

**BIANCA GOULART DE OLIVEIRA MAIA**

**VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA BANANICULTURA E DA  
RIZICULTURA NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES**

**JOINVILLE - SC**

**2013**

**BIANCA GOULART DE OLIVEIRA MAIA**

**VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA BANANICULTURA E DA  
RIZICULTURA NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES**

Dissertação apresentada para obtenção  
do título de mestre em Engenharia de  
Processos na Universidade da Região de  
Joinville - UNIVILLE.

Orientadora: Dra. Noeli Sellin

Co-orientadora: Dra. Therezinha M. N. de  
Oliveira

**JOINVILLE - SC**

**2013**

## Catalogação na publicação pela Biblioteca Universitária da Univille

M217v	<p>Maia, Bianca Goulart de Oliveira Valorização de resíduos da bananicultura e da ricultura na produção de briquetes / Bianca Goulart de Oliveira Maia ; orientadora Dra Noeli Sellin – Joinville: UNIVILLE, 2013.</p> <p>91 f. : il. ; 30 cm</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos – Universidade da Região de Joinville)</p> <p>1. Cultura de arroz. 2. Cultura da banana. 3. Biomassa. 4. Resíduos agrícolas e agroindustriais. 5. Produção de briquetes. I. Sellin, Noeli. (orient.). II. Título.</p> <p>CDD 628.4</p>
-------	--

## Termo de Aprovação

“Valorização de resíduos da bananicultura e da rizicultura na produção de briquetes”

por

Bianca Goulart de Oliveira

Dissertação julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos, área de concentração Engenharia de Processos e Tecnologias Limpas e aprovada em sua forma final pelo Programa de Mestrado em Engenharia de Processos.



Prof. Dra. Noeli Sellin  
Orientadora (UNIVILLE)



Prof. Dra. Therezinha Maria Novais de Oliveira  
Co-Orientadora (UNIVILLE)

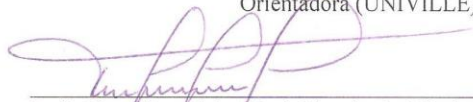


Prof. Dra. Ana Paula Testa Pezzin  
Coordenadora do Programa de Mestrado em Engenharia de Processos (UNIVILLE)

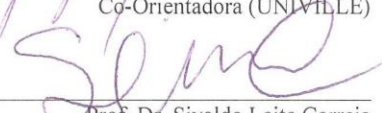
Banca Examinadora:



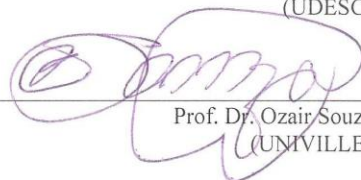
Prof. Dra. Noeli Sellin  
Orientadora (UNIVILLE)



Prof. Dra. Therezinha Maria Novais de Oliveira  
Co-Orientadora (UNIVILLE)



Prof. Dr. Sivaldo Leite Correia  
(UDESC)



Prof. Dr. Ozair Souza  
(UNIVILLE)

Joinville, 28 de fevereiro de 2013.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu amor, amigo e companheiro, Bruno, que sempre me amparou e me incentivou, muitas vezes de uma maneira que eu não entendia. Essa vitória é nossa!

Aos meus Pais, Sônia e Pedro, e à minha *sister*, Karine, pelo amor incondicional e por sempre acreditarem em mim.

Aos meus queridos avós Vô Nico e Vó Iraídes, Vó Aparecida e Vô Adherbal (*in memorium*), serão sempre os meus amores.

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.”*

*Albert Einstein.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, que onde quer que esteja deve sempre estar me guiando e iluminando o meu caminho.

À minha orientadora Prof.<sup>a</sup>. Dra. Noeli Sellin, pela paciência e amizade, pela orientação e ensinamentos e por acreditar em mim. Será sempre lembrada!

À minha co-orientadora Prof.<sup>a</sup>. Therezinha M. Novais de Oliveira, pelos “toques” e valiosas contribuições. Estou seguindo seus passos.

Aos bolsistas, Mariana, Yan e Fernanda, e ao colega Diego, pelo valioso auxílio em noites e finais de semana nos laboratórios.

À empresa TECNOBRIQ pelo apoio na produção dos briquetes e à empresa Arroz Vila Nova por ceder as amostras de casca de arroz.

À Prof.<sup>a</sup>. Sandra Medeiros pelo auxílio na parte final do trabalho.

À UNIVILLE, ao corpo docente do Mestrado em Engenharia de Processos, pelo conhecimento e amizade adquiridos durante o curso, e aos funcionários que sempre estiveram disponíveis e acessíveis.

À equipe e aos colegas do Comitê de gerenciamentos das bacias hidrográficas dos rios Cubatão e Cachoeira – CCJ, pela amizade e compreensão nos momentos em que precisei estar ausente.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

À Universidade Federal de Santa Catarina, em especial aos departamentos de Eng. Mecânica e Eng. de Materiais, pelas análises fundamentais a realização deste trabalho.

À toda a minha família, sogros, tios e primos queridos que estão sempre presentes e me contagiam com sua alegria.

À Princesa, Menina, Belinha e ao Tico, por me amarem exatamente do jeito que sou.

A todas as pessoas que de uma forma direta ou indireta contribuíram para realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	10
LISTA DE TABELAS.....	12
RESUMO .....	13
ABSTRACT.....	14
INTRODUÇÃO.....	15
1 OBJETIVOS.....	17
1.1 Objetivo geral .....	17
1.2 Objetivos específicos.....	17
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1 Biomassa.....	18
2.1.1 Biomassa como fonte de energia .....	18
2.1.2 Propriedades físicas, químicas e térmicas da biomassa .....	23
2.2 Setor agrícola e agroindustrial.....	29
2.2.1 Cultura do arroz.....	29
2.2.2 Cultura da banana .....	31
2.3 Resíduos agrícolas e agroindustriais.....	32
2.3.1 Resíduos da rizicultura .....	35
2.3.2 Resíduos da bananicultura.....	36
2.4 Processo de briquetagem.....	38
2.4.1 Características dos briquetes .....	40
2.4.2 Tecnologias de compactação .....	41

	8
2.4.3 Estudos sobre briquetagem.....	42
3 METODOLOGIA .....	44
3.1 Materiais.....	44
3.1.1 Casca de arroz .....	45
3.1.2 Folha de bananeira.....	45
3.1.3 Pseudocaule da bananeira.....	46
3.2 Preparação dos resíduos para o processo de briquetagem .....	46
3.2.1 Casca de arroz .....	46
3.2.2 Folha de bananeira.....	46
3.2.3 Pseudocaule de bananeira.....	48
3.2.4 Produção dos briquetes.....	49
3.3 Caracterização dos resíduos e dos briquetes .....	51
3.3.1 Análise aproximada .....	51
3.3.2 Análise química elementar .....	53
3.3.3 Poder Calorífico.....	53
3.3.4 Avaliação do comportamento térmico dos resíduos e dos briquetes.....	54
3.4 Avaliação das densidades aparente e energética dos resíduos e dos briquetes .....	54
3.5 Avaliação do comportamento mecânico dos briquetes .....	54
3.6 Estudo da combustão dos briquetes .....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	57
4.1 Secagem dos resíduos de pseudocaule.....	57
4.2 Análises químicas aproximada e elementar .....	60



	9
4.2.1 Resíduos .....	61
4.2.2 Briquetes .....	64
4.3 Avaliação do comportamento térmico .....	67
4.3.1 Resíduos de folha e pseudocaule de bananeira e casca de arroz .....	67
4.3.2 Briquetes .....	70
4.4 Avaliação do poder calorífico e densidade energética .....	72
4.5 Avaliação das propriedades mecânicas .....	75
4.6 Avaliação da combustão dos briquetes .....	77
CONCLUSÃO .....	81
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	84
ANEXO I .....	92

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos de conversão da biomassa em energia. ....	20
Figura 2 – Curva de decomposição térmica de um material.....	27
Figura 3 - Curva típica de uma Análise Térmica Diferencial - ATD.....	28
Figura 4 - Concentração da produção de arroz em Santa Catarina .....	30
Figura 5 - Concentração da produção de bananas em Santa Catarina.....	32
Figura 6 - Partes da bananeira <i>Musa sp.</i> .....	36
Figura 7 - Briquetes produzidos a partir de biomassa. ....	38
Figura 8 - Principais etapas desenvolvidas.....	44
Figura 9 - Amostra de casca de arroz utilizada.....	45
Figura 10 - Folha de bananeira <i>in natura</i> .....	45
Figura 11 – Amostras de pseudocaule. ....	46
Figura 12 – Triturador forrageiro.....	47
Figura 13 - Folhas ressecadas <i>in natura</i> após trituração.....	47
Figura 14 - Amostras de pseudocaule após sofrer prensagem. ....	48
Figura 15 - Disposição das amostras de pseudocaule no secador (a) e amostras de pseudocaule após secagem (b).....	49
Figura 16 – Etapas do processo de briquetagem. ....	50
Figura 17 - Fluxograma geral das análises realizadas nas amostras de casca de arroz, folha e pseudocaule de bananeira e nos briquetes produzidos. ....	51
Figura 18 – Posicionamento dos briquetes sobre a grelha.....	55
Figura 19 - Equipamento utilizado (a) e medições dos gases durante a combustão dos briquetes (b).....	56
Figura 20 - Variação do teor de umidade do pseudocaule da bananeira em função do tempo de secagem em secador de leito fixo com circulação de ar a 50°C (a), 60°C (b) e 70°C (c).....	57

