biague, pelo incentivo na vida acadêmica e por sempre estar disposto a ajudar. Ao Elderson Souza, pelo apoio na atenção à ortografia e à Letícia Mourão na tradução do resumo.

Aos professores do curso de Engenharia de Energias e a toda a comunidade da Unilab, representada pelo Centro Acadêmico de Engenharia de Energias (Caene), que tive o prazer de presidir por um ano; pela Coordenação do Curso de Engenharia de Energias, na pessoa do Prof. Dr. Cícero Saraiva e do Prof. Dr. Alisson Guimarães; pela direção do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável (IEDS), na pessoa do Prof. Dr. George Mamede e dos técnicos administrativos vinculados a estes órgãos: Samara Ferreira de Souza, Fabiana Silva, Lucas Lucena, Vinícios Lima da Silva e Gilmar Rosado; também aos motoristas e à equipe da Divisão de Transporte da Unilab (Divtrans) e demais setores; todos tem uma parcela de contribuição para minha formação.

Finalmente, agradeço a nobre sociedade brasileira pelo financiamento da educação pública e ao governo contemporâneo por canalizar os recursos para investimentos na educação, através do fomento pela CNPq, a um projeto de pesquisa desenvolvido por três anos, sem o qual seria difícil obter tantos resultados e aprendizados.

“Há uma força motriz, mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade.”

(Albert Einstein)

## RESUMO

O bagaço de cana-de-açúcar não pode mais ser encarado como resíduo, mas sim como um insumo. Levando-se em consideração o potencial do bagaço, este estudo teve como objetivo agregar valor a ele, através da mistura com outros subprodutos agrícolas: a poda da mangueira e do cajueiro. Para isto, todo o material passou por etapas de caracterização *in natura*, verificando-se: poder calorífico superior, densidade, umidade, análise imediata, análise elementar, análise termogravimétrica e formação de blendas com frações mássicas variadas. Por uma análise quantitativa e qualitativa, a partir das blendas formadas, verificou-se quais apresentaram melhores condições para formação de briquetes, ou seja, um produto que sofre um processo de transformação no qual se compacta o material. As frações das blendas de Cana:Mangueira (50%:50%), Cana:Cajueiro (50%:50%) e Cana:Cajueiro:Mangueira (50%:25%:25%) foram utilizadas na produção dos briquetes. Por fim, dos materiais densificados, verificou-se as suas características energéticas e de resistência mecânica, comparando-as com o bagaço de cana *in natura*. A densidade energética do briquete de Cana:Mangueira aumentou de 1,79 para 13,55 kJ/cm<sup>3</sup>, em relação ao material não compactado, apresentando uma resistência mecânica de 0,563 MPa; a do briquete de Cana:Cajueiro variou de 1,97 para 12,75 kJ/cm<sup>3</sup>, com uma resistência mecânica de 0,479 MPa; a do briquete de Cana:Cajueiro:Mangueira variou de 2,46 para 12,18 kJ/cm<sup>3</sup>, com uma resistência de 0,419 MPa; o briquete de bagaço de cana sem mistura teve sua densidade energética ampliada de 1,25 para 13,22 kJ/cm<sup>3</sup>, com uma resistência mecânica de 1,022 MPa. De modo geral, a indústria sucroalcooleira, não obstante a sua extensa produção de bagaço de cana, também possui como opção promover a mistura deste bagaço com podas de cajueiro e mangueira para formação de briquetes e obtenção de energia em forma de calor.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade. Biomassa. Resíduos agrícolas. Briquetes. Energia.

## ABSTRACT

Sugarcane bagasse can no longer be regarded as waste, but as an input. Aware of the bagasse potential, this study aimed to add value, through mixing with other agricultural byproducts, to the pruning of the hose and the cashew tree. For this, all the material has gone through stages of in nature characterization, verifying: higher calorific power, density, moisture, instant analysis, elemental analysis, thermogravimetric analysis and formation of blends with different mass fractions. For a quantitative and qualitative analysis, from the formed blends, it was verified which presented better conditions for the formation of briquettes, that is, a product that undergoes a transformation process in which the material is compacted. The fractions of the blends of Cane:Hose (50%: 50%), Cane:Cashew (50%: 50%) and Cane:Cashew:Hose (50%: 25%: 25%) were used in the production of briquettes. Finally, of the densified materials, it was verified its energetic characteristics and mechanical resistance, comparing them with bagasse in nature. The energy density of the briquettes of Cane:Hose increased from 1.79 to 13.55 kJ/cm<sup>3</sup>, in relation to the uncompacted material, presenting a mechanical resistance of 0.563 MPa. The Cashew briquettes varied from 1.97 to 12.75 kJ/cm<sup>3</sup>, with a mechanical resistance of 0.479 MPa. The Cane:Cashew:Hose briquettes ranged from 2.46 to 12.18 kJ/cm<sup>3</sup>, with a resistance of 0.419 MPa. The unmixed sugarcane bagasse briquette had its energy density increased from 1.25 to 13.22 kJ/cm<sup>3</sup>, with a mechanical strength of 1.022 MPa. In general, the sugar-alcohol industry, notwithstanding its extensive production of sugarcane bagasse, also has the option to promote the mixing of this bagasse with cashew and hose prunings for the formation of briquettes and obtaining energy in the form of heat.

**Key words:** Sustainability. Biomass. Agricultural waste. Briquettes. Energy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Maciço de Baturité .....	24
Figura 2 – Bagaço de cana-de-açúcar .....	25
Figura 3 – Poda de cajueiro .....	27
Figura 4 – Poda de mangueira .....	28
Figura 5 – Metodologia da produção e estudo dos briquetes .....	34
Figura 6 – Gráfico da relação entre W e PCS.....	40
Figura 7 – TG e DTG da poda de cajueiro .....	44
Figura 8 – TG e DTG da poda de mangueira .....	45
Figura 9 – TG e DTG do bagaço de cana-de-açúcar .....	46
Figura 10 – Gráfico do PCS dos resíduos individuais e das blendas duplas .....	48
Figura 11 – Gráfico da composição imediata dos resíduos individuais e das blendas duplas ..	49
Figura 12 – Gráfico da comparação da análise imediata para as blendas duplas .....	50
Figura 13 – Gráfico do PCS dos resíduos individuais e das blendas triplas .....	51
Figura 14 – Gráfico da composição imediata dos resíduos individuais e das blendas triplas ..	52
Figura 15 – Gráfico da comparação da análise imediata para as blendas triplas .....	53
Figura 16 – Compactação: (a) Compressão do material. (b) Briquete .....	54
Figura 17 – Compressão diametral: (a) Ensaio mecânico. (b) Briquete rompido .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Normas e equipamentos por análise .....	37
Tabela 2 – W e PCS dos resíduos <i>in natura</i> .....	39
Tabela 3 – DG e $DE_{in\ natura}$ dos resíduos.....	41
Tabela 4 – Análise imediata dos resíduos <i>in natura</i> .....	42
Tabela 5 – Amostras da análise elementar do material <i>in natura</i> .....	43
Tabela 6 – Resultado médio da análise elementar do material <i>in natura</i> .....	43
Tabela 7 – PCS das blendas duplas .....	47
Tabela 8 – Análise imediata das blendas duplas .....	49
Tabela 9 – PCS das blendas triplas.....	50
Tabela 10 – Análise imediata das blendas triplas.....	52
Tabela 11 – Análise qualitativa das frações das blendas.....	53
Tabela 12 – Dimensões dos briquetes .....	55
Tabela 13 – Variação da Densidade de Energia (DE).....	56
Tabela 14 – Resistência à compressão diametral dos briquetes .....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Cinzas
ABCM	Associação Brasileira de Carvão Mineral
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
b.s.	Base seca
b.u.	Base úmida
CD	Compressão Diametral
CHN	Análise elementar
DA	Densidade Aparente
DE	Densidade de energia
DE <sub>briquete</sub>	Densidade de Energia do briquete
DE <sub>in natura</sub>	Densidade de Energia <i>in natura</i>
DG	Densidade a Granel
DTG	Termogravimetria derivada
F	Carbono Fixo
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
LPT	Laboratório de Produtos e Tecnologia em Processo
MV	Materiais Voláteis
NBR	Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
NUTEC	Núcleo de Tecnologia do Estado do Ceará
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
p.p.	Pontos percentuais
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente
TG	Termogravimetria
UFC	Universidade Federal do Ceará
UNICA	União da Indústria de Cana-de-Açúcar de São Paulo
W	Umidade em base seca
WEC	World Energy Council

## LISTA DE SÍMBOLOS

-	Menos
%	Porcentagem
+	Mais
<	Menor
>	Maior
$\Delta m$	Variação de massa
$\frac{1}{4}$	Um quarto
C	Carbono
cm	Centímetro
$\text{cm}^3$	Centímetro cúbico
CV	Cavalo-vapor
d	Diâmetro
$F_{Mrup}$	Força máxima de ruptura
$f_s$	Fator de segurança
g	Gramas
GW	Gigawatt
H	Hidrogênio
ha	Hectare
$H_{emp}$	Altura do empilhamento
kg	Quilograma
kgf	Quilograma-força
kJ	Quilojoule
$\text{km}^2$	Quilômetro quadrado
m	Metro
M	Massa de cada amostra
$\text{m}^3$	Metro cúbico
min	Minuto
MJ	Megajoule
mm	Milímetro
MPa	Mega pascal
$M_{seca}$	Massa seca

Mton	Megatoneladas
M <sub>úmida</sub>	Massa úmida
N	Nitrogênio
N <sub>2</sub>	Nitrogênio (molécula)
N <sub>emp</sub>	Número de amostras empilhadas verticalmente
O	Oxigênio
°C	Grau celsius
S	Enxofre
t	Tempo
ton	Toneladas
TWh	Terawatt-hora
v	Volume

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivos Gerais.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>21</b>
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>23</b>
<b>4.1</b>	<b>Biomassa .....</b>	<b>23</b>
4.1.1	Aspectos gerais do local de origem dos resíduos agrícolas em estudo.....	24
4.1.2	Bagaço da cana-de-açúcar .....	25
4.1.3	Poda de cajueiro.....	26
4.1.4	Poda de mangueira.....	27
<b>4.2</b>	<b>Conceitos de blendas.....</b>	<b>28</b>
<b>4.3</b>	<b>Caracterização e transformação da biomassa .....</b>	<b>29</b>
4.3.1	Poder calorífico.....	30
4.3.2	Densidades a Granel e Aparente .....	30
4.3.3	Umidade.....	30
4.3.4	Análise imediata .....	31
4.3.5	Análise elementar .....	31
4.3.6	Termogravimetria .....	32
4.3.7	Processo de densificação .....	32
4.3.8	Compressão diametral .....	33
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>39</b>
<b>6.1</b>	<b>Material <i>in natura</i> .....</b>	<b>39</b>
<b>6.2</b>	<b>Seleção das blendas.....</b>	<b>47</b>
<b>6.3</b>	<b>Briquetes.....</b>	<b>54</b>

<b>6.4</b>	<b>Resistência mecânica dos briquetes .....</b>	<b>57</b>
<b>6.5</b>	<b>Produção científica .....</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>
	<b>APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS E CULTURAIS DE CADA BIOMASSA .....</b>	<b>67</b>
	<b>APÊNDICE B – PRODUÇÕES CIENTÍFICAS .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Fontes alternativas de energia aos fósseis fazem parte de uma agenda mundial de sustentabilidade. A biomassa ostenta formas e condições diversas, todas podem ser utilizadas para contribuir com o desenvolvimento social.

A era industrial demandou muita energia, como por exemplo, o petróleo, como forte tendência, ganhou mercado e se difundiu de forma global. Porém, desde as crises mais graves do petróleo, registradas na década de 70, alguns países que possuíam uma forte dependência deste combustível despertaram o interesse por outras fontes de energia (STRAPASSON, 2004; BRASÍLIA, 2008).

O Brasil, para além da valorização da sua vocação nas hidrelétricas, teve iniciativas como a intensificação da prospecção de petróleo, incremento da produção de carvão mineral no país, avanço na cultura da cana-de-açúcar, investimento com o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) e promoção dos primeiros programas de eficiência energética a nível nacional (STRAPASSON, 2004). Tudo isso possibilitou que hoje se tenha uma matriz energética com fontes mitigadoras para um menor impacto ambiental.

O conceito de Desenvolvimento Sustentável ganhou força na agenda mundial na Conferência das Nações Unidas de 1972, em Estocolmo. Antes disso, fez-se referência a esse termo como “Ecodesenvolvimento” buscando se designar: a promoção do desenvolvimento, permitindo preservar o meio ambiente. A posteriore, a sua epistemologia sofreu profundas reflexões e variações (VARELLA, 2009). Embora este conceito também represente a esperança de um mundo mais justo para as futuras gerações, promover o Desenvolvimento Sustentável não parece uma tarefa trivial quando se identifica interesses distintos.

Ainda que em longo processo de desenvolvimento, a nação brasileira vem mostrando, nos últimos anos, que deverá cada vez mais explorar o potencial energético contido nos seus recursos naturais, como a recente evolução da energia eólica na matriz elétrica brasileira estimulada pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), convergindo para alavancar o seu crescimento e promover um Desenvolvimento Sustentável (BRASIL, 2016). O Proinfa tem o objetivo de aumentar a participação de fontes alternativas renováveis, inclusive empreendimentos termelétricos a base de biomassa, na produção de energia elétrica.

Considerado como um dos maiores produtores e exportadores agrícolas devido a várias razões, desde a disponibilidade de área para cultivo, possibilidade de introdução de culturas variadas e a posição geográfica (condições climáticas adequadas), o Brasil apresenta

perspectivas de crescimento 1,5% ao ano, até 2024, em relação ao uso da terra para as principais safras, inclusive mantendo-se como o maior produtor e exportador mundial de açúcar (OCDE-FAO, 2015). Desta forma, o país precisa valorizar a produção de insumos agrícolas a partir do aproveitamento de resíduos sólidos orgânicos e cada vez mais incrementá-los na matriz energética, como já é feito com a casca de arroz e o bagaço da cana-de-açúcar (BRASÍLIA, 2008).

A biomassa é considerada uma fonte alternativa de energia, pois consiste em um material orgânico de origem vegetal ou animal. Segundo Nogueira e Lora (2003), a energia presente na biomassa pode ser transformada (através de processos de conversão físicos, químicos e biológicos) em combustíveis líquidos, sólidos e gasosos.

Briquete trata-se da biomassa transformada com agregação de valor, em que através de um processo físico pequenas partículas de material sólido são prensadas para formar blocos de forma definida (PEREIRA et al., 2008). Segundo Hansted (2016), os briquetes são combustíveis sólidos obtidos por meio da compactação da biomassa em que há aplicação de pressão sobre as partículas. Dentre as vantagens apresentadas destaca-se o aumento da densidade da biomassa e, conseqüentemente, aumento da capacidade energética relativa.

Diante da necessidade de viabilizar formas eficientes de aproveitamento do bagaço de cana excedente das usinas de álcool e açúcar, o presente trabalho tem por objetivo o estudo da contribuição energética da mistura de podas de cajueiro e mangueira ao bagaço de cana-de-açúcar, aproveitando-os na forma de briquetes. Para isso, a caracterização da biomassa deve ser feita previamente, ou seja, conhecer suas propriedades, para que haja uma melhor escolha da fração a ser utilizada.

A caracterização pode basear-se nas propriedades físicas (granulometria, massa específica, densidade e teor de umidade), na análise imediata (teor de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo), análise elementar, a qual analisa os elementos químicos presentes na biomassa, análise molecular (teor de lignina, celulose e hemicelulose), análise termogravimétrica, a qual apresenta o comportamento da matéria sob a influência de elevadas temperaturas, e no Poder Calorífico.

Desta forma, o aproveitamento da biomassa como fonte energética alternativa, reunindo técnicas de caracterização e transformação, pode otimizar os processos de combustão e minimizar os níveis de emissão de poluentes, visando contribuir para a adoção de processos produtivos mais equilibrados, no atendimento aos requisitos de geração de energia térmica.

## 2 JUSTIFICATIVA

O Plano Nacional de Energia do Brasil prevê, de 2005 a 2030, um incremento de 6,5 GW, somente a partir da biomassa, visando a sua expansão energética como fonte geradora de energia elétrica (BRASIL, 2007).

A Biomassa é uma das fontes de energia com maior potencial de crescimento nos últimos anos. Segundo estudos do World Energy Council (WEC), em 2007, mesmo com uma pequena participação mundial de cerca de 1%, esta fonte de energia já vem virando tendência como alternativa aos energéticos fósseis. Em 2005, os Estados Unidos produziu 56,3 TWh de energia elétrica oriundos da biomassa, respondendo por 30% do total mundial, seguido de Alemanha e Brasil, ambos com participação de 7,3% da produção (BRASÍLIA, 2008).