Figura 21 - Velocidade de secagem em função da variação do teor de umidade (U) do pseudocaule da bananeira: a) 50 °C, b) 60 °C, c) 70 °C.....	59
Figura 22 - Teor de umidade (U), sólidos totais (ST), cinzas, sólidos voláteis (SV) e carbono fixo (CF) dos resíduos secos folha e pseudocaule de bananeira e casca de arroz in natura.....	61
Figura 23 - Teor de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S) dos resíduos secos folha e pseudocaule de bananeira e casca de arroz in natura. .	63
Figura 24 - Teor de umidade (U), sólidos totais (ST), cinzas, sólidos voláteis (SV) e carbono fixo (CF) dos briquetes produzidos.....	64
Figura 25 - Teor de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S) dos resíduos secos folha e pseudocaule de bananeira e casca de arroz in natura. .	66
Figura 26 - ATG e ATD das amostras de folha de bananeira. ....	67
Figura 27 - ATG e ATD das amostras de pseudocaule de bananeira .....	68
Figura 28 - ATG e ATD das amostras de casca de arroz <i>in natura</i> . ....	68
Figura 29 - ATG e ATD das amostras de briquetes de folha de bananeira. ...	70
Figura 30 - ATG e ATD das amostras de briquetes de folha de bananeira. ...	70
Figura 31 - ATG e ATD das amostras de briquetes de pseudocaule de bananeira. ....	71
Figura 32 - ATG e ATD das amostras de briquetes de casca de arroz.....	71
Figura 33 - Amostras de briquetes de casca de arroz após 15 min de queima. ....	77
Figura 34 - Amostras de briquetes de folha (a) e pseudocaule (b) após 15 min de queima.....	77
Figura 35 - Concentrações de CO <sub>2</sub> (a) e CO (b), liberados durante a combustão dos briquetes. ....	78
Figura 36 - Emissões de NO <sub>x</sub> e SO <sub>2</sub> durante a queima dos briquetes. ....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Biomassas estudadas e suas tecnologias de processamento. ....	22
Tabela 2 - Geração de resíduos agrícolas no Brasil. ....	34
Tabela 3 – Comparação entre poder calorífico das amostras estudadas com a literatura. ....	73
Tabela 4 - Densidade aparente e energética dos resíduos e dos briquetes. ...	73
Tabela 5 - Norma Sueca SS 18 71 21 para especificações de briquetes de madeira. ....	75
Tabela 6 – Resistência mecânica e densidade aparente dos briquetes. ....	76

## RESUMO

A utilização de resíduos agrícolas e agroindustriais como biomassa combustível para geração de energia na forma de briquetes pode ser uma solução alternativa para os problemas relacionados à sua disposição. A região de Joinville apresenta grande vocação agrícola, com destaque para a produção de banana e arroz. Visando valorização dos resíduos gerados nestas culturas, neste trabalho, foram produzidos briquetes de folhas e pseudocaule de bananeira e de casca de arroz em briquetadeira hidráulica com pressão de compactação de 18 MPa e dois tempos diferentes de compactação. Os resíduos e os briquetes foram caracterizados por análises químicas, poder calorífico, comportamento térmico por análise termogravimétrica (ATG) e análise térmica diferencial (ATD) e densidade aparente. Também foram avaliadas a resistência mecânica, a densidade energética e a combustibilidade dos briquetes. Os resíduos apresentaram altos teores de materiais voláteis e carbono, e umidade adequada para briquetagem, entre 8 e 15%. Sob combustão, os resíduos e os briquetes apresentaram liberação de energia máxima em torno de 580 °C e 350 °C, respectivamente. A casca de arroz e o seu briquete apresentaram menor liberação de energia que os demais resíduos. O poder calorífico superior (PCS) dos resíduos foi em torno de 15 a 17 MJ/kg. Após a briquetagem, houve aumento do PCS para a casca de arroz, enquanto que para os resíduos da bananicultura, os valores variaram pouco. Os briquetes de casca de arroz apresentaram os maiores valores de resistência à compressão mecânica para os dois tempos compactação, de aproximadamente 19 MPa. Para os briquetes de folha e pseudocaule, os maiores valores, de 5,3 e 15 MPa, respectivamente, foram observados para 1 segundo de compactação. Dentre os três resíduos estudados, as folhas de bananeira foram as que apresentaram maior potencial para serem empregadas na geração de energia na forma de briquetes. No entanto, os demais resíduos devem ser melhor avaliados, pois tiveram propriedades semelhantes às de outros resíduos lignocelulósicos usados na produção de briquetes.

Palavras-chave: biomassa, casca de arroz, resíduos da bananicultura, briquete.

## ABSTRACT

The vegetal biomass is being increasingly used as an alternative to fossil fuels in power generation. The use of agricultural and agro industrial waste as biomass fuel for power generation like a briquettes, can be an alternative solution to the problems related to their disposal. The northern region of the Santa Catarina State in Brazil, Joinville city, presents a significant production of bananas and rice. In this work, banana leaves and pseudostem, and rice husk were used and characterized to produce briquettes which can be used as fuel. The briquettes were produced in a briquette hydraulic press with compaction pressure of 18 MPa and two different compression times. Samples of wastes and briquettes were characterized by chemical analysis, thermogravimetric analysis, and differential thermal analysis, heating value, density, and also, the briquettes were then subjected to mechanical tests. Samples of the wastes presented high content of volatile matter and carbon. The moisture found for the residues are in the optimal range of 8 to 15 %, needed to be made into briquettes. Under combustion wastes and the briquettes showed maximum energy release at around 580 °C and 350 °C respectively. Rice husk and briquette presented less energy than other wastes. The highest heating value (HHV) of waste was around 15-17 MJ / kg. After briquetting, the HHV increased to rice husk, while for banana wastes, values varied slightly. The rice husk briquettes showed higher resistance to mechanical compression for two times compression (approximately 19 MPa). For leaf and pseudostem briquettes, the highest values of 5.3 and 15 MPa, respectively, were observed for 1 second compression. Among the studied wastes, banana leaves showed the greatest potential to be used in generating energy in the form of briquettes. However, the other wastes could be better due to they had properties similar to those of other lignocellulosic residues used in the production of briquettes.

Keywords: biomass, rice husk, banana waste, briquette.

## INTRODUÇÃO

A atual crise energética tornou-se uma séria ameaça para a sustentabilidade do planeta, principalmente para os países em desenvolvimento nas últimas décadas. Os combustíveis fósseis foram a principal fonte de energia, desde o momento em que as primeiras tecnologias apareceram na vida da humanidade. No entanto, a redução das reservas de combustível fóssil, bem como impactos ambientais significativos, imputados por este combustível ao ecossistema, leva cada vez mais governos, autoridades e meio científico a se concentrarem em fontes de energia renováveis (MEKHILEF *et al.*, 2011).

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos, e é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis. Dela é possível se obter energia elétrica e biocombustíveis, tais como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição a derivados de petróleo como o óleo diesel e a gasolina (ANEEL, 2005). A biomassa necessária para produção de energia pode ser facilmente obtida a partir da produção agrícola e agroindustrial nacional, que geram uma grande quantidade de resíduos que muitas vezes acarreta no comprometimento dos recursos naturais dada a sua composição e acelerado processo de decomposição.

Os resíduos agroindustriais são gerados após o processamento e beneficiamento de algumas culturas, já os resíduos agrícolas são os resíduos vegetais, que são produzidos no próprio campo no momento da colheita dos produtos. Os países com o cultivo agrícola ativo e em grandes dimensões cultiváveis são os maiores fornecedores de matérias-primas para a produção de bioenergia (MOERS *et al.*, 2011). Conforme Cortez *et al.* (2008), até 2003, as principais regiões produtoras de energia proveniente da biomassa são Ásia e Austrália, América Latina e Caribe, que também são as regiões com o maior potencial para incrementar o uso dessa fonte renovável. As regiões como Europa e Oriente Médio têm a menor disponibilidade de biomassa e, conseqüentemente, a produção de energia com essa fonte é a mais baixa no mundo.

O litoral Norte de Santa Catarina, mais precisamente a região de Joinville, por apresentar grande vocação agrícola, é capaz de gerar grandes quantidades de resíduos vegetais. Na cultura da banana, o principal resíduo gerado é o pseudocaule. Após a colheita do cacho, a bananeira é cortada e deixada no solo,

onde naturalmente sofre processo de degradação. Na cultura do arroz, em torno de 20% do peso do grão de arroz é composto por casca, as quais são separadas no seu beneficiamento (ABIB, 2011). Uma parte da casca de arroz *in natura* vem sendo empregada diretamente como combustível em caldeiras na própria empresa em que é beneficiado, no entanto, uma grande quantidade deste resíduos não é aproveitada.

De forma geral, os resíduos da agroindústria e agrícolas de processamento de produtos de origem vegetal (frutas, oleaginosas, fibrosas, madeiras, etc.) e origem animal (laticínios, avicultura de corte, aquicultura, etc.) apresentam em suas composições diferentes constituintes, que abrem muitas oportunidades de agregação de valor (ROSA *et al.*, 2011).

Um resíduo lignocelulósico pode ser reciclado ou reutilizado como matéria-prima em um processo diferente daquele de origem. Por exemplo, os resíduos podem ser utilizados energeticamente na produção de calor, de vapor ou de eletricidade em grupos geradores, ou termoelétricas. Esses resíduos podem ser aproveitados na forma sólida, como briquete ou carvão vegetal (QUIRINO, 1991).

Briquetes produzidos a partir destes resíduos, através de um processo simples e de baixo custo são uma excelente fonte de energia barata e ambientalmente correta, em muitos casos, ideal para a substituição de combustíveis fósseis em uso atualmente, com significativas vantagens econômicas e ambientais (YAMAJI *et al.*, 2010). Dentre as vantagens da utilização de briquetes, destacam-se: redução do desmatamento, em função da substituição da madeira geralmente empregada; produção de energia mais barata; redução do impacto ambiental causado pela grande quantidade de resíduos e sua destinação, e permite a reutilização de sobras de materiais.

A necessidade desse estudo surgiu com a intenção de se encontrar formas de reaproveitar e agregar valor aos resíduos gerados na bananicultura e rizicultura, cultivos tão expressivos na região de Joinville, Santa Catarina. Uma dessas formas é a confecção de briquetes a partir da casca do arroz, folha e pseudocaule de bananeiras.