O Brasil, por sua vez, vem avançando na utilização da biomassa como fonte de energia elétrica. Na relação das fontes internas, em 2006, a biomassa com 3,7% só foi superada pela hidroeletricidade com 85,4%. Em 2008, haviam 302 termelétricas movidas à biomassa no país. Em março de 2015, o número total de usinas aumentou para 504 e corresponde a 9,2% da capacidade instalada (BRASÍLIA, 2015). Um ano depois, o número de usinas termelétricas à biomassa aumentou para 524 e a capacidade instalada evoluiu para 9,4% (BRASÍLIA, 2016a).

Dados mais recentes indicam que, no mês de junho de 2016, a capacidade instalada total de geração de energia elétrica do Brasil atingiu próximo de 145 GW. Em comparação com o mesmo mês em 2015, houve um acréscimo de 7,6 GW, sendo 1,3 GW de fontes térmicas. No mês de maio de 2016, a geração térmica na matriz de produção de energia elétrica, em termos globais, reduziu 0,2 pontos percentuais (p.p.) entre abril e maio de 2016, com destaque para as variações de +1,1 p.p. de geração a biomassa, de -0,9 p.p. de geração a gás e de -0,7 p.p. de geração a petróleo (BRASÍLIA, 2016b).

Os estudos correntes talvez ampliassem as estimativas de produção de energia se incorporassem uma abordagem ao potencial dos resíduos agrícolas. Sente-se falta, por exemplo, da quantificação precisa e incremento dessas variadas fontes, que poderiam complementar os combustíveis sólidos convencionais, como o carvão vegetal, a lenha e o bagaço da cana-de-açúcar, apontados no Plano Decenal de Expansão de Energia 2024, que se baseia nos dados estudados até 2015 para planejar a expansão eletroenergética do país (BRASIL, 2015).

Assim como diversas regiões do Brasil, a macrorregião de Baturité, ou o Maciço de Baturité, localizado no interior do Estado do Ceará, possui atividades agrícolas ativas e,

por consequência, há produção expressiva de resíduos. Mais especificamente para a região citada, dentre as culturas permanentes com maior produção, destacam-se: banana em cacho (98.908 ton), castanha de caju (7.041 ton), manga (2.835 ton), café em grão (1.973 t), entre outras. Na produção de flores e plantas ornamentais, que tem abastecido e abastece, dentre outros mercados, o de Fortaleza, dá-se notícias também que versam sobre a exportação do supracitado produto. Quanto aos produtos extrativos no Território, os que mais se destacam são: carvão vegetal (199 ton), babaçu (102 ton) entre outros (BRASIL, 2010).

Outro fator que merece atenção é o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, que mesmo após uma longa discussão, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) foi aprovada no Brasil em 2010 na forma de lei. Logo em seguida este Plano foi construído e alcançou uma abordagem aos resíduos agrossilvopastoris e das agroindústrias primárias associadas (BRASIL, 2012).

As estimativas resultantes do Plano Nacional dos Resíduos Sólidos, referentes a geração de resíduos oriundos das agroindústrias associadas à agricultura para o Brasil, representaram em torno de 290.838.411 toneladas de resíduos para o ano de 2009. O uso energético desses resíduos poderia representar um potencial energético instalado de até 23 GW/ano. Os resíduos que mais contribuíram com estes valores, cerca de 69%, foram o bagaço e a torta de filtro, oriundos da cana-de-açúcar, gerados em sua maioria na região Sudeste (BRASIL, 2012).

Desta forma, o Estado reconhece a escassez de informações quantitativas relacionadas aos resíduos oriundos da biomassa no Brasil, porém, define metas para alterar este cenário assim como diretrizes e estratégias para implantar o aproveitamento energético desses recursos naturalmente ofertados, compreendendo desde o aspecto da avaliação de potencial energético ao da educação ambiental no meio rural e propondo soluções regionalizadas e incentivos financeiros e fiscais (SANTAELLA et al., 2014).

Justifica-se, portanto, dedicar-se a estudos de aproveitamento da energia térmica contida nos resíduos da biomassa como método de desenvolvimento sustentável. Entretanto, para uma aplicação térmica eficiente da biomassa exige-se estudos de caracterização que permitam indicar as condições do material e os produtos gerados além do calor. Antes da combustão, a compactação do material deve proporcionar um aumento da densidade energética. Isso surge como característica de principal ambição de indústrias que utilizam caldeiras e/ou queimadores, por exemplo, pois evidentemente proporciona a conversão de uma maior quantidade de energia em uma elevada produção.

### 3 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho foram explanados de forma geral e, na sequência abaixo, discriminando cada análise e/ou ensaio necessário para sua efetivação.

#### 3.1 Objetivos Gerais

Em modos gerais, este estudo investigou a viabilidade técnica de misturar o bagaço de cana-de-açúcar com os resíduos da poda de mangueira e do cajueiro para agregar valor e produção de briquetes e posterior aproveitamento da energia térmica. Propondo-se, para isto, a caracterização de cada biomassa residual na forma *in natura*. A partir do estudo da mistura diversificada de frações mássicas, formou-se blendas e realizou-se a análise imediata e a quantificação do poder calorífico desses, a fim de determinar qual a melhor fração para promover a transformação física destes resíduos em briquetes.

#### 3.2 Objetivos Específicos

Para o desenvolvimento deste trabalho foram planejados os seguintes objetivos específicos, para a matéria *in natura*:

- a) Verificar o Poder Calorífico Superior (PCS);
- b) Verificar o teor de umidade (W);
- c) Medir a Densidade a Granel (DG);
- d) Determinar a Densidade de Energia *in natura* ( $DE_{in\ natura}$ );
- e) Verificar o teor de Cinzas (A);
- f) Verificar o teor de Materiais Voláteis (MV);
- g) Verificar o teor de Carbono Fixo (F);
- h) Quantificar por análise elementar;
- i) Gerar o gráfico do comportamento termogravimétrico;

Para as blendas determinadas, propôs-se examinar os seguintes parâmetros:

- a) Verificar o Poder Calorífico Superior (PCS);
- b) Verificar o teor de Cinzas (A);
- c) Verificar o teor de Materiais Voláteis (MV);
- d) Verificar o teor de Carbono Fixo (F);

e) Analisar qualitativamente os itens anteriores (de “a” a “d”) para a produção de briquetes;

f) Aferir a Densidade a Granel (DG) das blendas selecionadas.

A partir das características das blendas formadas e da seleção das melhores frações para a produção de briquetes em escala de laboratório, procurou-se atingir os seguintes objetivos específicos:

a) Compactar o bagaço de cana-de-açúcar;

b) Compactar as blendas selecionadas na análise qualitativa;

c) Medir a Densidade Aparente (DA);

d) Calcular a Densidade de Energia do briquete ( $DE_{\text{briquete}}$ );

e) Realizar o ensaio mecânico de compressão diametral;

f) Calcular a resistência mecânica.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

As premissas fundamentais sobre este estudo foram elencadas abaixo, inicialmente fazendo-se uma abordagem sobre biomassa, levantando informações culturais dos objetos de estudo, apresentando-se conceitos sobre blends e, finalmente, sobre as técnicas de caracterizações e transformações empregadas.

### 4.1 Biomassa

Segundo Nogueira e Lora (2003), a biomassa é a matéria vegetal oriunda da fotossíntese, a qual contém energia química procedente da transformação energética da radiação solar. Quando os laços adjacentes entre moléculas de carbono, hidrogênio e oxigênio são quebrados por combustão, digestão, ou decomposição, estas substâncias liberam sua energia química armazenada. Os autores ainda esclarecem que a energia presente na biomassa pode ser transformada (através de processos de conversão físicos, químicos e biológicos) em combustíveis líquidos, sólidos e gasosos.

Para Cortez et al. (2008), o termo biomassa é originado de materiais orgânicos biodegradáveis provenientes de plantas, animais e microrganismos. O autor complementa que a biomassa inclui produtos, subprodutos, resíduos industriais agrícolas e de outras indústrias e resíduos sólidos municipais. Em geral, as fontes de biomassa são marcadas por sua enorme diversidade, o que torna bastante complexa a caracterização como um todo.

Na aplicação como fonte energética, considera-se biomassa uma fonte renovável proveniente da matéria orgânica, podendo ser obtida a partir de fonte animal ou vegetal (PANWAR et al., 2012; SAXENA et al., 2009). Devido à sua complexidade, as distintas fases que as constituem podem ser originadas de forma natural (authigenic and detrital) ou antropogênicas (technogenic) (EASTERLY, BURNHAM, 1996; MCKENDRY, 2002), além disso, por apresentar-se de natureza heterogênea e por possuírem diferenças químicas, as diferentes variedades de biomassas, as quais podem ser utilizadas como combustíveis, dividem-se em grupos e subgrupos, conforme a sua diversidade biológica, origem, dentre outros aspectos<sup>1</sup> (STANISLAV et al., 2010).

Atividades humanas, sejam elas urbanas, agrícolas ou outras, geram sempre resíduos sólidos. A lei de 12.305 de 2 de agosto de 2010 define que resíduos sólidos são:

---

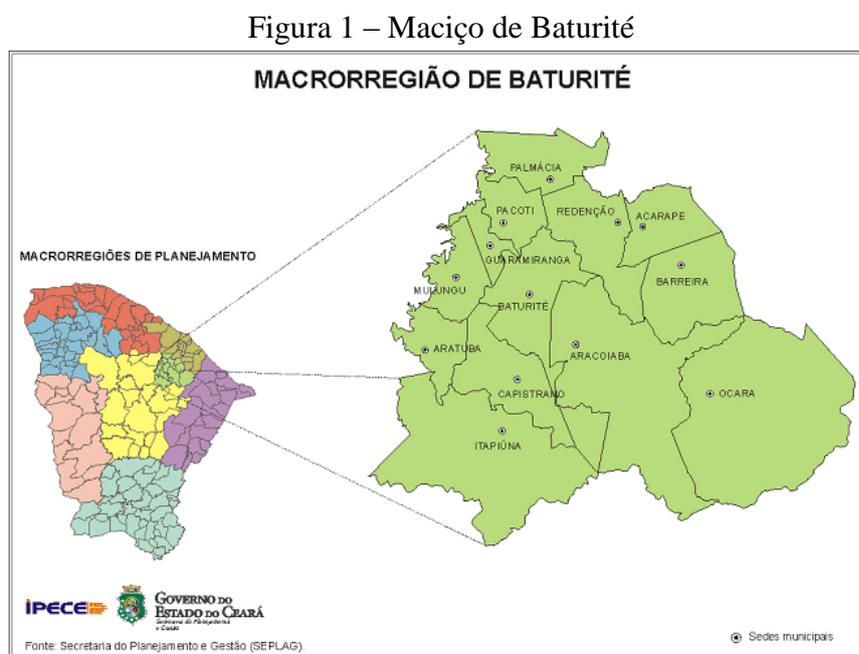
<sup>1</sup> As principais características ambientais que favorecem a produção de cada biomassa em estudo foram levantadas junto à literatura correspondente e relacionadas na tabela do Apêndice A.

“[...] material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (BRASIL, 2012).

Diversos tipos de subprodutos de atividades agrícolas, agropecuárias, florestais, agroindustriais e urbanas, tais como cascas e outros resíduos lignocelulósicos, podem ser utilizados como combustíveis. Nesse contexto, lembram Nogueira e Lora (2003), de uma sabedoria chinesa, “resíduo é matéria-prima mal aproveitada”.

#### 4.1.1 Aspectos gerais do local de origem dos resíduos agrícolas em estudo

Todos os materiais residuais foram coletados na Macrorregião de Baturité, Figura 1, popularmente conhecida como Maciço de Baturité.



A Macrorregião de Baturité constitui uma das oito (8) Macrorregiões de planejamento do Estado do Ceará (CEARÁ, 2012) e possui 3707,3 km<sup>2</sup> de extensão. É

dividida em 13 municípios: Acarape, Aracoiaba, Aratuba, Barreira, Baturité, Capistrano, Guaramiranga, Itapiúna, Mulungu, Ocara, Pacoti, Palmácia e Redenção. Tal Macrorregião faz limítrofe com a Macrorregião Metropolitana de Fortaleza.

Segundo a Superintendência Estadual do Meio Ambiente (Semace), o Maciço possui 3 (três) tipologias florestais: floresta úmida perenifólia, localizadas em altitudes superiores a 800 m em relação ao nível do mar, floresta subperenefólia tropical plúvio nebuloso (mata úmida), localizada de 600 a 800 m de altitude, e floresta subcaducifólia tropical pluvial (mata seca), ostentando altitude de até 600 m (BRASIL, 2010).

De acordo com o senso demográfico de 2010, pouco mais de 50% da população do Maciço de Baturité reside em zona rural, conseqüentemente, uma elevada parcela da população ocupa-se na agricultura, na pecuária e no extrativismo (BRASIL, 2010; CEARÁ, 2012).

#### **4.1.2 Bagaço da cana-de-açúcar**

Introduzida no período colonial, a cana-de-açúcar hoje é uma das principais culturas da economia brasileira e tem colaborado para o desenvolvimento do país. O Brasil não é apenas o maior produtor de cana, ele também se destaca como primeiro do mundo na produção de álcool e açúcar (MAPA,2012).

O bagaço de cana-de-açúcar é um subproduto fibroso resultante da moagem da cana e que pode ter diversos usos (SOARES, 2012). O bagaço utilizado como objeto de estudo e subproduto pode ser observado na Figura 2, registrado no local de coleta.

Figura 2 – Bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Próprio autor.

O setor sucroalcooleiro utiliza a energia proveniente do bagaço da cana-de-açúcar para gerar eletricidade para seu próprio consumo, empregando em processos de cogeração, no

qual ocorre a produção de dois ou mais energéticos a partir de um único processo de geração de energia (BRASÍLIA, 2008).

A cana de açúcar usada na produção de etanol crescerá cerca de 532 Mton em 2024, 61% acima do nível no período base utilizado pela OCDE-FAO (2015), de 2000 a 2014. As perspectivas da OCDE-FAO mostram ainda que a cana de açúcar destinada ao mercado de etanol e a produção de açúcar devem, até 2024, se expandir mais rapidamente do que o consumo, resultando em um maior superávit exportável. Até lá, as exportações totais devem crescer a uma média de 4,1% ao ano.

De uma maneira geral, segundo Braunbeck e Cortez (2005) e Cortez et al. (2008), do peso inicial da cana-de-açúcar cerca de 30% corresponde ao bagaço gerado na indústria açucareira. Como a safra coincide com o período de estiagem na região Sudeste/Centro-Oeste, o uso deste recurso em termelétricas auxilia na preservação dos níveis dos maiores reservatórios das usinas hidrelétricas do país. De acordo com as estimativas da União da Indústria de Cana-de-Açúcar (Unica) em 2020, a eletricidade produzida por este setor poderá representar 18% da matriz energética brasileira (UNICA, [2015]).

#### **4.1.3 Poda de cajueiro**

O caju é oriundo de uma atividade cultural que ocupa uma área de 710.000 ha, só no nordeste brasileiro, o que representa cerca de 99,5% da área que cultiva o caju no país. O Brasil foi o quarto maior produtor mundial de caju em 2006. Tomando como base a produção de castanha, entre os períodos de 2006 a 2012, houve uma produção média de 181 mil toneladas (IBGE, 2012), mostrando que se trata de uma cultura que se mantém ativa.

Nos tratos culturais do cajueiro são realizadas as operações de desbrota, retirada de panículas, consorciação e as podas dos tipos de formação, limpeza e manutenção. As podas, empregada corretamente, depende de diversos fatores, como o hábito de crescimento do clone, o porte da planta, o sistema de plantio empregado e a forma de colheita (EMBRAPA, 2012).

Pode-se observar, na Figura 3, a poda do cajueiro coletada e acondicionada.

Figura 3 – Poda de cajueiro



Fonte: Próprio autor.

#### 4.1.4 Poda de mangueira

De acordo com dados do IBGE (2012), a produção de manga, em 6 anos, alcançou uma média 1.208.079 toneladas. Dos 26 Estados brasileiros, 22 e o Distrito Federal, produzem o fruto em 73.690 ha, com praticamente toda a área colhida. Essa área equivale a cerca de  $\frac{1}{4}$  da área total de produção de café, o maior produto do agronegócio brasileiro (MAPA, 2012).