Nesse contexto, o objetivo principal desse trabalho foi desenvolver e avaliar o processo de aproveitamento de resíduos da rizicultura e bananicultura na obtenção de briquetes, bem como avaliar as características dos resíduos e dos briquetes produzidos por meio de análises físicas e químicas e avaliar o comportamento térmico dos briquetes para uso como biocombustível. Os resultados deste trabalho poderão contribuir para a obtenção e incentivo de novas alternativas de produção de energia agregando maior valor aos resíduos agrícolas e agroindustriais.



# 1 OBJETIVOS

## 1.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial de aproveitamento dos resíduos agroindustriais, casca de arroz, folha e pseudocaule da bananeira para a produção de briquetes, os quais podem ser usados como combustíveis.

## 1.2 Objetivos específicos

- Adequar os resíduos folha e pseudocaule de bananeira para a briquetagem a partir das operações de secagem e cominuição;
- Avaliar o processo de secagem do pseudocaule de bananeira;
- Confeccionar os briquetes a partir dos resíduos, casca de arroz, folha e pseudocaule de bananeira;
- Determinar as propriedades físicas, químicas e térmicas das partículas secas dos resíduos antes e após a briquetagem;
- Avaliar a capacidade de queima dos briquetes e estabelecer a potencialidade dos resíduos, casca de arroz, folha e pseudocaule da bananeira como biomassa combustível.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Biomassa

A biomassa engloba simultaneamente tanto os seres vivos como também o conjunto dos produtos orgânicos gerados por estes seres vivos, mas que não se encontram completamente decompostos em moléculas elementares (COUTO *et al.*, 2004).

A biomassa tem origem em resíduos sólidos urbanos — animais, vegetais, industriais e florestais — e, voltada para fins energéticos, abrange a utilização desses vários resíduos para a geração de fontes alternativas de energia (CORTEZ *et al.*, 2008).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2008), define biomassa, como qualquer matéria orgânica vegetal que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica, e de acordo com a sua origem, pode ser: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos).

De acordo com Gonçalves (2010), materiais lignocelulósicos ou biomassa celulósica na forma de biomassa de plantas, como o bagaço de cana-de-açúcar, são os mais abundantes complexos orgânicos de carbono. Esses resíduos são constituídos, principalmente, de três componentes: celulose, hemicelulose e lignina (NOGUEIRA, 2008; GOUVEIA *et al.*, 2009) e uma pequena quantidade de outras substâncias, tais como, compostos alifáticos e fenólicos.

A hemicelulose e a celulose estão agrupadas formando a holocelulose, a qual compõe as paredes das fibras da madeira (celulose é a parede e a hemicelulose ocupa os espaços vazios). Conforme Gonçalves (2010), a celulose é a maior porção e representa cerca de 40% a 50% do material. A lignina é um polímero tridimensional com a finalidade de manter as fibras juntas (NOGUEIRA, 2008).

#### 2.1.1 Biomassa como fonte de energia

Dentre todas as utilizações possíveis para biomassa, a geração de energia pode ser considerada a mais expressiva. Em efeito, a sua combustão constituiu tradicionalmente a fonte de energia mais importante desde o descobrimento do fogo (COUTO *et al.*, 2004). No entanto, grande parte da energia consumida no mundo

vem de fontes não renováveis, isto é, recursos que não se renovam à medida que são consumidos, como carvão, petróleo e gás natural (FERNANDES, 2012).

O planeta Terra se encontra diante de uma grave situação para o seu suprimento sustentável de energia, e este problema tem um número reduzido de soluções, principalmente no que tange aos combustíveis fósseis.

Uma das soluções para os países em desenvolvimento como o Brasil é a utilização da biomassa, que por ser renovável constitui a mais promissora fonte alternativa para uma situação de suprimento energético (COUTO *et al.*, 2004).

Atualmente, a maioria dos países, sejam eles desenvolvidos ou não, está promovendo ações para que as energias alternativas renováveis tenham participação significativa em suas matrizes energéticas. A motivação para essa mudança de postura é a necessidade de redução do uso de derivados do petróleo e, conseqüentemente, a dependência energética desses países em relação aos países exportadores de petróleo. Além disso, a redução no consumo dos derivados do petróleo também diminui a emissão de gases promotores do efeito estufa (CORTEZ *et al.*, 2008).

Segundo dados da ANEEL (2008), a quantidade de biomassa existente na Terra é da ordem de dois trilhões de toneladas, o que significa cerca de 400 toneladas per capita. Embora grande parte da biomassa seja de difícil contabilização, devido ao uso não-comercial, estima-se que, atualmente, ela possa representar até cerca de 14% de todo o consumo mundial de energia primária.

A partir da biomassa podem ser produzidos combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. Para a transformação da biomassa em energia, e conseqüentemente em combustíveis são necessárias tecnologias de conversão termoquímicas, destacando-se a combustão, a pirólise, a liquefação e a gaseificação (FERNANDES, 2012).

A transformação energética da biomassa está alicerçada nos processos químicos, termoquímicos e biológicos, conforme ilustrado na Figura 1.

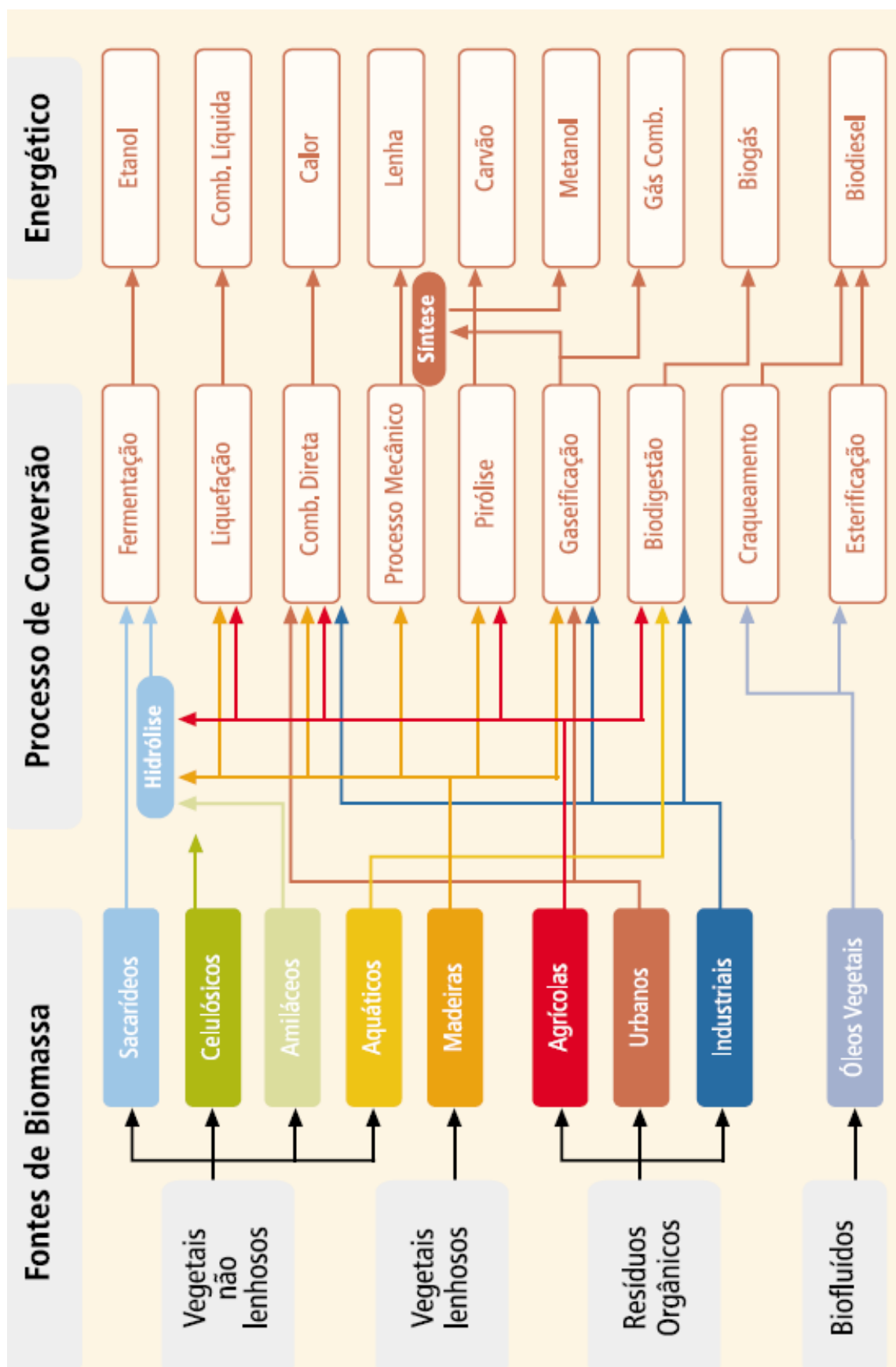


Figura 1 - Processos de conversão da biomassa em energia.

(Fonte: ANEEL, 2005).

A partir dessas transformações, são gerados produtos como o bio-óleo, gás, calor ou carvão (FERNADES, 2012). Para aumentar a eficiência do processo e reduzir impactos socioambientais, tem-se desenvolvido e aperfeiçoado tecnologias de conversão mais eficientes, estes processos vão desde os mais antigos, como a carbonização e combustão direta até os mais avançados como a pirólise e gaseificação (GÓMEZ, 2002; YAMAJI, *et al.*, 2010).

Uma das principais vantagens da biomassa é que seu aproveitamento pode ser feito diretamente, por intermédio da combustão em fornos, caldeiras, como no caso dos briquetes. Bagaço da cana, casca de arroz e de coco, cascalho e restos de madeira são exemplos de combustíveis que têm sido usados, tanto secos in natura, ou na forma de briquetes, na produção de vapor nas caldeiras das empresas, em substituição aos combustíveis de origem fóssil, como óleo e gás natural (ROCHA *et al.*, 2009).

A combustão é uma reação química exotérmica entre um combustível e um comburente, usualmente o oxigênio, para liberar calor, formando como produto um grupo de espécies diferente dos reagentes (NOGUEIRA, 2008). Considerando a combustão direta da madeira em formas de toras, cavacos, serragem, briquetes, tem-se que a mesma consiste em obter energia por meio de sua queima em equipamentos térmicos. O calor gerado pode ser empregado para atividades domésticas ou industriais (MORAIS, 2007).

No entanto, quando se deseja queimar biomassa, esta queima deve ser feita de maneira controlada, pois o processo de combustão nunca é completo, e inevitavelmente lança poluentes atmosféricos (MORAIS, 2007). Estes poluentes podem ser classificados em três categorias: gases que provocam efeito estufa, gases nocivos (agridem a saúde e destroem os bens materiais) e resíduos inertes. Na primeira categoria, está o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e hidrocarbonetos como o metano ( $\text{CH}_4$ ). Na segunda, estão o monóxido de carbono (CO), gases que contenham nitrogênio e enxofre. Na, terceira estão o carvão e as cinzas (NOGUEIRA, 2008).

Estudos realizados no mundo todo demonstram a viabilidade e o sucesso da utilização da biomassa como fonte de energia. Na tabela 1 estão identificadas algumas biomassas aproveitadas por diferentes processos e os respectivos autores dos trabalhos.

Tabela 1 – Biomassas estudadas e suas tecnologias de processamento.

<b>Autor e data</b>	<b>Biomassa estudada</b>	<b>País</b>	<b>Tecnologia de processamento</b>
<b>Wilaipon, 2007</b>	Espiga de milho	Tailândia	Briquetagem
<b>Della et al., 2005</b>	Casca de arroz	Brasil	Obtenção de sílica
<b>Souza et al., 2010</b>	Casca de banana, folha, pseudocaule e engaço de bananeira	Brasil	Metanização
<b>Wilaipon, 2009</b>	Casca de banana	Tailândia	Briquetagem
<b>Yanik et al., 2012</b>	Microalgas Marinhas	Turquia	Pirólise
<b>Felfli et al., 2011</b>	Casca de café	Brasil	Briquetagem
<b>Silveira, 2008</b>	Casca de coco	Brasil	Briquetagem

Independentemente da forma e da fonte de energia utilizada, a biomassa tem se mostrado, ao longo de décadas, um dos mais determinantes fatores de desenvolvimento econômico e social dos países industrializados (COUTO *et al.*, 2004).

Felfli *et al.* (2011) estimaram que a cada ano cerca de 330 milhões de toneladas de resíduos de biomassa são gerados no país, no entanto esta biomassa não é reaproveitada como energia, pois muitas vezes estes resíduos possuem baixa densidade e elevada umidade, gerando altos custos nos transporte, manuseio e armazenamento.

Uma forma de reaproveitar resíduos lignocelulósicos é compactando-os, visando obter briquetes com qualidade superior a qualquer lenha empregada como combustível sólido em fornos e caldeiras.

## 2.1.2 Propriedades físicas, químicas e térmicas da biomassa

Nos processos de conversão termoquímica, as características e propriedades da biomassa desempenham papel fundamental na obtenção de maiores rendimento e aproveitamento energético.

Geralmente, a caracterização da biomassa é baseada nas análises das propriedades físicas (granulometria, massa específica e densidade), das propriedades químicas (análise aproximada - teores de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo; análise química elementar – CHNS; e poder calorífico) e propriedades térmicas (Análise Termogravimétrica – ATG e Análise Térmica Diferencial – ATD).

A Biomassa difere de carvão em muitos aspectos importantes, incluindo a matéria orgânica, conteúdo inorgânico, energia e propriedades físicas. Em relação ao carvão, a biomassa geralmente possui menores teores de umidade, carbono, alumínio e ferro e maiores teores de oxigênio, sílica e potássio (DEMIRBAS, 2003).

A seguir estão descritas as principais características e propriedades relacionadas à biomassa para a produção de briquetes.

### 2.1.2.1 Granulometria

A matéria-prima ideal para ser processada como briquete, deve possuir partículas com granulometria variada. Diferentes granulometrias facilitam o adensamento das partículas proporcionando briquetes de melhor qualidade. A faixa de tamanho ideal das partículas é de 5 a 10 mm (GONÇALVES, 2010; GENTIL, 2008, MORAIS, 2007). No entanto, podem ser produzidos briquetes com granulometrias menores (de 1 a 4 mm), dependendo da composição química da biomassa. Nesse caso, são empregadas menores pressões de compactação na briquetadeira (PAULA *et al*, 2011; SILVA e MORAIS, 2008).

Já biomassas com partículas superiores (maiores que 10 mm) podem dificultar o processo de compactação, por não ocorrer a aglomeração adequada das partículas (GONÇALVES, 2010).

### 2.1.2.2 Teor de umidade

O teor de umidade recomendado para a briquetagem de biomassa se encontra numa faixa de 8 a 15% conforme Gonçalves (2010); Gentil (2008); e

Wilaipon (2009). Durante o processo de briquetagem, existe uma faixa ideal de umidade que a biomassa deve possuir para ser compactada adequadamente. O excesso de umidade pode provocar explosões devido à formação de vapor. No entanto, resíduos muito secos dificultam o processo de aglomeração das partículas.

Maiores teores de umidade geram briquetes de qualidade inferior comprometendo a queima eficiente dos briquetes, uma vez que será utilizada parte da energia do processo de combustão para a desidratação da amostra, diminuindo o rendimento energético. Para o caso de resíduos com teor de umidade acima de 15%, Gentil (2008) recomenda a secagem prévia da biomassa sem deixar de destacar a existência de maior demanda de energia, e a necessidade de uma maior instalação industrial bem como o tempo de operação para produzir os briquetes.

Em estudo com folhas de Sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia*), também houve a necessidade de secar o resíduo antes do processo de briquetagem em prensa hidráulica. As folhas apresentaram umidade inicial de 43,64% e passou primeiramente por secagem ao sol, e depois em estufa até atingir a faixa de umidade de 8 a 12% (ALVES *et al.*, 2012).

Silveira (2008) utilizou casca de coco verde, com umidade inicial de 85%, para produção de briquetes. Inicialmente houve a necessidade de realizar um processo de prensagem, ocasionando a redução de água em 60%, e por fim realizou-se secagem ao sol durante duas horas.

A importância do conhecimento da cinética de secagem é para desenvolver as melhores condições operacionais, levando em consideração o tempo e gastos energéticos empregados no processo. O comportamento das curvas de secagem está correlacionado ao tipo de secador e condições operacionais empregadas, bem como, às características da biomassa. De modo geral, quanto maior a temperatura de secagem, menor o tempo de secagem (BOURSCHEIDT *et al.*, 2011).

### 2.1.2.3 Teor de sólidos voláteis

O teor de sólidos voláteis expressa a quantidade mássica dos componentes da biomassa que primeiramente entram em combustão. Em biomassas de origem vegetal, representam as frações lignocelulósicas e de carbono presentes. Esses componentes, formados por hidrocarbonetos, são vaporizados da biomassa e facilmente entram em combustão (BARRETO, 2008; GARCÍA *et al.*, 2012).



A presença de altos teores de materiais voláteis é importante, pois interfere na ignição, pois quanto maior o seu teor maior será a reatividade e, conseqüentemente, a ignição no processo de combustão para geração de energia (MOERS *et al.*, 2011; ARAÚJO *et al.*, 2010).

#### 2.1.2.4 Teor de cinzas e carbono fixo

As cinzas são resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos em um forno mufla sob rígido controle de massa, temperatura, tempo e atmosfera (NOGUEIRA, 2008). O teor de cinzas corresponde à porcentagem de material inerte na geração de calor presente na amostra (GONÇALVES, 2010).

Assim, as cinzas são resultados da combustão da biomassa, qual se processa em altas temperaturas, tornando-se necessário conhecimento do comportamento destas cinzas para evitar operações inadequadas (MOERS *et al.*, 2011).

As cinzas são constituídas de matéria inorgânica, como Si, Ca, K, Fe, P, Al, Na e Mg, e são encontrados entre cadeias carbônicas. Possuem baixa concentração na biomassa, de 0,3 a 1%, porém em resíduos agroindustriais, como cascas de arroz, pode chegar até 23%, e menos de 3% para bagaço da cana (FERNANDES, 2012).

No combustível, a cinza pode ter diversas origens como: elementos metálicos e semi-metals ou metalóides, presentes na estrutura molecular do combustível, devido à sua própria formação; fragmentos de argila, areia, sais, pirita, etc., agregados à biomassa; fragmentos do solo misturados à biomassa na colheita e/ou manuseio (NOGUEIRA, 2008).

O teor de carbono fixo representa a massa restante após a liberação de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de umidade (MOERS *et al.*, 2011; GARCIA *et al.*, 2012).

#### 2.1.2.5 Poder calorífico

A energia liberada no processo de combustão normalmente é quantificada pelo Poder Calorífico de um combustível, que pode ser definido como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa da

biomassa (JARA, 1989). O poder calorífico é dividido em poder calorífico superior (PCS), quando considera o calor de vaporização da água ocorrido durante este processo, ou poder calorífico inferior (PCI) quando este vapor é descontado (GENTIL, 2008). Valores elevados de PCS e PCI indicam que a biomassa é recomendável para uso direto como combustível em processos de combustão (FERNANDES, 2012).

O PCI é calculado a partir do PCS, porém desconsiderando o teor de umidade que está presente no combustível, ou seja, corresponde a quantidade de calor útil para acontecer a queima da biomassa (MOERS *et al.*, 2011). O poder calorífico inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (JARA, 1989).