A região Sudeste cresceu, em termo de área colhida de manga, 35,90% de 1990 a 1997, e, neste último ano, foi responsável 48,13% da área colhida com manga no país, a partir de então, apresentou uma tendência declinante, de sorte que dez anos depois, esta mesma área sofreu uma redução da ordem de 31,63%, voltando aos níveis do início da década dos anos 1990. Por outro lado, na região Nordeste, a área colhida entre os anos de 1990 e 2007 cresceu 206,84% e, no último ano já detinha 68,62% da área com mangueira em produção, no País (EMBRAPA, 2012).

No Nordeste, a manga é cultivada em todos os estados, em particular nas áreas irrigadas da região semiárida, que apresentam excelentes condições para o desenvolvimento da cultura e obtenção de elevada produtividade e qualidade de frutos. As principais áreas produtoras de manga estão localizadas nos estados da Bahia, Pernambuco e Ceará, que

contribuíram, respectivamente, com 52,31%, 19,12% e 9,44% do total da área cultivada da região nordestina no ano de 2007 (EMBRAPA, 2012).

Na Figura 4 pode-se observar o material da poda da mangueira que foi coletado para estudo e manteve-se acondicionado.

Figura 4 – Poda de mangueira



Fonte: Próprio autor.

Além de se tratar de um material classificado como de lavoura permanente, o cultivo sistêmico da mangueira exige a aplicação de técnicas de diversas podas para melhoramento da produção do fruto. Há diversas atividades que ocorre pela prática de poda, em que se incluem a poda de limpeza, levantamento de copa, abertura central, equilíbrio, correção da arquitetura, além da poda lateral e de topo. Além disso, existem ainda as desfolhas, podas para manejo da floração e a poda de renovação e rejuvenescimento (EMBRAPA, 2012). O que, certamente, deve levar a uma significativa produção de resíduos.

#### 4.2 Conceitos de blendas

O termo blenda é muito utilizado em processos de modificação de polímeros. Em 1846, Thomas Hancock, conseguiu modificar polímeros com uma simples mistura mecânica

de borracha natural com “guta percha”<sup>2</sup>. Por este motivo, surgiu uma nova classe de polímero chamada, como originalmente em inglês, de “Polymer Blends” ou, em português, blenda polimérica (SOUZA, 2007).

Blenda polimérica trata-se de uma terminologia que pode ser adotada para representar as misturas físicas ou mecânicas de dois ou mais polímeros, ou ainda copolímeros, de forma que entre as cadeias moleculares dos polímeros diferentes não haja um elevado grau de reação química (BRASKEM, 2002; SOUZA, 2007).

Para Ruschel et al. (2014) foi importante analisar diferentes concentrações de biodiesel como aditivo ao diesel, com teores de 5, 10, 20, 50, 75% em termos de volume por volume (v/v), misturas estas que o autor chamou de blendas.

A metodologia de variação de concentrações de substâncias também foi utilizada por Silva et al. (2015b), que por sua vez formou as proporções (banha suína: óleo de arroz): 100:0, 0:100, 90:10, 70:30 e 50:50 (m/m) e promoveu, inclusive, alterações térmica e físico-química.

Neste sentido, a terminologia blendas converge para uma conotação relacionada a mistura física de materiais, já empregado em diversos estudos para distintos materiais. Visto isso, esse trabalho também fez uso de abordagem similar.

### **4.3 Caracterização e transformação da biomassa**

De acordo com Nogueira e Lora (2003), a biomassa bruta que se pretende aplicar em processos de conversão, pode-se apresentar de muitas maneiras, seja em termos de granulometria ou em termos de umidade. No processamento algumas etapas básicas são utilizadas nas biomassas com o intuito de convertê-las em biocombustíveis sólidos, como: redução de tamanho, densificação ou secagem, ajustando as características e melhorando o rendimento nos processos de conversão subsequentes.

Para transformar um material disperso em outro compacto e homogêneo, uma caracterização da biomassa deve ser feita, ou seja, conhecer suas propriedades, para que haja uma melhor escolha da fração adequada e, conseqüentemente, da tecnologia de conversão. Tais características compreendem a descrição físico-químicas específicas (CORTEZ et al., 2008).

---

<sup>2</sup> A guta-percha é uma substância vegetal obtida a partir do látex do palauquium, árvores relacionadas ao sapotizeiro (BRASIL ESCOLA, [20--]).

### 4.3.1 Poder calorífico

O poder calorífico de um energético qualquer pode ser definido como a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa do combustível. O valor quantitativo desse parâmetro varia de acordo com o teor de umidade. A diferença entre o poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico superior (PCS) é a energia requerida para evaporar a umidade presente no combustível e a água de formação obtida a partir da oxidação do hidrogênio do combustível. Tudo isso porque o PCI não leva em consideração o calor latente de condensação da umidade dos produtos da combustão (CORTEZ et al., 2008).

### 4.3.2 Densidades a Granel e Aparente

Um dos métodos de se determinar a densidade de um material sólido, como o carvão vegetal, consiste em se determinar o peso do carvão contido em uma caixa com volume de  $1 \text{ m}^3$ . A relação entre o peso obtido e o volume é denominada de densidade a granel, dada em  $\text{kg/m}^3$ . O segundo método prevê a subtração do volume dos vazios entre os vários pedaços de carvão da medida realizada para densidade a granel. Mede-se assim, o volume dos vários pedaços considerando-se os poros internos como ocupados pelo material do carvão vegetal (BRITO et al., 1982).

Dentre as diferentes densidades citadas, em termos práticos de operação com aparelhos de redução, a mais importante é, sem dúvida, a densidade a granel, pois, esta determina o espaço útil a ser ocupado naqueles aparelhos (BRITO et al., 1982). A densidade expressa a quantidade de material por unidade de volume, portanto, quanto maior, mais concentração há de energia (FURTADO et al., 2010).

### 4.3.3 Umidade

Nogueira e Lora (2003) definem que a umidade é a medida da quantidade de água livre na biomassa e que pode ser avaliada pela diferença entre os pesos de uma amostra, antes e logo após ser submetida à secagem.

A movimentação da água do interior para a superfície depende da temperatura de secagem, permeabilidade, densidade da madeira, espessura das peças e gradientes de umidade. Durante o processo de secagem, há uma fase em que a quantidade de água

transferida para a superfície é menor que a água que se evapora na superfície. Nessas condições, o teor de umidade superficial diminui para valores inferiores à umidade de saturação do ar (TÔRRES FILHO, 2005).

#### **4.3.4 Análise imediata**

A composição química imediata refere-se ao conteúdo percentual, baseado na massa do material combustível, esta pode ser dividida em: materiais voláteis (MV), que expressa a facilidade de combustão do material, - carbono fixo (F) ou coque que, de modo grosseiro, trata-se do remanescente na amostra após a decomposição dos voláteis, cinzas (A), parcela que associa toda a fração inorgânica após a calcinação e, eventualmente, a umidade (W), correspondente à quantidade de água livre presente na biomassa (CORTEZ et al., 2008; NOGUEIRA, LORA, 2003).

Para Protásio (2014), o conhecimento da composição química imediata é imprescindível para estimar o grau de combustão da biomassa, especialmente se o combustível for destinado à geração de calor, vapor ou eletricidade, bem como para a cocção de alimentos.

#### **4.3.5 Análise elementar**

O conhecimento da composição química elementar é essencial na avaliação do potencial energético de um combustível. Ela corresponde a fração, em massa seca, dos principais elementos constituintes da biomassa. Neste sentido, representa-se em percentual o teor de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S) (PROTÁSIO, 2014).

Por meio do conteúdo de cada elemento químico torna-se possível analisar os processos de conversão energética, como os cálculos necessários à quantidade de ar necessário para uma combustão eficiente e a quantidade de gases gerados, assim como a entalpia, energia e poder calorífico do combustível (PROTÁSIO, 2014; CORTEZ et al., 2008; NOGUEIRA, LORA, 2003).

#### 4.3.6 Termogravimetria

A análise termogravimétrica (TGA) trata-se de uma técnica termoanalítica que, através de uma termobalança composta por um programador de temperatura, além doutros elementos, é possível pesar continuamente a amostra e acompanha sua perda e/ou ganho em função da temperatura (DENARI, 2012).

O programador de temperatura pode ser ajustado para manter constante a temperatura da amostra (operação isotérmica) ou pode ser ajustado para fazer com que a sua temperatura varie linearmente com o tempo; a razão de aquecimento pode e deve ser ajustada de acordo com as peculiaridades próprias das transformações que a amostra deverá sofrer (IONASHIRO, 2004).

Na análise termogravimétrica (TG) mede-se a variação de massa de uma substância ( $\Delta m$ ) quando esta é submetida a uma programação controlada de temperatura. Já a termogravimetria derivada (DTG) é um recurso matemático que fornece a derivada primeira da curva TG e seus picos determinam áreas proporcionais à perda de massa sofrida pela amostra (PEREIRA; SCHNITZLER; CARVALHO FILHO, 2005). Através dessa técnica é possível conhecer a estabilidade térmica das amostras e estudar a decomposição térmica das matérias orgânicas em estudo.

#### 4.3.7 Processo de densificação

O processo de densificação é o processo de compactar resíduos de biomassa como madeira, casca de amendoim, palha do milho e similares, para que possam ser facilmente, transportado e armazenados (FRAZA, 2008).

De acordo com Oliveira Júnior (2013), para fazer face aos problemas já descritos, é possível densificar a matéria orgânica, que passa pela compressão de forma a tornar a biomassa mais homogênea e compacta. As técnicas mais comuns são a produção de briquetes e péletes<sup>3</sup>. A biomassa é triturada, formando a uma mistura mais homogênea que depois de seca é comprimida obtendo a forma final. O resultado é um composto 100% natural, com um elevado poder calorífico devido à reduzida umidade.

Os processos de compactação de biomassa são classificados em duas categorias principais: compactação quente em alta pressão (o mais importante em relação à variedade de

---

<sup>3</sup> Diferenciam-se dos briquetes em relação ao seu tamanho. O diâmetro dos péletes pode variar entre 6 e 16 mm, enquanto os briquetes possuem diâmetro superior a 50 mm (DIAS et al., 2012).

matérias que pode processar e às características dos produtos obtidos) e compactação fria em baixa pressão. A conveniência de praticar a compactação em condições de elevada pressão consiste na obtenção de um produto com maior densidade e maior durabilidade, especialmente em relação ao manuseio e transporte (GONÇALVES, 2010).

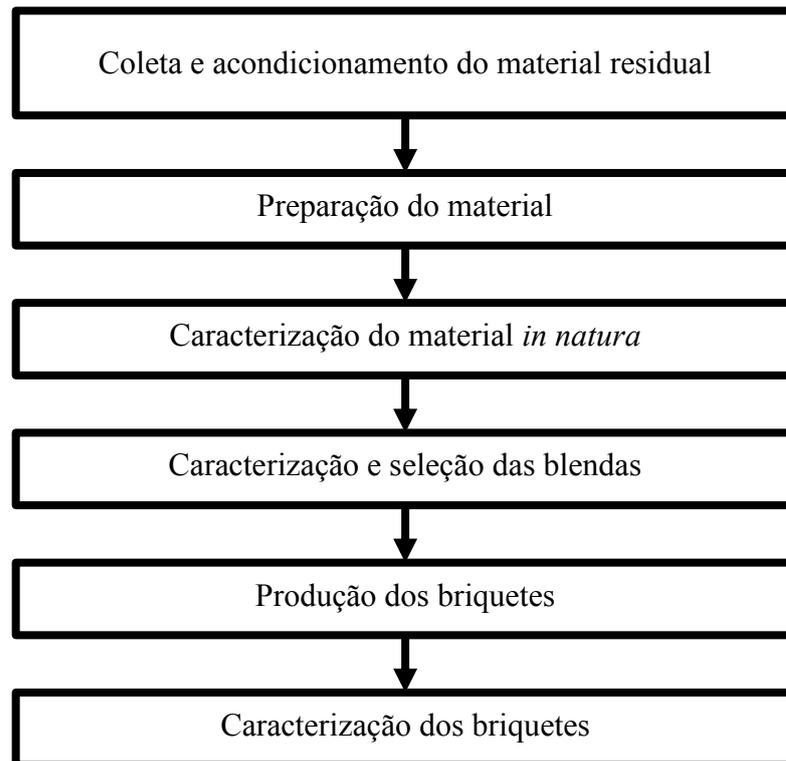
#### **4.3.8 Compressão diametral**

A resistência dos briquetes à compressão foi determinada para se prever o seu comportamento mecânico submetido a uma determinada carga ou esforço, considerando a sua posição de armazenamento. No ensaio, o briquete é submetido à pressão contínua e progressiva até que o mesmo frature. A resistência à compressão é um parâmetro significativo na avaliação do briquete ao manuseio e condições de trabalho (MELO, 2000 apud GONÇALVES, 2010).

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Produziram-se os briquetes seguindo a metodologia apresentada no fluxograma da Figura 5.

Figura 5 – Metodologia da produção e estudo dos briquetes



Fonte: Próprio autor.

No desenvolvimento do trabalho foram utilizados os resíduos agroindustriais: da poda do cajueiro (*Anacardium occidentale L.*), da poda da mangueira (*Mangifera indica L.*), ambos em composições de galhos e folhas e coletados na cidade de Baturité-CE; e do bagaço da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*), decorrentes da fábrica de cachaça Douradinha, localizada em Redenção-CE.

As podas foram coletadas no mês de janeiro de 2014, seus acondicionamentos foram feitos em um *container*, sob temperatura ambiente, em Fortaleza, onde localiza-se o Núcleo de Tecnologia do Estado do Ceará (Nutec), sob proteção contra radiação solar direta e/ou chuva. O bagaço da cana-de-açúcar foi coletado em julho de 2016, ficando acondicionado em sacos plásticos em uma sala de alvenaria, sob temperatura ambiente no mesmo laboratório.

Para a preparação do material, o mesmo passou pela etapa de coleta de uma amostra no local de acondicionamento e posterior redução de seu tamanho. Esta redução exigia a trituração das podas, para tanto se teve o auxílio de um triturador TR200 da metalúrgica Trapp, de 1,5 CV de potência. Por último, o material picado foi peneirado manualmente numa peneira Granutest de 1 mm e ficava mantido dentro de um saco de polímero fechado, a fim de evitar grandes trocas de umidade com o ambiente.

Verificou-se o Poder Calorífico Superior (PCS) de cada material *in natura* pela ASTM E711-87 (ASTM, 2004). Os estudos foram praticados num calorímetro digital IKA C200.

Para a caracterização da densidade a granel da matéria *in natura* utilizou-se a normatização adaptada da NBR ISO 3852 (ABNT, 2009). Após a matéria ser compactada, determinou-se sua densidade aparente seguindo-se uma adaptação da NBR ISO 2420 (ABNT, 2015).

Os cálculos das densidades energéticas foram obtidos por manipulação matemática com base no PCS e nas densidades a granel e aparente medidas. A densidade energética de briquetes compreende a quantidade de energia por unidade de volume e pode ser utilizada para comparação da eficiência energética dos briquetes (PROTÁSIO, 2014; ROSA, 2009).

Executaram-se as análises de umidade (W), pelo método convencional de estufa, adaptando-se ao previsto na NBR 14929 (ABNT, 2003a). A umidade foi expressa em base seca com base na Equação 1 (NOGUEIRA, LORA, 2003).

$$W = \frac{M_{úmida} - M_{seca}}{M_{seca}} \cdot 100 \quad (1)$$

As análises imediatas, ou seja, caracterização pelos componentes de voláteis, cinzas e carbono fixo dos materiais, foram obtidas fazendo-se uso de uma Mufla QUIMIS Q.318.24.

Para o teor de cinzas (A) seguiu-se as orientações da NBR 13999 (ABNT, 2003b). Por manipulação algébrica da Equação 1, ao se possuir a informação de umidade em base úmida (b.u.) e da massa úmida foi possível calcular a massa seca e, por conseguinte, empregar o resultado nos cálculos do denominador  $M_{seca}$  (massa seca) indicado na Fórmula 1 para quantificação do teor de cinzas.

Verificaram-se o conteúdo de materiais voláteis (MV) adotando-se a NBR 8112 (ABNT, 1986) e para o de carbono fixo (F). Este último foi adaptado para expressão do resultado em base seca, já que o teor de carbono fixo é determinado por diferenciação algébrica.

As análises elementares, que resultaram nos teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S) e oxigênio (O), foram solicitadas ao Laboratório de Produtos e Tecnologia em Processo (LPT/UFC), seguindo a norma ASTM D3176-15 (ASTM, 2015) adaptada, com um equipamento Perkin Elmer 2400 Series II CHNS/O Elemental Analyzer, operando na configuração de CHNS. O teor de oxigênio (O) foi determinado por diferença, conforme Equação 2 (PROTÁSIO, 2014).

$$O = 100 - C - H - N - S - A \quad (2)$$

Em que: O é o teor de oxigênio (%); C é o teor de carbono (%); H é o teor de hidrogênio (%); N é o teor de nitrogênio (%); S é o teor de enxofre (%) e A é o teor de cinzas (%), este último foi quantificado na análise imediata apresentada anteriormente.

Adquiriram-se as análises termogravimétricas junto ao LPT/UFC e atendendo à norma ASTM E1131-08 (ASTM, 2008), utilizando-se um equipamento da Mettler Toledo, modelo TGA/SDTA85, em atmosfera inerte (N<sub>2</sub>). Com os dados obtidos, fizeram-se seu tratamento com o auxílio do software Origin 9.1, o que possibilitou a representação gráfica do comportamento térmico das amostras.

As frações duplas foram dispostas de uma forma que garantisse perceber a igual, a menor e a maior participação mássica do bagaço quando misturada com cada uma das podas, definidas, respectivamente, pelas composições: 50%:50%, 25%:75% e 75%:25% (cana:poda). A posteriore, analisaram-se os seus respectivos PCS.

Em seguida, analisaram-se o poder calorífico das blendas numa mistura tripla dos materiais, garantindo-se que o bagaço participasse de forma igual, menor e maior que as outras podas juntas. Portanto, ambas foram dispostos, respectivamente, nas frações de 50%:25%:25%, 40%:30%:30% e 60%:20%:20% (cana:cajueiro:mangueira).

Para as blendas duplas e triplas as análises imediatas foram realizadas nas proporções mássicas análogas às verificações de seus PCS's.

Além do bagaço *in natura*, produziram-se briquetes daquelas blendas que apresentaram as melhores qualidades. Para isto, na ordem prioritária, adotaram-se os critérios de: o maior valor de PCS, o maior valor de F, o maior valor MV e o menor valor de A. Para

esta análise qualitativa também foi gerado gráficos de decisão, ou seja, aqueles do tipo radar, com o auxílio do Microsoft Excel 2010.

Formaram-se os briquetes com o auxílio de uma prensa hidráulica Marcon MPH-15, aplicando-se uma força de aproximadamente 7,5 toneladas, adquirindo-se uma pressão próxima de 37,5 MPa e tempo de repouso de aproximadamente 5 min. O molde cilíndrico, constituído de aço inox, media 5 cm de diâmetro interno. A altura de cada briquete foi medida com um paquímetro, imediatamente após o material compactado ser retirado da forma e, dias após, aferia-se o diâmetro e a altura novamente.

Cada briquete foi formado com cerca de 80 g do material *in natura*. Na prensagem não foram utilizados materiais aglutinantes nem aquecimento.

A análise de compressão diametral (CD) foi realizada empregando-se uma máquina universal de ensaios EMIC - PCE 100C, com célula de carga de 500 kgf, a uma velocidade constante de 3 mm/min. O ensaio foi realizado a partir de uma adaptação da norma NBR 7222 (ABNT, 2011) para determinação da resistência a tração por compressão diametral em amostras cilíndricas de concreto e argamassa.

A Tabela 1 apresenta o resumo das normas e dos principais equipamentos utilizados.

Tabela 1 – Normas e equipamentos por análise

Análises	Normas	Equipamentos	
		Marca	Modelo
PCS	ASTM E711-87 (ASTM, 2004)	Calorímetro digital IKA	C200
DG	NBR ISO 3852 (ABNT, 2009)	Béquer Astral Científica	1000 ml
DA	NBR ISO 2420 (ABNT, 2015)	Paquímetro Starrett	125MEA
W	NBR 14929 (ABNT, 2003a)	Estufa Digital Esterilife	SX 1.3 DTME
A	NBR 13999 (ABNT, 2003b)	Mufla QUIMIS	Q.318.24
MV	NBR 8112 (ABNT, 1986)	Mufla QUIMIS	Q.318.24
F	NBR 8112 (ABNT, 1986)	Por diferença Analisador	Por diferença
TG	ASTM E1131-08 (ASTM, 2008)	termogravimétrico Mettler Toledo	TGA/SDTA85
CHN	ASTM D3176-15 (ASTM, 2015)	Perkin Elmer	2400 Series II CHNS/O Elemental Analyzer
DE	-	-	Manipulação algébrica
CD	NBR 7222 (ABNT, 2011)	Prensa de compressão EMIC	PCE 100C

Fonte: Próprio autor.

O número de amostras empilhadas verticalmente ( $N_{emp}$ ) foi calculado pela força máxima de ruptura ( $F_{Mrup}$ ), por um fator de segurança ( $f_s$ ) e pela massa ( $M$ ) de cada amostra em kg. O  $N_{emp}$  representa a quantidade máxima de amostras empilhadas que um tratamento suporta. O  $F_{Mrup}$  foi fornecido pelo ensaio de compressão. O  $f_s$  foi considerado como 300%, como sugerido por Silva et al. (2015a), ou seja, diminui o  $F_{Mrup}$  em três vezes.

A Equação 3 resume o cálculo do  $N_{emp}$  (SILVA et al., 2015a).

$$N_{emp} = \frac{F_{Mrup}}{f_s \cdot M} \quad (3)$$

A partir do  $N_{emp}$  é possível calcular a altura do empilhamento ( $H_{emp}$ ). Como o diâmetro ( $d$ ) das amostras é dado em cm,  $H_{emp}$  é dada pela Equação 4 (SILVA et al., 2015a).

$$H_{emp} = \frac{N_{emp} \cdot d}{100} \quad (4)$$

Todas as análises foram realizadas em duplicatas e tiveram como medida final utilizada a média aritmética. Para algumas verificações foram realizadas uma terceira análise e utilizaram-se os dois resultados que apresentaram um menor desvio padrão. Para a produção de briquete, quatro amostras foram produzidas.

Demais recursos necessários foram utilizados como: dessecadores, balança de precisão, cadinhos de porcelana e de platina e gás oxigênio (pureza: 99,5%).

Com exceção das análises de TG, as representações gráficas das outras análises e todas as tabelas receberam o auxílio do software Excel do Pacote Office da Microsoft.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Abaixo, segue os resultados referentes à caracterização de cada material *in natura*, descrevendo sobre a umidade e o poder calorífico, as análises imediata, elementar e termogravimétrica e a suas densidades. Um segundo tópico trata da caracterização das blendas para seleção das frações ótimas. O terceiro tópico discorre sobre a produção e resistência mecânica dos briquetes e, por fim, num quarto e último tópico, segue a apresentação dos trabalhos científicos publicados relacionados a esta área.

### 6.1 Material *in natura*

A Tabela 2 apresenta os dados de umidade e PCS de todos os resíduos *in natura* analisados. Os resultados de umidade foram determinados em base seca. O PCS e a densidade a granel foram verificados para o material úmido.

Tabela 2 – W e PCS dos resíduos *in natura*

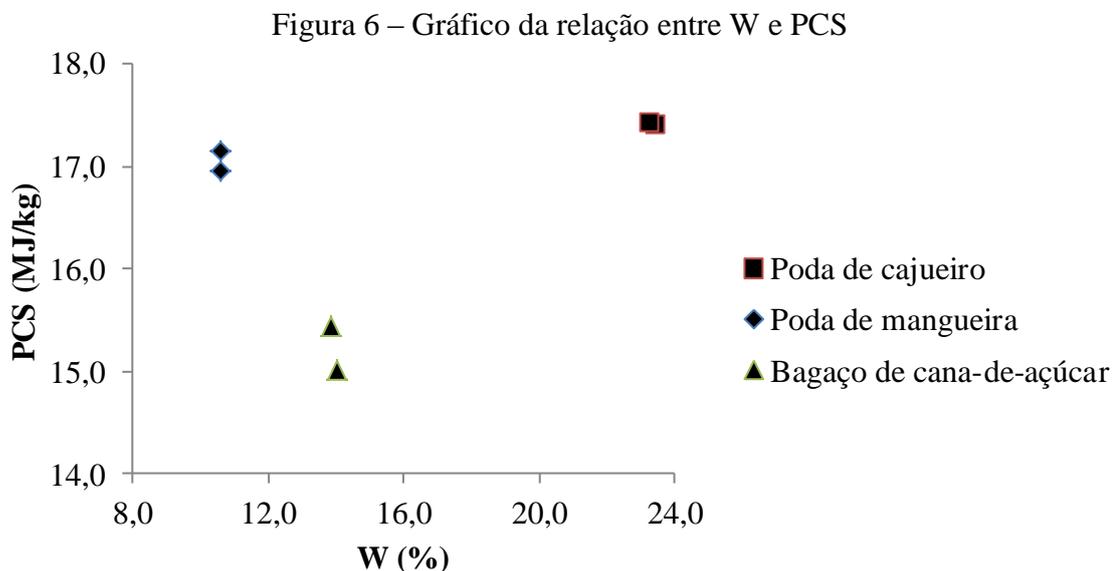
Matéria Prima	W em b.s. (%)		PCS (MJ/kg)	
	Duplicatas	Média	Duplicatas	Média
Poda de cajueiro	23,5	23,4	17,4	17,4
Poda de mangueira	23,3		17,4	
Bagaço de cana-de-açúcar	10,6	10,6	16,9	17,0
	10,6		17,2	
Bagaço de cana-de-açúcar	13,9	14,0	15,4	15,2
	14,0		15,0	

Fonte: Próprio autor.

O resultado da umidade do bagaço foi quantificado numa média de 14,0%. O que significa que de 1 tonelada desse material, cerca de 140 kg correspondem à água livre sobre ele. É importante destacar que esse material apresenta um valor abaixo da literatura (30%) por que passou por um processo de secagem prévia ao sol. De forma análoga, pode-se perceber que de uma tonelada da poda de cajueiro e de mangueira, 235 kg e 106 kg são de massa de água, respectivamente.

Levando-se em consideração o PCS do material *in natura*, a poda de cajueiro resultou em uma maior quantidade de energia por massa de material, enquanto que o bagaço apresentou menor poder de queima entre os materiais analisados.

Pela análise gráfica da Figura 6, obtido com o auxílio do Excel, observa-se a relação entre umidade e poder de queima para as amostras (em duplicatas) analisadas.



Fonte: Próprio autor.

A umidade é uma propriedade que varia de material para material e depende das condições atmosféricas locais, como a umidade do ar e a pressão. Ela pode ser controlada com o auxílio de secadores, comumente empregado em usinas de briquetagens.

Estas podas apresentaram valores que variaram bastante em relação ao bagaço. A poda da mangueira apresentou um poder calorífico elevado para um teor de umidade baixo em relação ao bagaço de cana. Por outro lado, a poda de cajueiro apresentou o maior poder calorífico e ainda pode sofrer ganho com a redução da umidade.

Prensas de pistão trabalham com amostras apresentando umidade entre 10-15 % e as prensas de extrusão com amostras com 8-9% de umidade (NOGUEIRA; LORA, 2003). De acordo com os resultados, pode-se inferir que a produção de briquetes a partir da poda de cajueiro demandaria algum consumo de energia para a secagem do material enquanto que a poda de mangueira e o bagaço de cana já se encontram dentro dos limites exigidos por algumas briquetadeiras<sup>4</sup>. O bagaço só atingiu esses teores por que passou previamente por secagem ao sol, o que também pode ser viabilizado por várias indústrias.

<sup>4</sup> São os principais equipamentos das plantas de compactação da biomassa. Há dois tipos de prensas briquetadeiras para produção de briquetes: as que atuam por pressão e as que atuam por extrusão (DIAS et al., 2012).

Os dados de densidade a granel e a densidade de energia do material *in natura* podem ser observados na Tabela 3. Notoriamente, as podas apresentaram uma quantidade de energia por volume de resíduo bastante superior ao do bagaço de cana.

Tabela 3 – DG e  $DE_{in\ natura}$  dos resíduos

DG ( $g/cm^3$ )		$DE_{in\ natura}$ ( $kJ/cm^3$ )*	
Duplicatas	Média	Duplicatas	Média
0,26	0,28	4,60	4,82
0,29		5,04	
0,20	0,21	3,40	3,62
0,22		3,84	
0,08	0,08	1,22	1,25
0,09		1,29	

Fonte: Próprio autor.

\*Produto de DG com PCS.

Protásio (2014) levantou, para o bagaço de cana de açúcar, a densidade básica que neste trabalho foi associada à densidade à granel, de  $0,10\ g/cm^3$ . Determinando-se uma densidade energética de  $1,96\ kJ/cm^3$ . Silva et al. (2015a) aferiu  $0,06\ g/cm^3$  de densidade para o bagaço de cana a 12% de umidade. Considerando o produto do respectivo PCS medido por Silva et al. (2015a) com essa densidade básica (a granel), a densidade energética desse bagaço foi de  $0,94\ kJ/cm^3$ .

Este parâmetro,  $DE_{in\ natura}$ , evidenciou que se o bagaço melhorar a sua quantidade de energia por volume, ele poderá ser melhor aproveitado na combustão. Essa baixa densidade de energia do bagaço,  $1,25\ kJ/cm^3$ , em relação aos demais resíduos estudados, está associada a um material com menor poder calorífico e visivelmente é mais disperso, tem uma menor densidade.

Talvez a abundância do bagaço gerado despreocupe os grandes produtores em relação à sua baixa densidade energética, para muitos, isso nunca deve ter sido dado importância, por desconhecimento ao tema, mas é provável que se algum produtor souber agregar valor ao principal resíduo das indústrias sucroalcooleiras, seu aproveitamento energético poderá ser potencializado.

Já em termos da composição imediata, também foi verificado cada material *in natura*. A maior média do teor de carbono fixo foi apresentado pela poda de cajueiro; dos

materiais voláteis foi da poda de mangueira; e a menor média do teor de cinzas foi da poda de cajueiro.

A análise imediata, por material, foi quantificada na Tabela 4.

Tabela 4 – Análise imediata dos resíduos *in natura*

Matéria Prima	A (%)		MV (%)		F (%)	
	Duplicatas	Média	Duplicatas	Média	Duplicatas	Média
Poda de cajueiro	4,6	4,6	70,3	70,1	24,2	24,4
Poda de mangueira	13,4	13,5	74,3	74,3	12,3	12,2
Bagaço de cana-de-açúcar	15,4	15,4	70,6	69,0	16,4	15,4
	15,4		67,3		14,5	

Fonte: Próprio autor.

Relacionado ao bagaço da cana, Protásio (2014) encontrou os valores de: F: 13,1%; A: 11,3% (BRAGATO et al., 2012 apud PROTÁSIO, 2014); e MV (Biomassa em geral): 70 a 87%. Enquanto que Nogueira e Lora (2003) encontraram, integralmente para o bagaço da cana de açúcar: F: 14,95%; A: 11,27%; e MV: 73,78%. Silva et al. (2015) aferiu para o bagaço da cana de açúcar a 12% de umidade: F: 17,22%; A: 12,19%; e MV: 70,59%.

Entre os conteúdos voláteis quantificados para este trabalho, o bagaço apresentou o menor valor, ainda assim seu teor também é bastante significativo. O menor teor de carbono fixo também está associado ao bagaço de cana, como apresentado na Tabela 4.

Ao mesmo tempo, o bagaço também apresentou o maior teor de cinzas entre os materiais estudados. Tal fração é indesejável na indústria de energia, pois o elevado teor de cinzas pode se tornar preocupação para um consumidor que deseja mais material orgânico e, geralmente, sem conhecer as características do material, acaba por adquirindo um elevado resíduo na queima.

Contudo, o teor aferido não extrapola os valores do carvão mineral nacional utilizado industrialmente que varia de 40 a um pouco mais de 60% (ABCM, 2000).

O carvão mineral internacional, presente na matriz energética de vários países, varia de 8,1 a 21,40% de teor de cinzas (BRAGATO, 2012 apud PROTÁSIO, 2014)

Analisando-se a composição química elementar, facilmente pode-se observar que a matéria estudada é composta majoritariamente de carbono e oxigênio, com uma participação

muito importante do hidrogênio e, em menor escala, também há nitrogênio e enxofre. Vale destacar que também há a presença de material não orgânico, que para a poda de cajueiro há, em média, 4,6%; para a poda de mangueira, 13,5%; e para o bagaço há uma participação de 15,4%, como pode ser visto ainda na Tabela 4.

A composição elementar dos resíduos agroindustriais estudados pode ser observada na Tabela 5, em que segue cada resultado em duplicata.