É possível relacionar o PCS de uma biomassa com a quantidade de ligações químicas envolvendo seus elementos. Assim sendo, conhecendo a fração mássica dos componentes da biomassa, é possível calcular o PCS (BARRETO, 2008).

O poder calorífico superior e inferior de uma biomassa pode ser obtido por bomba calorimétrica, na qual a combustão ocorre a volume constante e também podem ser determinados com a ajuda dos resultados da análise elementar, sendo calculados pelas equações propostas por Dulong (Equações 1, 2 e 3) para combustíveis sólidos e líquidos (CORBITT, 1999). O resultado é expresso em kcal/kg.

$$PCS = 8100C + 34400\left(H - \frac{O}{8}\right) + 2500S \quad (1)$$

$$PCI = 8100C + 34400\left(H - \frac{O}{8}\right) + 2500S - 600w \quad (2)$$

$$w = 9H + U \quad (3)$$

Onde C, H, O, S são as frações em massa (%) dos respectivos componentes U a umidade da biomassa, e w representa a fração líquida.

#### 2.1.2.6 Propriedades térmicas

O calor é uma forma de energia que pode acompanhar, promover, acelerar ou desacelerar processos. Algumas transformações envolvem a variação da massa,

das propriedades elétricas e mecânicas do material, e a observação de como essas variáveis se comportam a medida que a amostra é submetida ao aquecimento ou resfriamento constitui o objeto da análise térmica (CASTELLÓ, 2009).

Análise Térmica é um termo que abrange um grupo de técnicas nas quais uma propriedade física ou química de uma substância, ou de seus produtos de reação, é monitorada em função do tempo ou temperatura, enquanto a temperatura da amostra, sob uma atmosfera específica, é submetida a uma programação controlada (CANEVAROLO, 2004; SPEYER, 1994).

As análises térmicas mais empregadas na caracterização da biomassa e utilizadas neste trabalho são: Análise Termogravimétrica (ATG), Análise Termogravimétrica Derivativa (DTG) e Análise Térmica Diferencial (ATD). Estas técnicas fornecem resultados na forma de curvas (termogramas), as quais contêm as informações do parâmetro medido (LUCAS *et al.*, 2011).

A análise termogravimétrica é definida por Lucas *et al.* (2001), como um processo contínuo que envolve a medida da variação de massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo. A amostra pode ser aquecida ou resfriada a uma velocidade específica, ou pode ser mantida a uma temperatura fixa (modo isotérmico). Geralmente as velocidades de aquecimento são na faixa de 5 a 10 °C/min. Uma curva típica de decomposição térmica de um material pode ser visualizada na Figura 2.

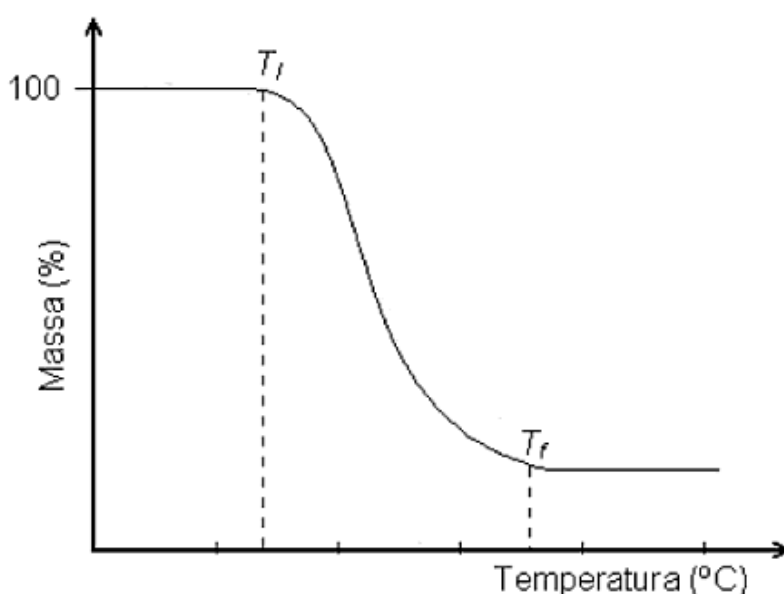


Figura 2 – Curva de decomposição térmica de um material.  
(Fonte: Lucas *et al.*, 2001).

A partir da termogravimetria é uma técnica útil para estudar a capacidade da substância de manter sua massa inalterada sob condições diversas como combustão ou pirólise. Pode auxiliar na escolha de faixas de temperaturas utilizadas no processo de carbonização ou combustão, buscando a economia de energia utilizada nos fornos, além de identificar as principais fases das reações de liberação ou absorção de energia, e perda de massa, que estão diretamente ligados à qualidade do combustível. A relação do rendimento gravimétrico e perda de peso da lignina são fatores importantes para a determinação da qualidade da biomassa (GONÇALVES, 2010).

Na análise térmica diferencial (ATD), o parâmetro medido é a diferença de temperatura entre a amostra em análise e um material de referência submetido às mesmas condições. (LUCAS *et al.*, 2011). Na Figura 3 é apresentada uma curva típica de análise térmica diferencial.

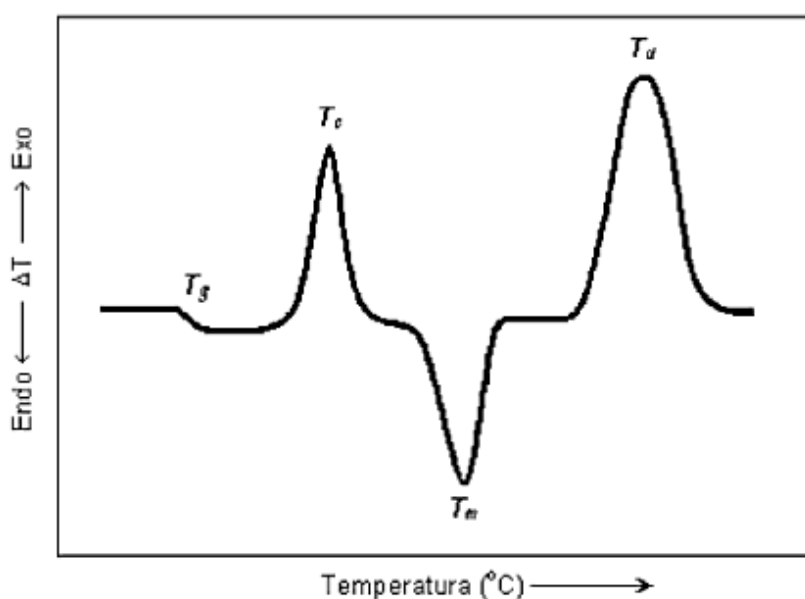


Figura 3 - Curva típica de uma Análise Térmica Diferencial - ATD  
(Fonte: Lucas *et al.*, 2001).

É importante salientar que nesse tipo de análise não é quantitativa em termos de quantidade de calor envolvido nas variações de temperatura. A curva registrada fornece somente os valores das temperaturas nas quais ocorrem as mudanças na amostra, e se essas transformações são com liberação de calor, endotérmicas ou exotérmicas com consumo de calor. Essas mudanças são representadas por picos ATD das transformações respectivas (CASTELLÓ, 2009; LUCAS *et al.*, 2001).

## 2.2 Setor agrícola e agroindustrial

O Brasil, atualmente, se encontra em uma fase de crescimento econômico, tecnológico e social, marcado por uma melhor distribuição de renda e inclusão social se comparado com anos anteriores. Um dos pilares deste crescimento é sem dúvida a agricultura. As questões ambientais têm provocado cada vez mais interesse e preocupação a todos os setores envolvidos em atividades industriais e agrícolas, uma vez que a taxa de resíduos gerados nessas atividades é maior que a de degradação (RODRIGUES, 2010).

Em Santa Catarina, o município de Joinville é responsável na região norte, por 41% da produção de arroz, 22% da produção de banana, 54% da produção de cana de açúcar e 47% da produção de aipim. A base do setor primário do município de Joinville é a agricultura familiar. Nesta, cerca de 97% das propriedades tem menos de 50 hectares. Destaca-se o cultivo do arroz irrigado, de banana e hortaliças (IPPUJ, 2011).

### 2.2.1 Cultura do arroz

Depois do milho, o arroz (*Oryza sativa* L.) é o cereal mais produzido no mundo. Cultivado em todos os continentes, sendo que o asiático tem a maior concentração, com destaque para China, Índia, Indonésia, Vietnã e Tailândia, responsáveis por 30,2%, 21,3%, 8,2%, 5,6% e 4,5% da produção mundial, respectivamente (CEPA, 2012).

É um alimento básico da população brasileira e de várias outras culturas. Os dados de consumo indicam que aproximadamente 45 kg de arroz são consumidos por habitante anualmente no país, principalmente na forma polida, cerca de 80%. No Brasil, o arroz ocupa o terceiro lugar na produção de grãos, atrás da soja e do milho (PASCUAL, 2010).

O Estado de Santa Catarina é o segundo maior produtor nacional de arroz, ficando atrás do Rio Grande do Sul. As informações do IBGE relativas ao Estado de Santa Catarina, para a safra 2011/2012, são de uma área plantada de 150.473 hectares, produção de cerca de 1 milhão de toneladas e rendimento médio de 7,356 kg/ha. Esses valores são distribuídos em cinco regiões distintas por suas condições geográficas e edafoclimáticas: Alto, Médio e Baixo Vale do Itajaí, Litoral Norte e região Sul de Santa Catarina (EPAGRI, 2012).

Segundo dados do CEPA (2012), cerca de um terço da área e da produção se concentra numa única Microrregião Geográfica, a de Araranguá (Figura 4). Na última safra, a mesorregião Sul Catarinense (Araranguá, Criciúma e Tubarão) contribuiu com 61,7% da área e com 61% da produção. A região norte de Santa Catarina, foi responsável por 15,08% da produção. Praticamente todo o arroz é cultivado de forma irrigada.

Ainda segundo a Epagri (2012), o principal produto da agroindústria catarinense de arroz é o parboilizado, o qual é comercializado, principalmente nos estados do Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro e estados do Nordeste brasileiro.

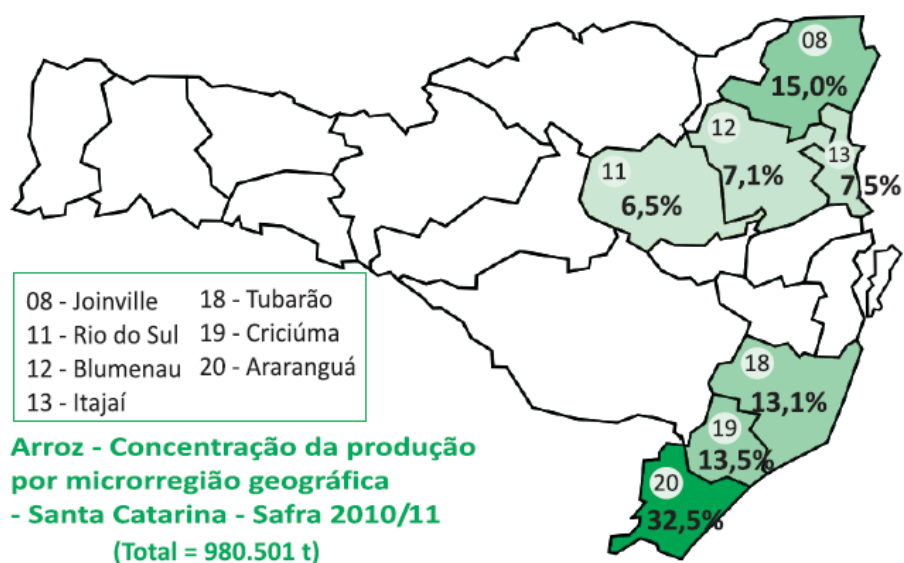


Figura 4 - Concentração da produção de arroz em Santa Catarina (Fonte: CEPA, 2012).

O consumo de arroz beneficiado pelos catarinenses é em torno de 250 mil toneladas anuais, representando apenas 25% da quantidade total produzida. Atualmente, em Santa Catarina existem 54 indústrias de beneficiamento de arroz e 16 pequenos engenhos, que funcionam apenas nos meses de safra. A capacidade de beneficiamento é de 1,4 milhões de toneladas de arroz em casca (EPAGRI, 2012).

O cultivo do arroz em Joinville deu início com as primeiras famílias, de origem portuguesa, a se instalarem no município. Atualmente, a principal região responsável pela produção do arroz, é a região da Bacia Hidrográfica do Rio Piraí, que detém 90% da área de arroz irrigado (IPPUJ, 2011).

De acordo com dados do IBGE (2012), a safra Joinvillense 2011/2012 apresentou uma produção de 19.500 toneladas de arroz, com uma área plantada de

3 mil hectares e rendimento médio de 6.500 kg/ha. Essa produção está dividida em 245 produtores de arroz conforme dados da Prefeitura de Joinville (IPPUJ, 2011).

### 2.2.2 Cultura da banana

A banana (*Musa* spp.) é uma das frutas mais consumidas no mundo, sendo produzida na maioria dos países tropicais (EMBRAPA, 2006). Cerca de 120 países, se dedicam ao cultivo da banana. Em alguns deles, essa atividade se destaca como uma das principais fontes de arrecadação e geradora de emprego e renda (CEPA, 2012).

Originária do Sudeste Asiático foi cultivada pelas sociedades antigas há vários séculos e disseminada nos países do Oriente Médio e Europa Mediterrânea. Na América Latina, foi introduzida em São Domingos no ano 1516 (SOUZA e CONCEIÇÃO, 2002).

Conforme Souza e Conceição (2002), a produção de bananas no Brasil, em volume, é superada apenas pela da laranja. Apresenta, também, grande importância, por ser o Brasil o maior consumidor mundial, mesmo sendo o terceiro em produção.

Calcula-se que a área plantada no País atinja cerca de 491 mil hectares. Entretanto, certos fatores climáticos, como a temperatura e o regime de chuvas, impõem limites à cultura, favorecendo, por isso, sua concentração nos Estados de São Paulo, Bahia, Pará, Santa Catarina e Minas Gerais (EMBRAPA, 2006).

O Brasil é responsável por 7,5% da produção mundial. Santa Catarina com aproximadamente seis mil produtores ocupa o quarto lugar, com 663.892 toneladas de cachos de bananas produzidos. Esse valor representa 30.409 hectares de área plantada, com um rendimento médio de 21.832 quilogramas por hectare (IBGE, 2012). O Litoral Norte do Estado concentra 85% da produção, conforme a Figura 5.

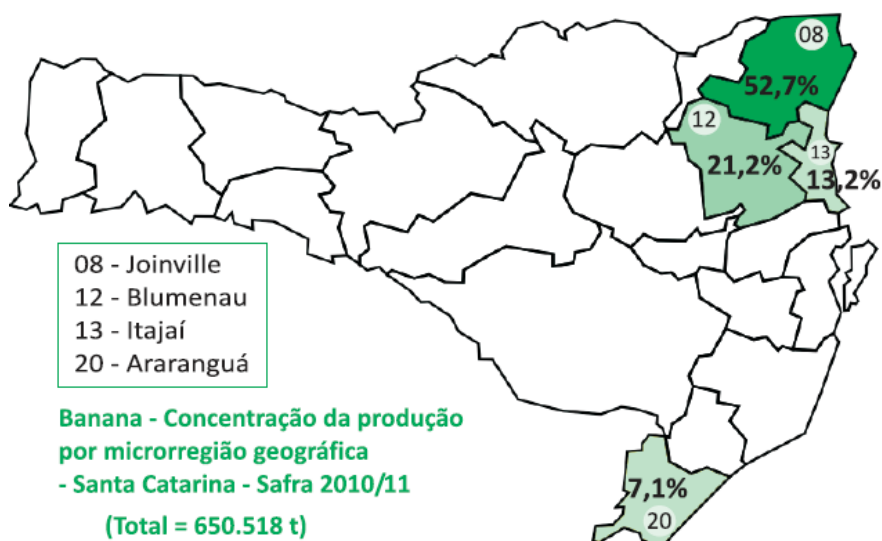


Figura 5 - Concentração da produção de bananas em Santa Catarina.  
(Fonte: CEPA, 2012).

No Litoral Norte predominam os cultivares Nanica e Nanicão, componentes do tipo Caturra, também conhecida como Banana D'água. Já no Litoral Sul, que representa cerca de 9% da produção, os cultivares mais usados são a Enxerto e a Branca de Santa Catarina, componentes do tipo Prata também conhecidas como Branca em alguns estados da Federação (CEPA, 2012).

A produção no estado de Santa Catarina é essencialmente comercial e se destina tanto ao mercado externo quanto ao mercado interno. A banana-catarina, conforme designação dos agentes do mercado está presente na maioria dos estados brasileiros. Em Santa Catarina, a bananeira é a principal frutífera em área cultivada, que se alterna com a macieira em importância econômica (SOUZA e CONCEIÇÃO, 2002).

Em Joinville, existem 110 produtores (IPPUJ, 2011), onde a safra 2011/2012, produziu 19.800 toneladas de bananas, representando 900 hectares de área plantada, com um rendimento médio de 22.000 kg/ha (IBGE, 2012).

### 2.3 Resíduos agrícolas e agroindustriais

Os resíduos agrícolas são os resíduos vegetais que são produzidos no campo, resultantes das atividades da colheita das culturas, formados por caules, palhas e folhas em geral, já os resíduos agroindustriais são gerados no processamento de alimentos, fibras, couro, madeira, produção de açúcar e álcool, etc., sendo sua produção, geralmente, sazonal, condicionada pela maturidade da



cultura ou oferta da matéria-prima. São exemplos a casca de arroz, casca de banana e o caroço de algodão (ABIB, 2011).

A produção agrícola de modo geral, gera uma grande quantidade de resíduos que são parcialmente aproveitados para gerar energia através das tecnologias existentes ou como constituinte da ração animal e nas áreas de medicina e fertilizantes (CORTEZ *et al.*, 2008). Atualmente, o Brasil deixa de aproveitar mais de 200 milhões de toneladas de resíduos agroindustriais.

Existem inúmeros tipos de resíduos agrícolas, e sua exploração deve ser feita de maneira racional, pois podem ser interessantes para proteger o solo da erosão e repor os nutrientes extraídos pelas plantas. Conforme Cortez *et al.* (2008), estes resíduos são basicamente constituídos de palha (folhas e caules), e têm um poder calorífico médio de 15,7 MJ/kg de matéria seca.

A energia armazenada nos resíduos agrícolas pode ser considerável, representando em geral mais que o dobro do produto colhido, e contem cerca de quatro vezes a energia necessária para a obtenção dos principais cereais ou sementes oleaginosas (CENBIO, 2012).

A produção em larga escala da energia elétrica e dos biocombustíveis está relacionada principalmente à biomassa agrícola e à utilização de tecnologias eficientes. Conforme o Atlas de Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2005), a pré-condição para a sua produção é a existência de uma agroindústria forte e com grandes plantações, sejam elas de soja, arroz, milho ou cana-de-açúcar.

A biomassa é obtida pelo processamento dos resíduos dessas culturas que geralmente permanecem na lavoura. O emprego de resíduos agrícolas e agroindustriais como biomassa combustível para geração de energia vem sendo cada vez mais estudado e pode ser uma solução alternativa para os problemas relacionados à sua disposição (IOANNIDOU *et al.*, 2008).

Entre os resíduos agrícolas mais utilizados o bagaço de cana-de-açúcar é a matéria-prima de maior produção em todo o mundo, produção esta encabeçada pelo Brasil com quase 400 milhões de toneladas de produção anual, seguido por Índia, China, Tailândia, Paquistão e México (CORTEZ *et al.*, 2008).