Tabela 5 – Amostras da análise elementar do material *in natura*

Matéria Prima	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)
	Duplicatas	Duplicatas	Duplicatas	Duplicatas	Duplicatas
Poda de cajueiro	43,9	5,9	0,8	0,7	44,2
	44,4	6,0	1,0	0,8	43,1
Poda de mangueira	42,2	5,2	1,2	0,6	37,3
	43,8	5,7	0,8	0,7	35,6
Bagaço de cana-de-açúcar	41,2	5,5	0,8	0,6	36,4
	36,5	4,9	1,2	0,6	41,4

Fonte: Próprio autor.

Os valores médios das proporções de cada elemento identificado pela análise elementar encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultado médio da análise elementar do material *in natura*

Matéria Prima	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	A (%)	
	Média	Média	Média	Média	Média	Média	$\sigma$
Poda de cajueiro	44,2	5,9	0,9	0,7	43,7	4,6	0,1
Poda de mangueira	43,0	5,4	1,0	0,7	36,4	13,5	0,1
Bagaço de cana-de-açúcar	38,8	5,2	1,0	0,6	38,9	15,4	0,0

Fonte: Próprio autor.

Nogueira e Lora (2003) levantaram, para o bagaço de cana: C: 44,80%; H: 5,35%; N: 0,38%; S: 0,01%; O: 39,55%.

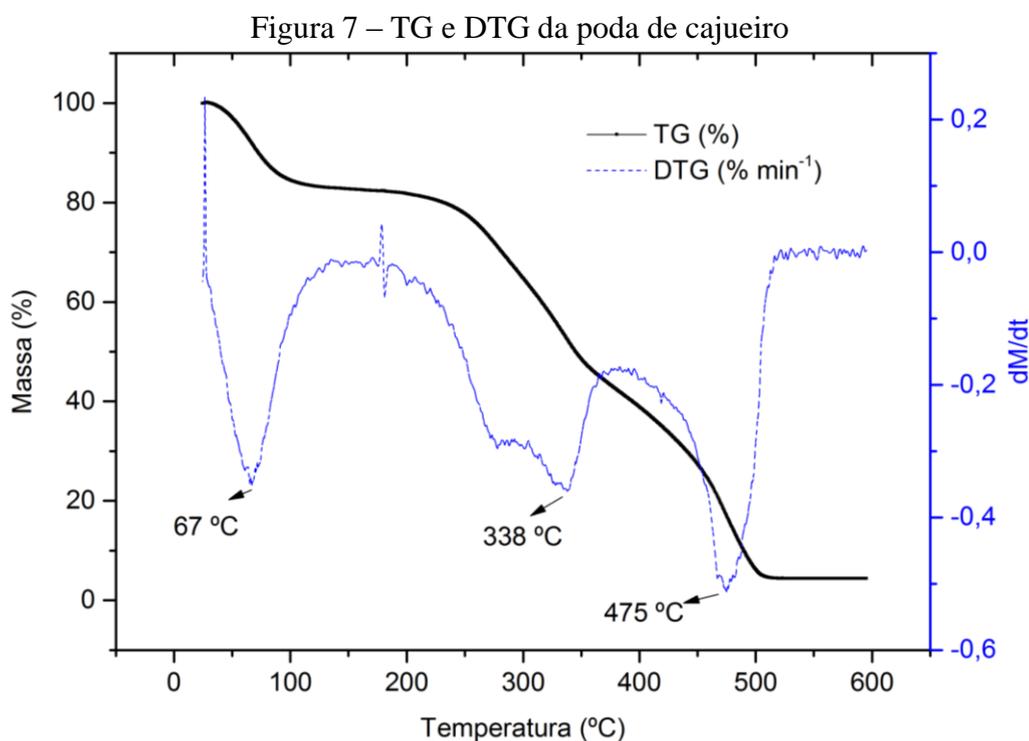
Segundo Protásio (2014), o bagaço de cana é composto de: C: 46,8%; H: 6,3%; N: 0,5%; O: 45,3%, e para a biomassa da madeira de clones de *Eucalyptus* aos 42 meses, o teor de enxofre é de S: 0,20%.

Com essa composição de cada material, a indústria pode determinar os gases produzidos na combustão e assim identificar quais os mais poluentes e, por consequência, os

menos desejáveis. Também é possível determinar o poder calorífico útil, o poder calorífico inferior (PCI).

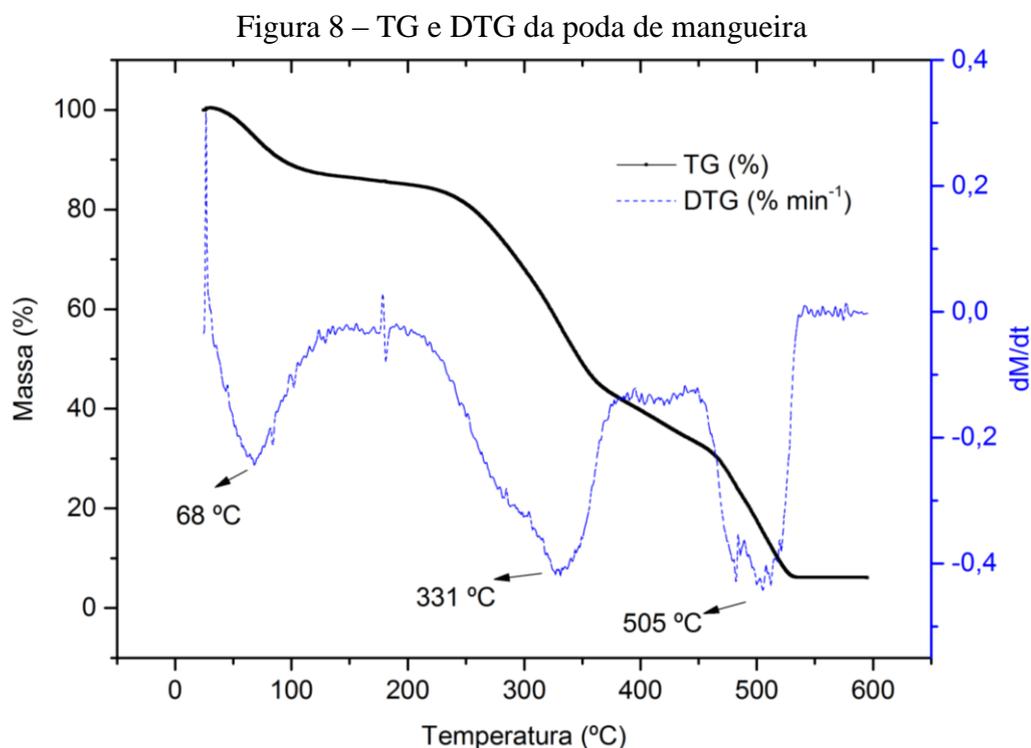
Há carvões de jazidas nacionais que apresentam mais de 6% de enxofre, elemento indesejável em termos poluentes. Portanto, a presença de enxofre, conforme Tabela 6, é relativamente baixa, já que não ultrapassou os 0,75. Pode-se esperar que, na combustão, a produção de gases com presença de S, danosos à saúde humana, seja pequena.

Na combustão, o comportamento do material residual agrícola em relação à variação da temperatura pode ser observado nas Figuras 7, obtida com o auxílio do Origin, para a poda de cajueiro.



Pela análise da decomposição da matéria, eixo vertical do lado esquerdo do gráfico da Figura 7, correspondente à TG, uma curva contínua. Observa-se que há uma redução de material em percentual, como consequência da perda do peso inicial, à medida que este foi submetido a uma maior temperatura. No entanto, foi a análise derivativa (curva tracejada relacionada ao eixo à direita) que nos mostra a que temperaturas aproximadamente ocorrem maiores decomposições e concomitante com prováveis trocas de energia com o ambiente, em especial em três estágios distintos, destacado pelas suas respectivas temperaturas de pico: 67, 338 e 475 °C.

Submetendo também a poda da mangueira a mesma análise, observa-se na Figura 8 que ocorreu uma degradação similar ao da poda de cajueiro (Figura 7).

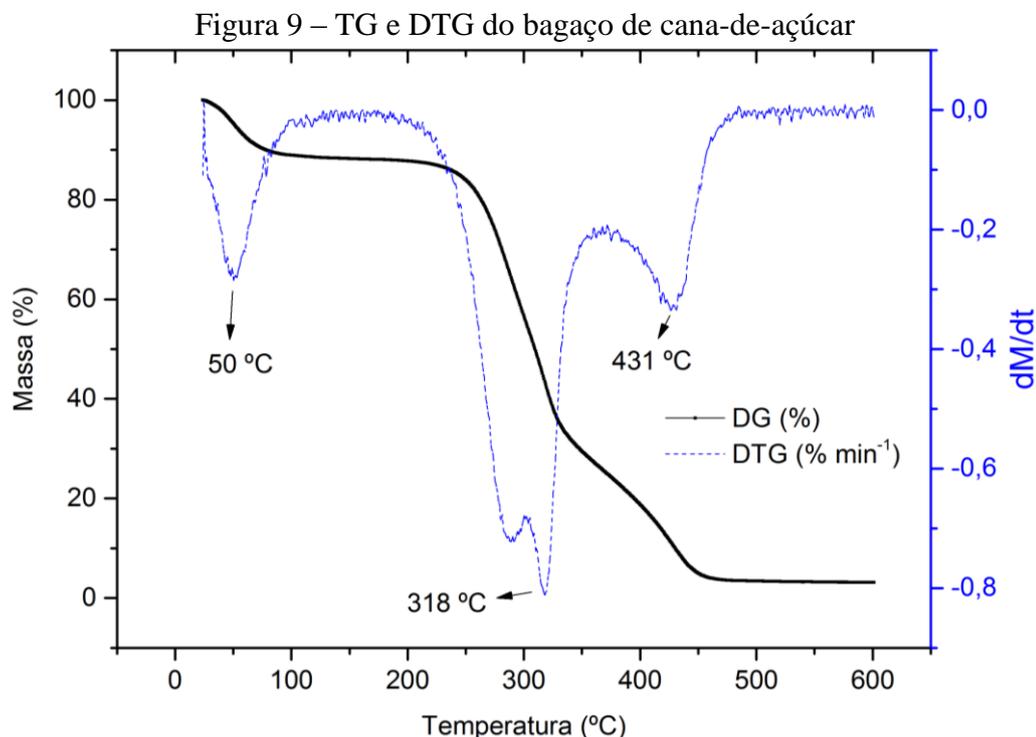


Fonte: Próprio autor.

O primeiro evento ocorre na faixa de 25 a 120 °C (aproximadamente), com temperatura de pico de 68 °C, muito próxima da temperatura de pico do primeiro evento da TG da poda do cajueiro, que foi de 67 °C. Esse evento provavelmente está relacionado à volatilização de toda água livre da amostra. Os dois eventos posteriores provavelmente estão relacionados à degradação térmica da hemicelulose, celulose e parcialmente da lignina, os quais degradam-se quando submetidos a temperaturas acima de 220 °C (PROTÁSIO,2014). Esses últimos eventos apresentaram temperaturas de pico de 331 °C e 505 °C.

Nota-se também que, diferente do comportamento degradante no terceiro evento da poda de cajueiro, na poda de mangueira ocorre uma perda mais dispersa, aproximadamente no intervalo de 470 a 520 °C. Todavia, o comportamento no todo foi bastante semelhante. Em combustão direta, a madeira, tomada como referência em diversos estudos de biomassa, sofre os processos de secagem e emissão dos voláteis a 400 °C; e em aproximadamente 500 °C ocorre à ignição desses voláteis (SOUZA, 2010, NOGUEIRA; LORA, 2003).

Comportando-se de forma análoga aos demais resíduos, na Figura 9 pode-se observar a análise termogravimétrica do bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: Próprio autor.

Alcançando um pico de 50 °C, menor em relação aos das Figuras 7 e 8, dessa vez, para o bagaço de cana, a água livre parece ter se volatilizado mais fácil, pois nota-se que já em 100 ° o primeiro evento foi finalizado.

De acordo com os dados apresentados na curva TG-DTG, para os resíduos da cana, observa-se que entre 250 e 350 °C ocorre um significativo evento podendo ser atribuído à decomposição da celulose e hemicelulose (holocelulose), como verificado por Protásio (2014). Como não houve análise molecular, não se pode afirmar que o bagaço possui mais holocelulose que os demais resíduos, porém, pelo comportamento termogravimétrico, há um forte indicativo de que isso seja verdadeiro.

Este acentuado pico também pode estar associado à volatilização/degradação dos materiais combustíveis, como sugere Nogueira e Lora (2003). Logo, na combustão do bagaço, em temperaturas superiores a 500 °C deve ocorrer à queima dos voláteis, extinção da chama e a combustão do resíduo de carbono, resultando em processos de liberação de calor (SOUZA, 2010, NOGUEIRA; LORA, 2003).

## 6.2 Seleção das blendas

Misturando-se os resíduos em diferentes proporções duplas analisaram-se as propriedades em termos de PCS e análise imediata, como pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 – PCS das blendas duplas

Matéria Prima	PCS (MJ/kg)	
	Duplicatas	Média
Cana:Mangueira (50:50)	16,3	16,3
	16,4	
Cana:Cajueiro (50:50)	16,9	16,9
	16,9	
Cana:Mangueira (25:75)	16,0	15,4
	14,9	
Cana:Cajueiro (25:75)	16,8	16,9
	17,0	
Cana:Mangueira (75:25)	15,4	15,4
	15,5	
Cana:Cajueiro (75:25)	16,8	16,9
	17,0	

Fonte: Próprio autor.

Vale enfatizar que esse poder calorífico poderá aumentar em casos de análise do material em base seca. Condições em que Nogueira e Lora (2003) levantaram 17,3 MJ/kg para o bagaço de cana, em termos de PCI, que por sua vez é menor que o PCS. Mais recente Protásio (2014) encontrou 18,89 MJ/kg para o bagaço.

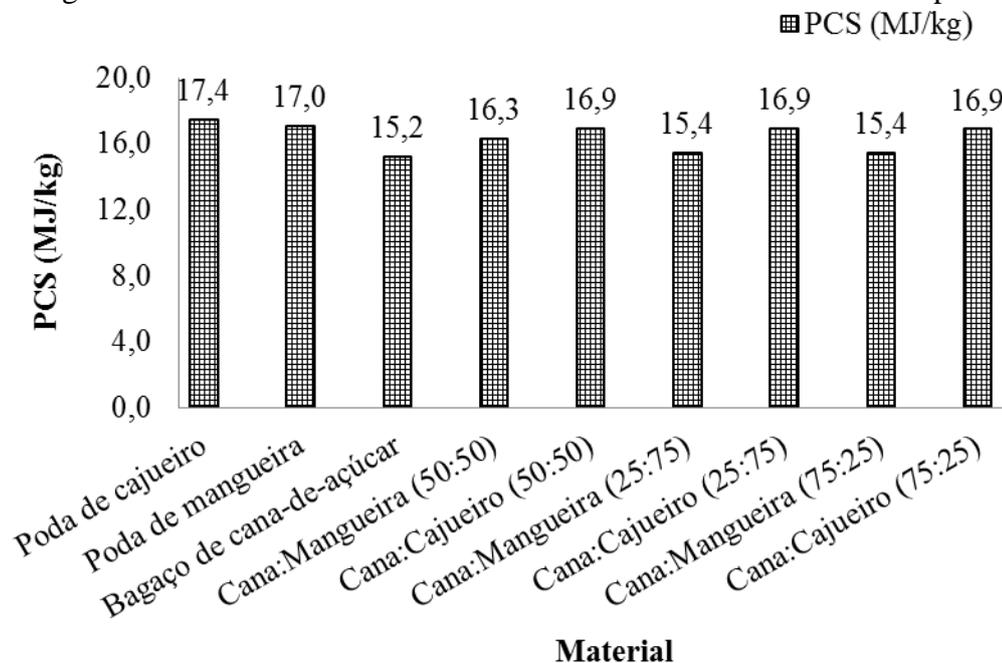
Gonçalves (2010) encontrou o valor de 19,54 MJ/kg de PCI para o briquete de resíduos de madeira. Silva et al. (2015a) aferiu um PCS de 15,63 MJ/kg para o bagaço de cana a 12% de umidade.

Quando se mantém o controle sob a umidade dos resíduos, é possível aproveitar melhor as suas energias, podendo-se alcançar maiores PCS's e/ou PCI's.

Em termos de poderes caloríficos entre as misturas de cana (bagaço) com mangueira, a fração equitativa (50%:50%) apresentou maior valor médio do poder de queima, indicando esta como a melhor fração para a obtenção de calor.

O contraste dos PCS's em relação aos materiais analisados individualmente e na configuração de blendas duplas pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 – Gráfico do PCS dos resíduos individuais e das blendas duplas



Fonte: Próprio autor.

Esses e outros gráficos de barra foram obtidos com o auxílio do Excel. Faz-se necessário compreender que o bagaço de cana isoladamente apresentou um PCS de 15,2 MJ/kg, e, quando misturado aos outros resíduos agrícolas, para todos os casos, houve um ganho de energia, em especial quando misturado à poda de cajueiro, que atingiu os 16,9 MJ/kg, um benefício de aproximadamente 11% ou 1,7 MJ/kg a mais.

Entretanto, identificar a fração mais viável com misturas de bagaço e cajueiro não foi possível apenas com base no poder de queima, pois todas as frações correspondentes apresentaram valores aproximados. Portanto, levando-se também em consideração que o PCS foi analisado para o material em base úmida, faz-se de importância decidir quais briquetes produzir com base em outras propriedades complementares, adquirindo-se assim uma maior confiança na escolha.

Na abordagem da análise imediata, viu-se que entre as blendas duplas, aqueles em que o bagaço de cana apresentava fração de 50% destacaram-se mais vezes, ou seja, em mais de uma propriedade. Considerando, na sequência, a combinação com maior F, maior MV e menor A.

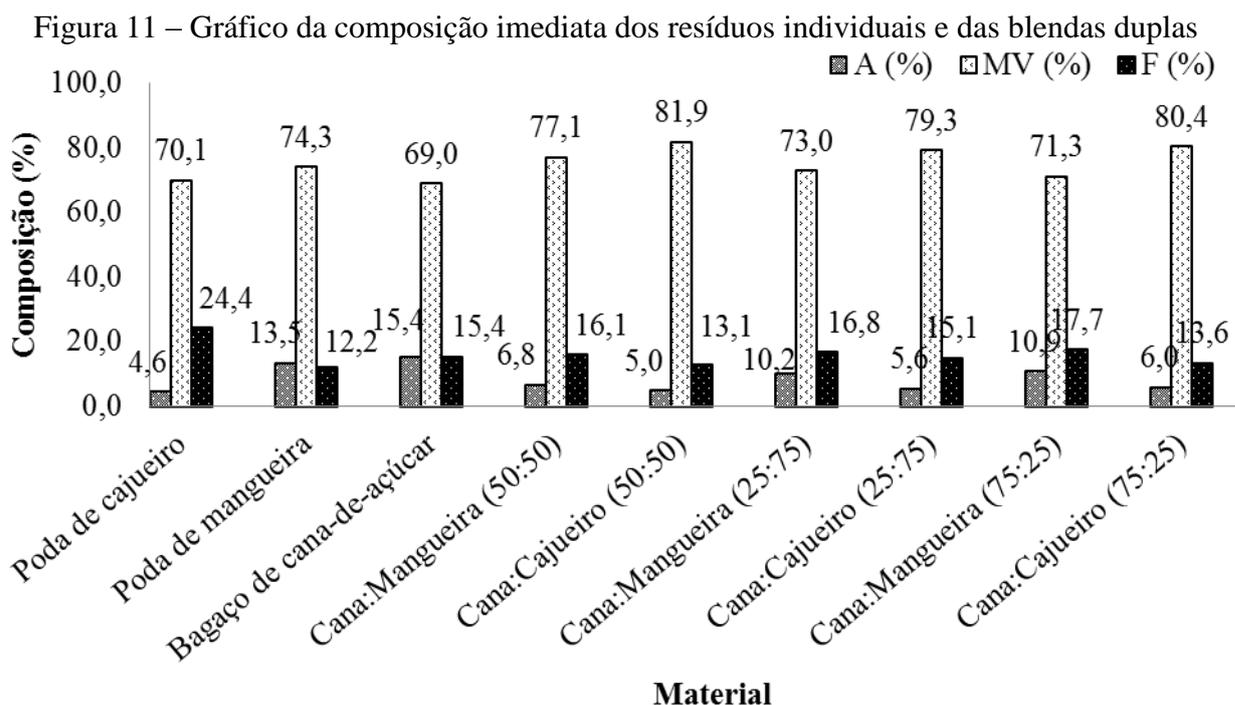
Em termos de composição imediata, pode-se observar na Tabela 8 o que cada blenda dupla apresenta em pontos percentuais.

Tabela 8 – Análise imediata das blendas duplas

Matéria Prima	A (%)		MV (%)		F (%)	
	Duplicatas	Média	Duplicatas	Média	Duplicatas	Média
Cana:Mangueira (50:50)	6,7	6,8	77,5	77,1	15,8	16,1
	6,8		76,8		16,4	
Cana:Cajueiro (50:50)	5,2	5,0	83,1	81,9	11,7	13,1
	4,8		80,7		14,5	
Cana:Mangueira (25:75)	10,6	10,2	72,9	73,0	16,5	16,8
	9,8		73,1		17,2	
Cana:Cajueiro (25:75)	6,1	5,6	79,5	79,3	14,4	15,1
	5,1		79,1		15,8	
Cana:Mangueira (75:25)	10,1	10,9	70,9	71,3	18,9	17,7
	11,8		71,7		16,5	
Cana:Cajueiro (75:25)	6,2	6,0	81,2	80,4	12,7	13,6
	5,8		79,7		14,5	

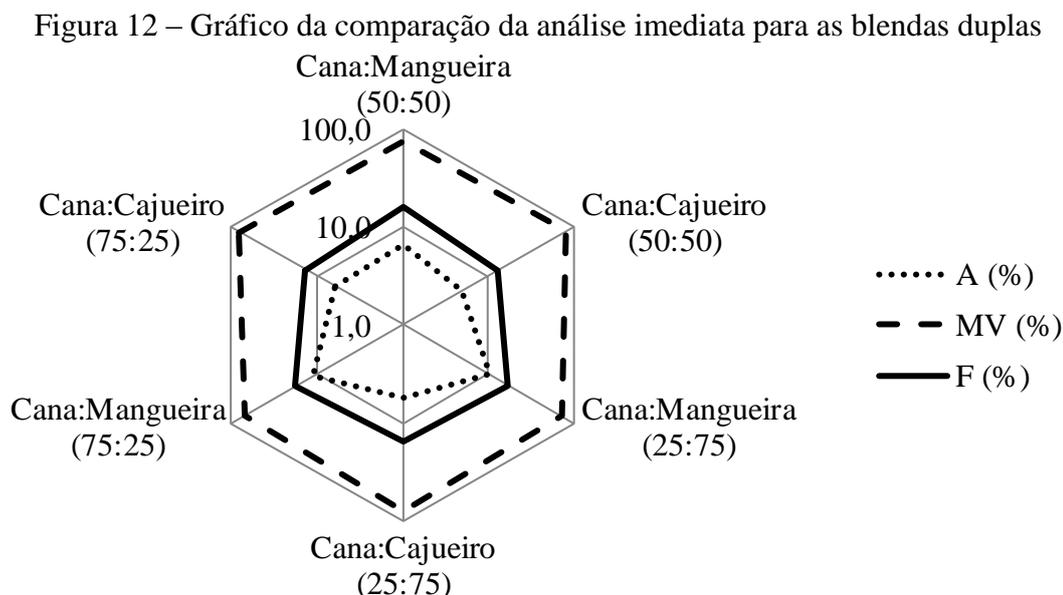
Fonte: Próprio autor.

Abaixo, na Figura 11 obtida com o auxílio do Excel, segue a representação gráfica da análise imediata dos resíduos agrícolas.



Fonte: Próprio autor.

Pelo gráfico de decisão da Figura 12, obtido com o auxílio do Excel, foi possível comparar as composições das blendas duplas em que se torna possível perceber o desempenho das blendas analisadas em relação às suas características da análise imediata, numa escala logarítmica.



Desta forma observou-se que a mistura de bagaço com mangueira foi redundante em cada parâmetro quando se veem que a mais viável foi a que apresentou frações iguais. Infelizmente, para as misturas de bagaço com podas de cajueiros a identificação não foi tão notória, porém foi possível determinar a fração ótima pelas quantidades já apresentadas na Tabela 8.

Em conjunto, os três materiais misturados também foram analisados em termos de PCS e de sua composição imediata, como pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 – PCS das blendas triplas

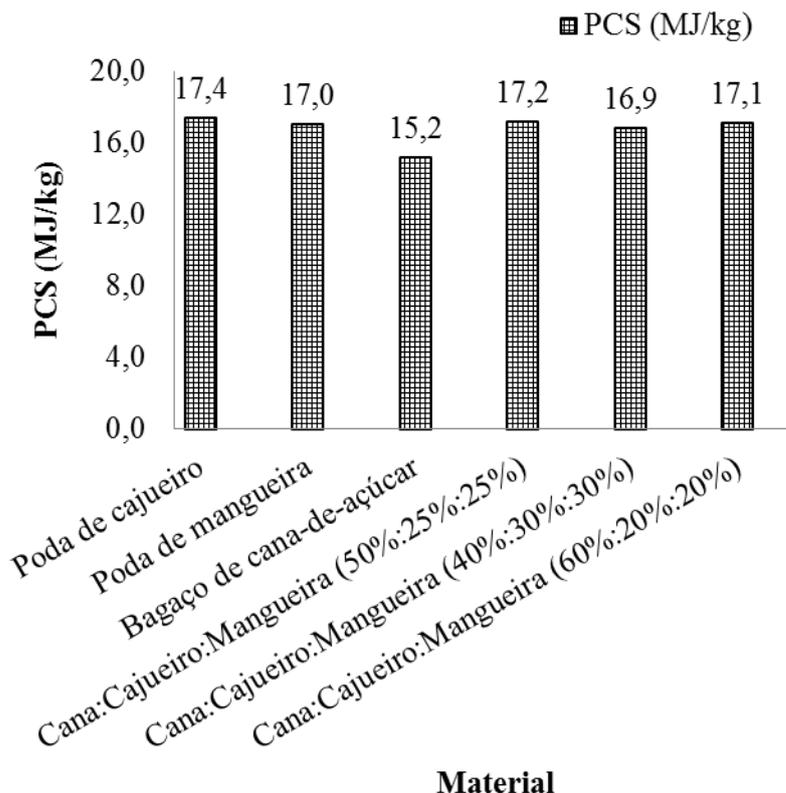
Matéria Prima	PCS (MJ/kg)	
	Duplicatas	Média
Cana:Cajueiro:Mangueira (50%:25%:25%)	17,1 17,3	17,2
Cana:Cajueiro:Mangueira (40%:30%:30%)	16,9 16,9	16,9
Cana:Cajueiro:Mangueira (60%:20%:20%)	17,2 17,1	17,1

Fonte: Próprio autor.

O misto com maior poder de queima, para as blendas triplas, foi o de proporção 50%:25%:25%. Só com este parâmetro seria possível decidir qual melhor proporção para a produção do briquete, mas preferiu-se realizar as mesmas análises que foram feitas para as blendas duplas.

Na Figura 13 observa-se os poderes de queima dos resíduos agrícolas estudados.

Figura 13 – Gráfico do PCS dos resíduos individuais e das blendas triplas



Fonte: Próprio autor.

Combinando-se dois materiais com o bagaço o ganho no poder calorífico foi maior do que misturando este com apenas um dos outros dois resíduos. Atingindo 2,0 MJ/kg a mais para a blenda nas proporções de 50%:25%:25% em relação ao resíduo isolado de bagaço.

Curiosamente, a mistura tripla que apresenta menor conteúdo de bagaço de cana, quantificou um menor valor de PCS. Talvez sejam necessárias mais análises em diferentes proporções, com menores participações de cana para se concluir qualquer influência.

No entanto, assim como para as blendas duplas, em todos os casos de combinação do bagaço com outros resíduos houve aumento de PCS, desta vez, atingindo-se 17,2 MJ/kg, um aumento de 13,0% ou de 2,0 MJ/kg.

Cinzas, materiais voláteis e carbono fixo, referente às blendas triplas, podem ter suas proporções observadas na Tabela 10.

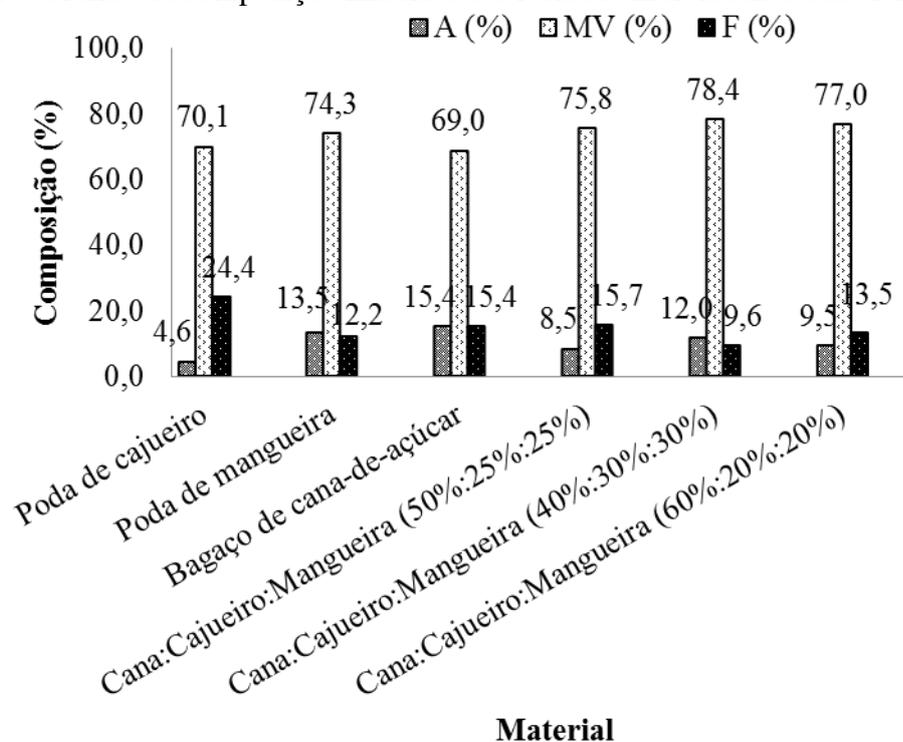
Tabela 10 – Análise imediata das blendas triplas

Matéria Prima	A (%)		MV (%)		F (%)	
	Duplicatas	Média	Duplicatas	Média	Duplicatas	Média
Cana:Cajueiro:Mangueira (50%:25%:25%)	7,5	8,5	75,5	75,8	17,1	15,7
	9,5		76,1		14,4	
Cana:Cajueiro:Mangueira (40%:30%:30%)	12,4	12,0	80,2	78,4	7,4	9,6
	11,5		76,7		11,8	
Cana:Cajueiro:Mangueira (60%:20%:20%)	9,8	9,5	78,0	77,0	12,2	13,5
	9,2		75,9		14,9	

Fonte: Próprio autor.

Novamente pode-se observar que numa proporção menor de cana, a produção de cinzas se sobressai, como foi para o caso da blenda 40%:30%:30%. As outras duas blendas apresentaram também maiores teores de carbono fixo. Essa proporção pode ser visualizada graficamente na Figura 14.

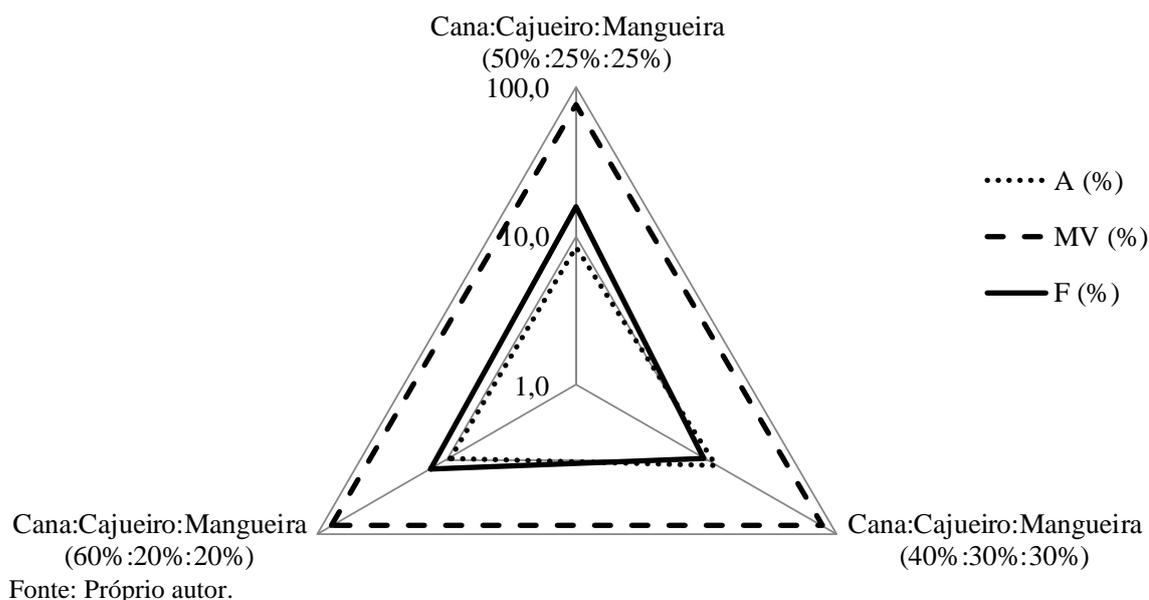
Figura 14 – Gráfico da composição imediata dos resíduos individuais e das blendas triplas



Fonte: Próprio autor.