Inventário realizado pela ABIB (2011) indica uma série de resíduos com potencial para serem utilizados energeticamente, entre eles, palha de cana de açúcar, de soja e de milho, casca e caroço de algodão, cascas de cacau, café e amendoim.

Conforme Cortez *et al.* (2008), a China é o maior produtor de arroz (187 milhões de toneladas), os Estados Unidos são o maior produtor de milho (300

milhões de toneladas) e de soja (86 milhões de toneladas), a União Européia é a maior produtora de beterraba com quase 127 milhões de toneladas. A Europa e os Estados Unidos são os principais concorrentes do maior produto energético obtido da biomassa, o álcool da cana-de-açúcar, já que a beterraba e o milho são utilizados por esses países para a obtenção do produto emergente.

A quantidade de resíduos gerados para cada cultura pode ser estimado a partir da produção multiplicada pelo fator residual, calculado por Cortez e Lora (1990). O fator residual é uma relação entre a quantidade de resíduos observados e a quantidade produzida.

Para efeito de comparação, na Tabela 2 estão apresentados dados referentes à geração de resíduos provenientes da bananicultura e rizicultura e de outras culturas brasileiras (ABIB, 2011).

Tabela 2 - Geração de resíduos agrícolas no Brasil.

<b>Cultivo</b>	<b>Produção Total (Safrá 2010) (Mil toneladas)</b>	<b>Fator residual quantitativo (t resíduo/t produzida)</b>	<b>Produção de resíduos (Mil toneladas)</b>
<i>Arroz (casca)</i>	11.325.672	0,18	2.038.620
<i>Banana (folha)</i>	7.072.076	1,50	10.608.114
<i>Banana (Pseudocaulé)</i>	7.072.076	2,50	17.680.190
<i>Cana de açúcar (bagaço)</i>	624.991.000	0,28	174.997.480
<i>Café (casca)</i>	2.931.295	0,28	801.363
<i>Milho (Palha e sabugo)</i>	56.059.638	1,42	79.604.685
<i>Maracujá (casca)</i>	718.798	0,39	280.331
<i>Maçã (bagaço)</i>	1.274.705	0,25	318.676

(Fonte: ABIB, 2011).

A disponibilidade dos resíduos agrícolas no Brasil tem alcançado valores expressivos ao longo de décadas. Entretanto, a utilização plena desta biomassa, para fins energéticos, tem enfrentado algumas dificuldades operacionais relacionadas com o transporte, o armazenamento, a densificação e, sobretudo, o teor de umidade relativamente alto e muito variável na origem dos resíduos, podendo ultrapassar facilmente a cifra de 50% (COUTO *et al.*, 2004).

### 2.3.1 Resíduos da rizicultura

O grão de arroz é formado por uma camada externa protetora, a casca e a cariopse, esta última, formada por diversas camadas, que constituem o farelo de arroz (PASCUAL, 2010). Em torno de 20% do peso do grão de arroz é composto por casca, as quais são separadas no beneficiamento do arroz (ABIB, 2011).

Pelos dados do IBGE (2012) relativos a produção de arroz no município de Joinville na safra 2012/2011, e pelo fator residual proposto por Cortez e Lora (1990), estima-se que a quantidade de resíduos provenientes da rizicultura na região de Joinville seja da ordem de 3.510 toneladas por ano.

A casca é composta por duas folhas modificadas, a pálea e a lema, possui minerais (sílica) e celulose e lignina (PASCUAL, 2010). Sem valor comercial em consequência de sua dureza, fibrosidade e natureza abrasiva, a casca de arroz é normalmente usada devido a seu alto poder calorífico (aproximadamente 16,72 MJ/kg) (DELLA *et al.*, 2005), diretamente como combustível em caldeiras na própria empresa no qual é beneficiado, no entanto, uma grande quantidade não é reaproveitada.

Quando não reutilizada e deixada no solo, sua decomposição é lenta, contribuindo para um solo arenoso e de pouca produtividade. Sua baixa propriedade nutritiva e elevado teor de sílica, a tornam imprópria para consumo animal sob forma de ração (DINIZ, 2005).

A casca de arroz é praticamente produzida em todo o País, destacando-se os Estados do Rio Grande do Sul, Goiás, Mato Grosso, Maranhão, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina e São Paulo (COUTO *et al.*, 2004). Sua grande produtividade é um sério problema ambiental, devido aos problemas de descarte.

Estudo realizado por Couto *et al.* (2004) evidencia algumas aplicações da casca do arroz, utilizadas no Brasil: secagem do próprio grão nas áreas de produção através da queima em fornalhas; cama para eqüinos, suínos, frangos e outros animais; adubação orgânica, uma vez compostada; peletização e posteriormente incorporada em ração para ruminantes e briquetagem.

Estudos mais recentes também apontam diversas aplicações para a casca de arroz. Della *et al.* (2005) estudaram a sílica obtida a partir da reciclagem da cinza de casca de arroz. Morais *et al.* (2006) obtiveram briquetes a partir da casca com baixa pressão de compactação. Souza *et al.* (2007) caracterizaram a casca de arroz carbonizada para uso energético.

A pirólise rápida da casca de arroz foi estudada por Almeida (2010) e o resíduo sólido resultante do processo demonstrou-se rico em sílica indicando sua possível utilização como adsorvente em processos industriais e na purificação de água.

### 2.3.2 Resíduos da bananicultura

A bananeira – da família das Musáceas – é um vegetal herbáceo completo típico das regiões tropicais e úmidas (SOFFNER, 2001) e é cultivada em todos os estados brasileiros, desde a faixa litorânea até os planaltos do interior (EMBRAPA, 2006).

A bananeira possui raiz, caule subterrâneo, folhas, flores, frutos e sementes (SOFFNER, 2001). As partes de uma bananeira podem ser visualizadas na Figura 6.

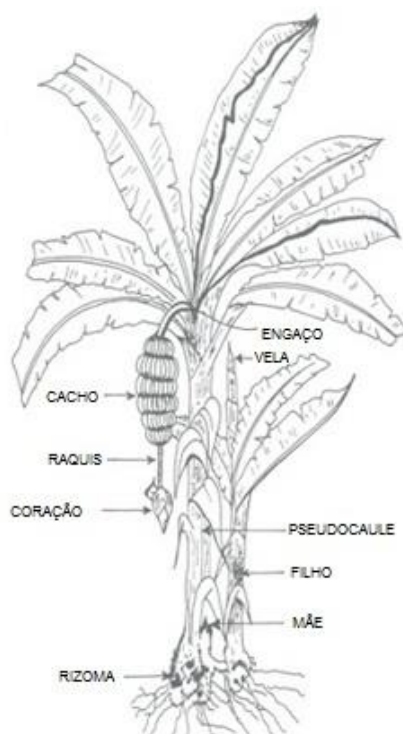


Figura 6 - Partes da bananeira *Musa sp.*  
(Fonte: Alves *et al.*, 1997).

O caule, também chamado de rizoma, é subterrâneo e é onde ocorre a formação das raízes e das folhas. O pseudocaule, ou stirpe, é um tronco em formato cilíndrico, formado por bainhas foliares sobrepostas. É no interior do pseudocaule

que se encontra o coração central ou mais conhecido como “palmito” (SOFFNER, 2001).

O cultivo da banana gera uma quantidade significativa de resíduos, segundo Soffner (2001), são gerados 200 t/ha/ano, já que cada planta produz de um a cinco cachos de bananas. Os resíduos mais significativos, por serem os mais volumosos são as folhas, pseudocaule e engaço.

No município de Joinville, onde a produção de bananas é de 19.800 toneladas por ano (IBGE, 2012), a quantidade de resíduos de pseudocaule é da ordem de 49.500 toneladas e as folhas representam 29.700 toneladas de resíduos, utilizando fator residual de 2,50 e 1,50 respectivamente para o pseudocaule e as folhas (Cortez e Lora, 1990; ABIB, 2011).

Após a colheita do fruto, as outras partes da bananeira, como folhas, pseudocaule, conforme Soffner (2001) são utilizadas no solo como cobertura morta, para manter a umidade, evitar erosão e devolver nutrientes ao solo, reduzindo custos com adubação. No entanto, este material que fica em decomposição no solo pode entrar em contato com corpos hídricos por meio de lixiviação no solo ou carreamento pela chuva, causando sérios problemas ambientais. Outra aplicação do pseudocaule é misturá-lo com frutos rejeitados para a produção de ração animal (TOCK *et al.*, 2010).

Estima-se que a cada 100 kg de frutas colhidas, 46 kg não são aproveitados (EMBRAPA, 2006). Ainda, conforme estudos realizados por Souza *et al.* (2010), além desse rejeito, a cultura da banana gera outros resíduos no campo provenientes da sua industrialização e para cada tonelada de banana industrializada aproximadamente 3 toneladas de pseudocaule, 160 kg de engaços, 480 kg de folhas e 440 kg de cascas são gerados.

Conforme dados da ABIB (2011), a produção de folhas de bananeira como resíduo da colheita pode atingir 85% do peso dos frutos, e o pseudocaule geralmente é incorporado à terra na própria área da cultura.

Alguns estudos demonstraram a utilização do pseudocaule da bananeira no aproveitamento da massa de celulose para fabricação de polpa celulósica (SOFFNER, 2001), para obtenção da nanocelulose (PEREIRA *et al.* 2010), e utilização da seiva do pseudocaule na alimentação humana (FERIOTTI, 2010). Assim como o pseudocaule, folha, casca e engaço de bananeira também foram empregadas para obtenção de biogás (SOUZA *et al.*, 2010; FEDERIZZI, 2008). SCHULZ (2010) utilizou cascas e polpa de banana para produção de etanol, demonstrando que a polpa possui maior potencial para uso.

## 2.4 Processo de briquetagem

O briquete é um biocombustível sólido, processado a partir da compactação de resíduos lignocelulósicos, sob pressão e temperatura elevadas. A briquetagem consiste na aplicação de pressão a uma massa de partículas, com ou sem adição de ligante, e com ou sem tratamento térmico posterior (QUIRINO, 1991; MORAIS, 2007).