Da mesma forma, como para as blendas duplas, as triplas nas frações de 50% para o bagaço de cana destacaram-se mais vezes. Todavia, vale a pena observar a Figura 15, na qual se vê o desempenho desse material formado com três resíduos agrícolas diferentes para cada parâmetro estudado na análise imediata.

Figura 15 – Gráfico da comparação da análise imediata para as blendas triplas



Na Tabela 11 segue a análise qualitativa realizada para decisão das melhores misturas a serem densificadas. Novamente, considerando as melhores amostras aquelas com maior (>) PCS, maior teor de F, maior teor de MV e menor (<) quantidade de A.

Tabela 11 – Análise qualitativa das frações das blendas

Blends	Frações (%:%)			
	> PCS	> F	> MV	< A
Cana:Mangueira	(50:50)	(75:25)	(50:50)	(50:50)
Cana:Cajueiro	Todos iguais	(25:75)	(50:50)	(50:50)
Cana:Cajueiro:Mangueira	(50:25:25)	(50:25:25)	(40:30:30)	(50:25:25)

Fonte: Próprio autor.

A análise imediata foi determinante para a definição de qual blenda com cana, mangueira e/ou cajueiro deveria ser escolhido, pois os PCS apresentaram valores significativamente próximos. Foi escolhido para a produção de briquetes aquelas frações que mais se repetiram nas análises com os quatro diferentes parâmetros anteriores: Cana:Mangueira (50%:50%) repetiu-se três vezes; Cana:Cajueiro (50%:50%) repetiu-se três

vezes; e Cana:Cajueiro:Mangueira (50%:25%:25%) também repetiu-se três vezes. A investigação de mais de um parâmetro eliminou qualquer dúvida na escolha final.

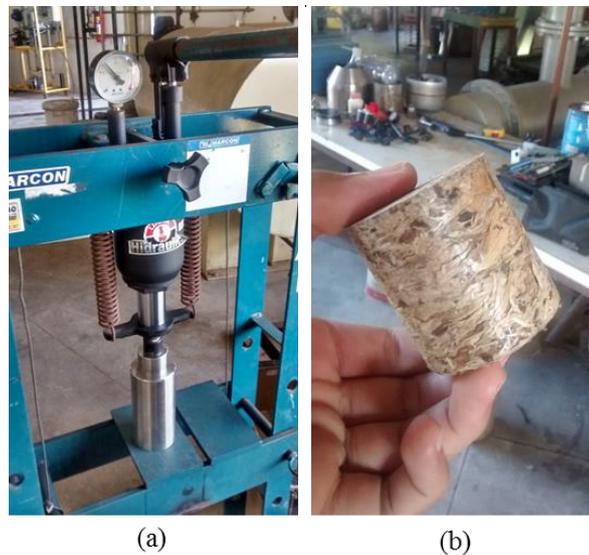
Contudo, vale ressaltar que os três materiais objetos de estudo são resíduos agrícolas, portanto variam conforme condições de ambientes, de cultura agrícola, de condicionamento, de preparo para estudo entre outras, e isso pode indicar que em outras condições poderiam apresentar valores quantitativos e qualitativos distintos.

### 6.3 Briquetes

Os briquetes foram produzidos a partir do bagaço de cana (100%) e das blendas cana:mangueira (50%:50%), cana:cajueiro (50%:50%) e cana:magueira:cajueiro (50%:25%:25%).

A Figura 16 registrou o material sendo compactado e, ao lado direito, um dos briquetes produzido.

Figura 16 – Compactação: (a) Compressão do material. (b) Briquete



Fonte: Próprio autor.

Observou-se que o briquete sofreu dilatação, no entanto não foi possível realizar uma medição padronizada dessa expansão. Todavia, averiguaram-se as dimensões do briquete imediatamente quando o mesmo foi produzido e no dia em que o mesmo passou pelo processo de ensaio mecânico.

A Tabela 12 mostra a dimensões medidas e as calculadas dos briquetes, assim como a sua variação nas dimensões.

Tabela 12 – Dimensões dos briquetes

Corpo de prova	Tempo (dias)	Comprimento (mm)			Diâmetro (mm)		
		inicial	final	expansão	inicial	final	expansão
Briquete de Bagaço de cana-de-açúcar	35	45,40	47,06	4%	50,00	50,30	1%
Briquete de Cana:Mangueira (50:50)	28	55,66	60,00	8%	50,00	50,90	2%
Briquete de Cana:Cajueiro (50:50)	28	51,80	56,18	8%	50,00	52,00	4%
Briquete de Cana:Cajueiro:Mangueira (50%:25%:25%)	7	50,02	56,78	14%	50,00	50,80	2%

Fonte: Próprio autor.

Silva et al. (2015) aferiu expansão longitudinal de 8,10%, para o bagaço de cana a 12% de umidade, massa de 20g (para este trabalho utilizou-se 80g), com o diâmetro de 3,5 cm (para este trabalho utilizou-se 5 cm), com um tempo de vida de 9 dias e, assim como para este trabalho, a força aplicada foi de 500 kgf a 3mm/min.

Ficou evidente que o comprimento do briquete sofreu uma dilatação. Por consequência, houve um aumento do volume final. Um acompanhamento regular da expansão do briquete provavelmente levantaria o tempo em que este combustível alcançaria sua estabilidade física. Os briquetes das blendas duplas, que duraram uma semana a menos e tiveram o mesmo tempo de vida, expandiram juntos 8% no seu comprimento. Curiosamente, o briquete da blenda tripla demonstrou maior expansão em seu comprimento, de 14%. Esta alteração da propriedade física com o tempo deve ser observada pela indústria que deverá armazenar e/ou transportar estes subprodutos empilhados.

Observou-se também que houve dilatação diametral, porém esta, na maioria dos casos, foi bastante inferior quando comparado com a expansão longitudinal. Com exceção do briquete de cana e cajueiro que apresentou maior alteração.

Talvez a aplicação de uma maior força ou a presença de um aglutinante, ou ainda, a aplicação controlada de calor, viabilizasse um briquete que se expandisse menos. Pois, segundo Gonçalves (2010), com base na compactação da madeira que é similar ao material

estudado, não se faz necessária à adição de aglutinantes, pois a lignina presente ao sofrer um aumento de temperatura superior a 100 °C se fluidifica e atua como aglutinante entre as partículas; e cria uma camada que protege o briquete de variações de umidade (GONÇALVES, 2010).

Outrossim, os briquetes produzidos devem adquirir um aumento na densidade de energia, já que o mesmo sofre um aumento de massa específica na compactação. Isso se corroborou com a compactação, pois houve um ganho na densidade do material. A Tabela 13 apresenta a densidade aparente após a transformação física do material em estudo.

Tabela 13 – Variação da Densidade de Energia (DE)

Matéria prima	PCS (MJ/kg)	<i>In natura</i>		Briquete		Variação de DE
		DG (g/cm <sup>3</sup> )	DE <sub><i>in natura</i></sub> (kJ/cm <sup>3</sup> )	DA (g/cm <sup>3</sup> )	DE <sub>briquete</sub> (kJ/cm <sup>3</sup> )	
Bagaço de cana-de-açúcar	15,2	0,08	1,25	0,87	13,22	955%
Cana:Mangueira (50:50)	16,3	0,11	1,79	0,83	13,55	658%
Cana:Cajueiro (50:50)	16,9	0,12	1,97	0,75	12,75	547%
Cana:Cajueiro:Mangueira (50%:25%:25%)	17,2	0,14	2,46	0,71	12,18	396%

Fonte: Próprio autor.

Nos ensaios de Silva et al. (2015) alcançou-se uma densidade aparente de 0,88 g/cm<sup>3</sup> para o bagaço a 12% de umidade, muito próximo à densidade verificada para o briquete de bagaço de cana de 14% de umidade através deste estudo, de 0,87 g/cm<sup>3</sup>. Determinando-se a densidade energética com base na metodologia empregada neste trabalho e nos dados de Silva et al. (2015), este autor alcançou 13,75 kJ/cm<sup>3</sup>, e uma expansão de mais de 1400% também em relação ao material *in natura*.

Como vantagem de se prensar o bagaço de cana, por exemplo, é que se passa de 1,25 para 13,22 kJ/cm<sup>3</sup>, um aumento de 955% e a obtenção de um subproduto mais energético e mais fácil para acondicionar e transportar. Esse resultado mostra a robustez do material transformado, em especial o bagaço.

Não coube a este estudo analisar os outros materiais em sua forma individual transformada, pois o principal objetivo foi analisar o valor agregado ao bagaço de cana-de-açúcar.

Os mistos dos resíduos de cana e mangueira, cana e cajueiro e de cana, mangueira e cajueiro também apresentaram um acúmulo bastante expressivo após a transformação do

material. O exemplo do menor valor de variação de densidade energética verificada, 396% para a blenda tripla o ganho de energia por volume do material é demasiado, pois se aumentou de  $2,46 \text{ kJ/cm}^3$  para  $12,18 \text{ kJ/cm}^3$ .

Nesse sentido, entende-se, também, que ocorrem inviabilidades técnicas no aproveitamento dos resíduos, devidas ao acondicionamento, transportes, localização e outros, sendo que a geração não é centralizada para que se possa aproveitar todo o potencial energético. Estudos específicos em determinadas regiões, porém, podem aumentar a participação da utilização de resíduos de biomassa na matriz energética brasileira.

#### 6.4 Resistência mecânica dos briquetes

Para usos comerciais, os briquetes devem apresentar, relativamente, boas resistência mecânica e resistência ao impacto para que assim possam ser transportados e/ou armazenados sob um limite de esforços físicos.

Observa-se na Figura 17 o ensaio de compressão diametral e um dos corpos de prova após atingir o máximo esforço de ruptura.

Figura 17 – Compressão diametral: (a) Ensaio mecânico. (b) Briquete rompido



Fonte: Próprio autor.

A tensão máxima de ruptura é uma das formas de se avaliar a resistência mecânica do briquete, pois indica a força de aderência entre as partículas do material. Desta forma, quanto maior for o valor encontrado, mais resistente é o combustível sólido.

Este ensaio revelou um comportamento distinto entre os tratamentos estudados. As blindas apresentaram um valor de resistência mecânica relativamente próximas, no entanto o bagaço de cana destacou-se por apresentar um valor maior que as blindas, uma discrepância que provoca desconfiança nos dados. Isso poderia ser solucionado com a realização de vários ensaios para várias amostras e cada configuração.

A Tabela 14 apresenta o resultado do ensaio mecânico de compressão diametral e dos cálculos do número de briquetes que suportam serem empilhados verticalmente e a altura resultante desse empilhamento.

Tabela 14 – Resistência à compressão diametral dos briquetes

<b>Matéria prima</b>	<b>F<sub>Mrup</sub> (N)</b>	<b>Resistência mecânica (MPa)</b>	<b>N<sub>emp</sub></b>	<b>H<sub>emp</sub> (m)</b>
Bagaço de cana-de-açúcar	3800	1,022	1590	74,8
Cana:Mangueira (50:50)	2700	0,563	904	54,3
Cana:Cajueiro (50:50)	2200	0,479	831	46,7
Cana:Cajueiro:Mangueira (50%:25%:25%)	1900	0,419	792	45,0

Fonte: Próprio autor.

O bagaço de cana apresentou a menor expansão longitudinal e ao mesmo tempo a maior resistência mecânica. Todavia, faz-se necessário produzir outros corpos de provas e realizar novas verificações de expansões e outros ensaios mecânicos a fim de dar maior precisão e confiabilidade a este resultado.

A resistência que o bagaço de cana, a 12% de umidade, demonstrou foi de 0,27 Mpa (SILVA et al., 2015), um valor muito distante do aferido e apresentado neste trabalho, indicando a necessidade de se repetir os procedimentos.

Considerando-se o diâmetro e que a força de ruptura relacionada a pressão adquirida pelo briquete na sua compactação, na qual quanto maior se forma um subproduto mais denso e mais resistente, os briquetes produzidos suportam um empilhamento mínimo de 45 m de altura e máximo de até 74,8 m, provavelmente, com briquetes densificados com uma maior pressão, essa altura aumente. Embora não se precise de uma altura tão grande para armazenar e/ou transportar os briquetes, pois os em geral os transportes não suportam tais estruturas, este ganho refletiria na elevação da sua resistência.

## **6.5 Produção científica**

A respeito destes estudos, já se produziram os seguintes manuscritos: resumo simples, resumos expandidos, trabalhos completos, capítulo de livro e artigo internacional, este último está submetido e os demais trabalhos já foram aprovados e publicados em anais de congressos. Essa produção está elencada na tabela do Apêndice B.

Vale destacar o trabalho “Análise comparativa da casca da castanha de caju com e sem LCC para produção sustentável de combustível sólido”, que por sua vez rendeu o título de Honra ao Mérito e a publicação em um capítulo de livro.

## 7 CONCLUSÕES

Os materiais objetos desse estudo foram caracterizados, principalmente, com base nos ensaios para determinação de PCS, umidade, densidades e análise imediata. As quantificações resultantes retrataram quantitativamente as composições que influenciam diretamente no aproveitamento do calor da combustão da biomassa.

O valor intrínseco à composição de cada material agregado com a transformação física por compactação, no contexto do uso de fontes térmicas, apresentou elementos que pode intensificar sua inserção como fonte alternativa e limpa no cenário de diversificação energética. A interação entre biomassas distintas apresentou alguns benefícios, como o aumento do poder calorífico e a redução do teor de cinzas nas blendas duplas, entretanto, sinalizaram variação crescente para o conteúdo de umidade, o que carece de estudos mais aprofundados quanto ao seu controle.

A análise elementar forneceu proporções de teores de carbono condizentes com os poderes caloríficos aferidos. Esta análise também viabiliza a verificação das reações químicas e, em especial, dos produtos de combustão. Embora esse estudo não tenha focado nesse sentido a disposição destas informações dão subsídios para que futuros trabalhos possam realizar essas análises e outras, como a razão entre alguns elementos, bastante comum em algumas literaturas.

A verificação da decomposição do material quando sujeito a elevadas temperaturas, através da análise termogravimétrica, complementou a caracterização da matéria prima e viabilizou a identificação dos principais pontos de temperatura em que se pode extrair mais energia da biomassa. Verificou-se também que o bagaço apresentou uma volatilização concentrada em uma queda intermediária da curva, enquanto que os demais resíduos apresentaram uma degradação mais distribuída.

Caracterizar a composição molecular da biomassa também mostraria o quanto ela possuiria, em percentual, de biomoléculas presentes. Ou seja, celulose, hemicelulose, lignina e extrativos. Aliado ao estudo termogravimétrico seria possível identificar qual a estabilidade térmica da biomassa, especialmente estudando-se a lignina presente.

As blendas mostraram que um parque de usinas térmicas à base de biomassa pode ser alavancado com a inserção de outros resíduos complementares combinado ao bagaço de cana-de-açúcar, pois possuem propriedades bastante similares, na maioria dos casos até melhores para o aproveitamento energético.

Viu-se que a biomassa em estudo seria melhor aproveitada se, prioritariamente, passasse por processos de densificação, ganhando forma homogênea e um significativo armazenamento de energia por volume. Tais subprodutos apresentaram bons índices de resistência à compressão diametral.

Outro ensaio mecânico que acrescentaria aos estudos seria o de friabilidade, pois este informaria o quanto os briquetes suportariam, também em termos percentuais, sujeitos a perturbações (vibrações) mecânicas.

Este trabalho tem um impacto social expressivo, pois converge para o desenvolvimento sustentável permitindo a geração de novos produtos, com reflexo no mercado de trabalho e financeiro, com a valorização de regiões potenciais produtoras agrícolas, em especial o nordeste brasileiro e, ainda, com benefícios para uma matriz energética mais limpa e justa para futuras gerações.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **D3176-15**: Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke. United States: Astm International, 2015. 4 p.
- \_\_\_\_\_. **E1131-08**: Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. United States: Astm International, 2008. 5 p.
- \_\_\_\_\_. **E711-87**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. United States: Astm International, 2004. 8 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CARVÃO MINERAL – ABCM. Brasil. **Carvão Mineral Nacional**. 2000. Disponível em: <<http://www.carvaomineral.com.br>>. Acesso em: 01 dez. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13999**: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - Determinação do resíduo (cinzas) após a incineração a 52 °C. Rio de Janeiro: Abnt, 2003b. 4 p.
- \_\_\_\_\_. **NBR 14929**: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro: Abnt, 2003a. 3 p.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndrico. Rio de Janeiro: Abnt, 2011. 5 p.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8112**: Carvão vegetal – Análise imediata. Rio de Janeiro: Abnt, 1986. 6 p.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8740**: Carvão vegetal - Determinação do índice de quebra e abrasão. Rio de Janeiro: Abnt, 1985. 4 p.
- \_\_\_\_\_. **NBR ISO 2420**: Couro – Ensaio físicos e mecânicos – determinação da densidade aparente. Rio de Janeiro: Abnt, 2015. 3 p.
- \_\_\_\_\_. **NBR ISO 3852**: Minérios de ferro como insumo para alto-forno e redução direta – determinação da densidade a granel. Rio de Janeiro: Abnt, 2009. 6 p.
- BRASIL ESCOLA (Brasil). **Guta-percha**. [20--]. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/odontologia/gutapercha.htm>>. Acesso em: 31 maio 2017.
- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Ministério de Minas e Energia - MME. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. Brasília: MME/EPE, 2015. 467 p. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pdee/forms/epeestudo.aspx>>. Acesso em: 16 jan. 2016.
- BRASIL. Mauricio Tolmasquim. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Plano Nacional de Energia 2030**. 2007. Disponível em: <<http://portal2.tcu.gov.br/portal/pls/portal/docs/2063154.PDF>>. Acesso em: 19 mar. 2015.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO. **Plano Territorial de Desenvolvimento Rural e Sustentável do Território de Cidadania Maciço de Baturité**.

2010. Disponível em: <[http://sit.mda.gov.br/download/ptdrs/ptdrs\\_qua\\_territorio132.pdf](http://sit.mda.gov.br/download/ptdrs/ptdrs_qua_territorio132.pdf)>. Acesso em: 09 jan. 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Governo Federal. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: Mma, 2012. 106 p. Disponível em: <<http://www.sinir.gov.br/>>. Acesso em: 18 jun. 2016.

BRASIL. Paulo Sérgio Vasco. Senado Federal. **Especialistas apontam avanço da energia eólica no Brasil**. 2016. Disponível em: <<http://www12.senado.leg.br/noticias/noticias/materias/2016/08/22/especialistas-apontam-avanco-da-energia-eolica-no-brasil>>. Acesso em: 22 ago. 2016.

BRASÍLIA. Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel. Ministério de Minas e Energia. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. 2008. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 19 jun. 2015.

BRASÍLIA. Departamento de Monitoramento do Sistema Elétrico. Ministério de Minas e Energia. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro – Março – 2015**. 2015. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: 16 jun. 2015.

\_\_\_\_\_. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro – Março – 2016**. 2016a. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: 21 ago. 2016.

\_\_\_\_\_. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro – Junho – 2016**. 2016b. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: 21 ago. 2016.

BRASKEM. **Boletim técnico 08 PVC**: glossário de termos aplicados a polímeros. [s. L.]: Braskem, 2002. 9 p. Disponível em: <<https://www.braskem.com.br/>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

BRAUNBECK, Oscar A.; CORTEZ, Luís A. B. O cultivo da cana-de-açúcar e o uso dos resíduos. In: ROSILLA-CALLE, Frank; BAJAY, Sergio V.; ROTHMAN, Harry (Org.). **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Campinas, Sp: Unicamp, 2005. Cap. 5. p. 215-246.

BRITO, José O. et al. **Estimativa da densidade a granel do carvão vegetal a partir de sua densidade aparente**. Piracicaba, Sp: Ipef, 1982. 6 p. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr150.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2016.

CEARÁ. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (Ipece). Secretaria do Planejamento e Gestão do Estado do Ceará (Seplag). **PERFIL BÁSICO REGIONAL 2012: MACRORREGIÃO DE BATURITÉ**. Fortaleza: Ipece, 2012. 15 p. Disponível em: <<http://www.ipece.ce.gov.br/categoria5/perfil-basico-regional>>. Acesso em: 10 jan. 2014.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. (Organizadores) **Biomassa para energia**. 3. ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

DENARI, Gabriela Bueno. **Princípios e aplicações de análise térmica**. São Carlos: Iqsc, 2012. 40 p. Disponível em: <[www.teses.usp.br/](http://www.teses.usp.br/)>. Acesso em: 08 abr. 2017.

DIAS, José Manuel Cabral de Sousa et al. (Ed.). **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília, Df: Embrapa Agroenergia, 2012. 130 p. Disponível em: <<https://www.embrapa.br>>. Acesso em: 31 maio 2017.

EASTERLY, J.L., BURNHAM, M. OVERVIEW OF BIOMASS AND WASTE FUEL RESOURCES FOR POWER PRODUCTION. **Biomass Bioenerg**, v. 10, p.79-92, 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Brasil. **Sistemas de Produção**. 2012. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/>>. Acesso em: 30 jan. 2014.

FRAZA, Carlos. **Densificação da Madeira**. 2008. Disponível em: <[http://www.inee.org.br/downloads/biomassa/Carlos Fraza Maden 2008.pdf](http://www.inee.org.br/downloads/biomassa/Carlos_Fraza_Maden_2008.pdf)>. Acesso em: 25 nov. 2015.

FURTADO, Thielly Schmidt et al. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Pesq. Flor. Bras.**, [s.l.], v. 30, n. 62, p.101-106, 28 out. 2010. Embrapa Florestas. <http://dx.doi.org/10.4336/2010.pfb.30.62.101>.

GONÇALVES, José Evaristo. **Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *eucalyptus grandis***. 2010. 119 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Unesp, Botucatu, 2010. Disponível em: <<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br>>. Acesso em: 25 jun. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão - MP. **Produção Agrícola Municipal: Culturas Temporárias e Permanentes**. 2013. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 05 maio 2015.

\_\_\_\_\_. **Censo Agropecuário 2006**. 2006. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 30 janeiro 2014.

\_\_\_\_\_. **Produção agrícola municipal - lavoura permanente - 2012**. 2012. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br>>. Acesso em: 25 jun. 2014.

IONASHIRO, Massao. Introdução. In: IONASHIRO, Massao. **Giolito: Fundamentos da Termogravimetria Análise Térmica Diferencial Calorimetria Exploratória Diferencial**. Araraquara, Sp: Giz Editorial, 2004. Cap. 1. p. 6-9. Disponível em: <<http://www.uel.br/proppg>>. Acesso em: 30 jan. 2016.

MCKENDRY, P. ENERGY PRODUCTION FROM BIOMASS (PART 1): overview of biomass. **Bioresource Technol**, v. 83, p. 37-46, 2002.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Estatísticas**. 2012. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/estatisticas>>. Acesso em: 19 jun. 2014.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; LORA, Electo Eduardo Silva. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

OCDE-FAO (Brasil). Representação da Fao no Brasil. **Perspectivas Agrícolas no Brasil: desafios da agricultura brasileira 2015-2024**. Brasília: Ocde-fao, 2015. Tradução livre. Disponível em: <<http://www.fao.org.br/download/PA20142015CB.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2016.

OLIVEIRA JÚNIOR, Evônio Marques de. **Produção de briquetes com resíduos de vegetais de jardinagem e podas em condomínios residenciais**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sustentabilidade na Gestão Ambiental, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2013.

PANWAR, N.L., KOTHARI, R., TYAGI, V.V. THERMOCHEMICAL CONVERSION OF BIOMASS – ECO FRIENDLY ENERGY ROUTES. **Renew Sustain Energy Rev**, v. 16, p. 1801-1816, 2012.

PEREIRA, Cristiane Ansbach; SCHNITZLER, Egon; CARVALHO FILHO, Marco Aurélio da Silva. ESTUDO TERMOANALITICO (TG, DTG E DSC) DOS CAFÉS IN NATURA E PROCESSADOS. **Publicatio Uepg: Ciências Exatas e da Terra, Ciências Agrárias e Engenharias**, Ponta Grossa, Pr, v. 11, n. 1, p.61-66, 28 mar. 2005. Disponível em: <<http://www.revistas2.uepg.br>>. Acesso em: 30 jan. 2015.

PEREIRA, Flávia Alves et al. Propriedades físico-químicas de briquetes aglutinados com adesivo de silicato de sódio. **Floresta e Ambiente**. [s. L.], p. 23-29. abr. 2008. Disponível em: <<http://www.floram.org/files/v16n1/v16n1a3.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2017.

PROTÁSIO, Thiago de Paula. **Biomassa residual do coco babaçu: potencial de uso bioenergético nas regiões norte e nordeste do Brasil**. 2014. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Mg, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.ufla.br/handle/1/2432>>. Acesso em: 08 dez. 2015.

ROSA, André Pereira. **Avaliação da viabilidade técnica e ambiental do uso do conteúdo ruminal bovino como biocombustível**. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia da Ufmg, Ufmg, Belo Horizonte, Mg, 2009. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br>>. Acesso em: 21 ago. 2016.

RUSCHEL, Carla Felippi Chiella et al. EXPLORATORY ANALYSIS APPLIED TO ATTENUATED TOTAL REFLECTANCE FOURIER TRANSFORM INFRARED (ATR-FTIR) OF BIODIESEL/DIESEL BLENDS. **Química Nova**, [s.l.], v. 37, n. 5, p.810-815, 2014. GN1 Genesis Network. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140130>. Disponível em: <<http://quimicanova.s bq.org.br/imagebank/pdf/v37n5a09.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

SANTAELLA, Sandra Tédde et al. **Resíduos Sólidos e a Atual Política Ambiental Brasileira**. Fortaleza: Ufc, 2014. 232 p.

SAXENA, R.C., ASHIKARI, D.K., GOVAL, H.B. BIOMASS-BASED ENERGY FUEL THROUGH BIOCHEMICAL ROUTES:AREVIEW. **Renew Sustain Energy Rev**, v. 13, p. 167-178, 2009.

SILVA, Diego Aleixo et al. **CARACTERIZAÇÃO DE BIOMASSAS PARA A BRIQUETAGEM.** *Floresta*, [s.l.], v. 45, n. 4, p.713-722, 9 set. 2015a. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.v45i4.39700>. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/39700>>. Acesso em: 28 jul. 2016.

SILVA, P. P. da et al. **PROPRIEDADES TÉRMICAS E FÍSICO-QUÍMICAS DE BLENDS DE BANHA SUÍNA E ÓLEO DE FARELO DE ARROZ OBTIDAS POR INTERESTERIFICAÇÃO QUÍMICA.** *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica - Cobeq Ic 2015*, [s.l.], v. 1, n. 3, p. 1662-1667, jun. 2015b. São Paulo: Blucher, 2015. ISSN 2359-1757, DOI 10.5151/chemeng-cobeqic2015-449-34071-261853. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

SOARES, L. C. S. R. **Destoxificação biológica do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar para utilização em processos fermentativos.** 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial na Área de Microbiologia Aplicada) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Lorena, 2012. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br>>. Acesso em: 19 dez. 2016.

SOUZA, Marcos Rogério de. **Blenda de poli (tereftalato de etileno) com polietileno de baixa densidade.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. doi:10.11606/D.3.2007.tde-03062008-173546. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

STANISLAV, V., VASSILEV, D.B., ANDERSEN, L.K., VASSILEVA, C.G. **An overview of the chemical composition of biomass Fuel**, 2010. v. 89, p. 913-933.

STRAPASSON, Alexandre Betinardi. **A Energia Térmica e o Paradoxo da Eficiência Energética: Desafios para um Novo Modelo de Planejamento Energético.** 2004. Dissertação (Mestrado em Energia) - Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. doi:10.11606/D.86.2004.tde-25092005-155030. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/>>. Acesso em: 14 dez. 2016.

TÔRRES FILHO, Artur. **Viabilidade técnica e ambiental da utilização de resíduos de madeira para produção de um combustível alternativo.** 2005. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Ufmg, Belo Horizonte, Mg, 2005. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br>>. Acesso em: 22 ago. 2016.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR – UNICA. **Sustentabilidade: a sustentabilidade no setor sucroenergético brasileiro.** São Paulo, SP: Única, [2015]. Disponível em: <http://www.unica.com.br/sustentabilidade/>>. Acesso em 16 jan. 2016.

VARELLA, Marcelo Dias. O surgimento e a evolução do direito internacional do meio ambiente: da proteção da natureza ao desenvolvimento sustentável. In: VARELLA, Marcelo D.; BARROS-PLATIAU, Ana Flavia (Org.). **Proteção internacional do meio ambiente.** 4. ed. Brasília: Unitar, Uniceub e Unb, 2009. Cap. 1. p. 7-25. Disponível em: [http://marcelodvarella.org/Meio\\_Ambiente\\_files/Protecao\\_internacional\\_meio\\_ambiente\\_2.pdf](http://marcelodvarella.org/Meio_Ambiente_files/Protecao_internacional_meio_ambiente_2.pdf)>. Acesso em: 21 jun. 2016.

**APÊNDICE A – Características Ambientais e Culturais de cada Biomassa**

<b>Vegetação</b>	<b>Tipo de Clima</b>	<b>Período de plantação</b>	<b>Colheita/Safra</b>	<b>Produção de Resíduo</b>	<b>Área plantada (mil ha)</b>	<b>PH do solo (mais indicados)</b>
Cajueiro ( <i>Anacardium occidentale L.</i> )	Tropical	Início da estação chuvosa*	Permanente	Principalmente logo no início e pós colheita	709 **	4,5 a 6,5
Mangueira ( <i>Mangifera indica L.</i> )	Tropical e Subtropical	Início da estação chuvosa*	Permanente	Permanente	71 **	5,5 a 6,8
Cana-de-açúcar ( <i>Saccharum officinarum L.</i> )	Tropical ou Subtropical	Entre janeiro e março	Temporária (abril-novembro / região nordeste)	Permanente (na safra)	10223 **	4,0 a 8,5

Fonte: (EMBRAPA, 2012; IBGE, 2013; IBGE, 2006; MMA, 2005).

\*Em condições de sequeiro, sem irrigação, o plantio deverá ocorrer no início das chuvas, para garantir o desenvolvimento inicial das plantas em período com maior disponibilidade de água (EMBRAPA, 2012);

\*\*Área plantada ou destinada à colheita - Brasil (IBGE, 2013).

### APÊNDICE B – Produções Científicas

<b>Título do Manuscrito</b>	<b>Congresso</b>
Determinação do teor de umidade de um resíduo agroindustrial para produção de briquetes	71ª SOEA / CONTECC 2014
Avaliação da umidade do resíduo da bananicultura do Maciço de Baturité para produção de briquetes	I SEMANA ACADÊMICA UNILAB - 2014
Estudos termogravimétricos de resíduos agroindustriais para produção de briquetes.	XX ENCONTRO UNIFOR - 2014
Estudo do poder calorífico inferior de um resíduo agroindustrial da cajucultura	67ª SBPC 2015
Determinação do poder calorífico de “Blends” da poda do cajueiro ( <i>Anacardium occidentale</i> ) e da poda da mangueira ( <i>Mangifera</i> )	67ª SBPC 2015
Caracterização de resíduos agroindustriais com potencial aplicabilidade em termelétricas	72ª SOEA / CONTECC 2015
Caracterização de um blend de rejeitos agroindustriais para fins de produção de energia	72ª SOEA / CONTECC 2015
Casca da castanha de caju sem a presença de LCC para possíveis aplicações energéticas	72ª SOEA / CONTECC 2015
Análise comparativa da casca da castanha de caju com e sem LCC para produção sustentável de combustível sólido	72ª SOEA / CONTECC 2015 (HONRA AO MÉRITO)
Assessment of the Energy Potential of Biomass Waste from the Hinterland of Ceará, Brazil.	Journal of Thermal Analysis and Calorimetry (JTAC) - 2015
Análise do material residual agrícola de maior contribuição energética em um blend	XXI COBEQ - 2016
Avaliação da casca da castanha de caju para produção de briquetes	SBPC - 2016
Análise comparativa da casca da castanha de caju com e sem lcc para produção sustentável de combustível sólido	72ª SOEA / CONTECC 2015

Fonte: Próprio autor.