Briquetes produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos através de um processo simples e de baixo custo são uma excelente fonte de energia barata e ambientalmente correta, em muitos casos ideal para a substituição de combustíveis fósseis em uso atualmente, com significativas vantagens econômicas e ambientais (YAMAJI *et al.*, 2010). Estes resíduos dispensam a utilização de colas ou ligantes, pois a compactação é garantida pela lignina presente no material (ABIB, 2011).

A Figura 7 ilustra alguns tipos de briquetes que podem ser processados a partir da biomassa.



Figura 7 - Briquetes produzidos a partir de biomassa.  
(Fonte: Tecnobriq, 2012).

A briquetagem é uma forma bastante eficiente para concentrar a energia disponível da biomassa. Um m<sup>3</sup> de briquetes contém pelo menos cinco vezes mais energia que um m<sup>3</sup> de resíduos livres. Isso, levando-se em consideração a densidade a granel e o poder calorífico médio desses materiais (QUIRINO, 1991). Consiste no processo de densificação do resíduo por meio da compactação utilizando uma prensa (MARSOLLA, 1998; MORAIS *et al.*, 2006).

Esta compactação pode ocorrer a elevadas pressões, acarretando em um aumento da temperatura de processamento que por sua vez provoca a

“plastificação” da lignina, que atua como ligante das partículas sem necessidade de uso de aglomerantes em seu processo de fabricação (NOGUEIRA, 2008). A biomassa em forma de briquetes aumenta a eficiência dos processos de combustão e gaseificação, pois proporciona forma e granulometria mais adequadas ao processo de conversão térmica.

Segundo Quirino (1991), os briquetes são produzidos geralmente, para serem empregados como combustível, ou seja, é um material cuja queima é utilizada para produzir calor, energia ou luz. Segundo dados da Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa, cerca de 30 kg de briquetes de madeira gera energia equivalente a 100 kWh/mês de energia elétrica convencional (ABIB, 2011).

Briquetes podem ser utilizados em toda empresa que tenha forno ou caldeira na qual possa ser utilizada lenha, como por exemplo: padaria, pizzaria, frigorífico, olaria, churrasceria (SILVEIRA 2008), abatedouros, cervejarias, hospitais, hotéis/motéis, metalúrgicas, etc.

As empresas de serviços do ramo de alimentos, principalmente churrascerias, pizzarias e similares, vêm usando o briquete cada vez mais intensamente pela sua qualidade ambiental com reduzida produção de fumaça, fácil manuseio e estocagem ou cheiro para os alimentos ou ambientes onde é demandado (GENTIL, 2008).

De acordo com Gentil (2008), não há dados oficiais para a produção de briquetes no Brasil, mas estima-se a existência de 60 indústrias produtoras de briquetes, representando a quantidade total de 55 toneladas por mês. As principais fontes de biomassa utilizadas na produção destes briquetes são resíduos de madeira (40%) e bagaço de cana (30%).

Os resíduos vegetais que podem ser empregados como briquetes são serragem, bagaço de girassol e de cana-de-açúcar, palha de milho, casca de arroz, casca de uva, restos de madeira, dentre outros. Restos de minerais e metais, resíduos plásticos e lixo orgânico também podem ser utilizados no processo de briquetagem (TECNOBRIQ, 2011).

Dentre as vantagens da utilização de briquetes, destacam-se: redução do desmatamento, em função da substituição da madeira geralmente empregada; produção de energia mais barata; redução do impacto ambiental causado pela grande quantidade de resíduos e sua destinação, permite a reutilização de sobras de materiais (GONÇALVES, 2010); melhoria significativa na ergonomia dos funcionários que alimentam a caldeira ou forno, diminuição da insalubridade, pois o funcionário fica menos tempo exposto ao calor (ROCHA *et al.*, 2009); produto

higiênico sem os inconvenientes da lenha; sua combustão propicia uma regularidade térmica na fornalha (NOGUEIRA, 2008).

Segundo Gentil (2008), o briquete de madeira é um produto mais fácil de manusear, transportar e armazenar que outros combustíveis, como a lenha, uma vez que o briquete vem em sacos arrumados em 35 kg ou em sacos desarrumados com 15 kg. Estes podem ser lançados dentro da fornalha de forma rápida, fácil e segura, enquanto toras de eucalipto com 1 metro de comprimento são pesadas e dificultam o manuseio.

#### 2.4.1 Características dos briquetes

Algumas características são importantes para que a biomassa possa ser compactada. Resíduos com partículas de diferentes tamanhos melhoram o empacotamento na formação do briquete (MORAIS, 2007). Se for necessário secar ou moer os resíduos previamente, os custos aumentam consideravelmente (LIPPEL, 2011). Os resíduos briquetados, pela exigência da baixa umidade do processo, são menos higroscópicos e mais resistentes ao apodrecimento ou à fermentação do que os resíduos na condição natural, facilitando assim a estocagem e o transporte (QUIRINO, 1991).

Além de briquetes, pode-se produzir pellets. A biomassa adensada é denominada briquete quando tiver um diâmetro maior que 30 mm. Produtos densificados como este de dimensões menores são denominadas pellets (GENTIL, 2008). A peletização é um processo de extrusão mais exigente que a briquetagem e todo resíduo de origem vegetal pode ser compactado pela briquetagem ou peletização, bastando atender às necessidades de granulometria, lignina e teor de umidade exigido pelo processo (LIPPEL, 2011).

O diâmetro ideal dos briquetes para queima em fornos de pizzarias, padarias e lareiras é de 90 ou 110 mm (TECNOBRIQ, 2011), ou de 70 a 100 mm (GONÇALVES, 2010), com comprimento variando de 250 a 500 mm. Briquetes maiores com diâmetros entre 130 e 160 mm são utilizados em fornalhas, caldeiras e nas indústrias cerâmicas. Já os briquetes de dimensões menores, são utilizados em estufas, fogões, grelhas e churrasqueira (TECNOBRIQ, 2011).

O diâmetro dos briquetes varia principalmente devido ao tipo de máquina briquetadeira utilizada. Esse valor varia desde 20 mm até 105 mm e a densidade entre 1000 e 1300 kg/m<sup>3</sup> (NOGUEIRA, 2008). Segundo Nogueira (2008), as



características termofísicas típicas de um briquete produzido a partir da biomassa são: poder calorífico superior de 19,2 MJ/kg; umidade de 12%, carbono fixo em torno de 14%; sólidos voláteis da ordem de 84% e densidade aparente de 1200 kg/m<sup>3</sup>.

A densidade energética é outro parâmetro importante na avaliação de briquetes, e é definida como a energia concentrada por unidade de volume do briquete (NOGUEIRA, 2008; PROTASIO *et al.* 2011). Em estudo com resíduos de casca de café, resíduos da colheita do milho e serragem de eucalipto, Protasio *et al.*, (2011) comparou a densidade energética dos resíduos antes e após os mesmos passarem pro processos de briquetagem em prensa hidráulica. Após a compactação, os resultados indicaram um aumento de 179%, 321% e 322% na densidade energética da casca de café, da serragem de eucalipto e dos resíduos da colheita do milho, respectivamente, evidenciando a importância da briquetagem no aproveitamento de resíduos lignocelulósicos.

#### 2.4.2 Tecnologias de compactação

Existem diversas tecnologias para compactação dos resíduos lignocelulósicos. Podem ser utilizadas extrusoras (pistão mecânico; pistão hidráulico ou prensa briquetadeira hidráulica; de rosca sem fim) ou peletizadoras (produzem pellets) (LIPPEL, 2011).

O tipo de briquetadeira mais usada no Brasil é a prensa extrusora de pistão mecânico com alta pressão de compactação em usinas concentradas na região sul e norte do país, utilizadas principalmente para compactar serragem (GENTIL, 2008). A tecnologia foi desenvolvida desde o princípio do século e é bastante conhecida no mundo. Consiste em um pistão ligado excentricamente a um grande volante que força o material a ser compactado por meio de um tronco de cone (QUIRINO, 1991).

As prensas de extrusão possuem um molde feito para dar forma ao briquete (MELO, 2000). A fricção da matéria-prima contra a parede da matriz provoca um aquecimento que varia de 150 a 300 °C. Os briquetes apresentam geralmente forma cilíndrica, com diâmetro entre 50 e 100 mm. O problema típico deste tipo de prensa é o desgaste da matriz e do pistão (GONÇALVES, 2010).

As prensas briquetadeiras hidráulicas operam pelo sistema de compressão simétrica por ambas as faces através de dois cilindros hidráulicos reforçados. Com isso, são gerados briquetes mais densos e de compactação uniforme (TECNOBRIQ, 2012). Neste equipamento, o material a ser compactado é alimentado lateralmente

por uma rosca sem fim. Uma peça frontal ao embolo abre e expulsa o briquete quando se atinge a pressão desejada. Não é um processo extrusivo e a pressão aplicada geralmente é menor que em outros métodos, produzindo briquetes de menor densidade. No entanto, é o processo com maior número de fabricantes na Europa (QUIRINO, 1991).

Conforme Quirino (1991), as máquinas peletizadoras operam pelo processo extrusivo. É o princípio dos equipamentos de produção de ração animal, onde há necessidade de injeção de vapor para aquecer e corrigir a umidade. A prensa peletizadora consiste em um rolo que gira contra uma matriz dotada de vários furos de pequeno diâmetro (normalmente entre 5 e 15 mm). A matéria-prima é colocada entre o rolo e a matriz e a passagem do rolo provoca a extrusão do material através de furos. O atrito do material entre as partes provoca o seu aquecimento. O produto extrudado é denominado de pellet (e não briquete), devido ao pequeno diâmetro (GONÇALVES, 2010).

O teor de umidade é um fator importante também conforme a tecnologia utilizada para a produção dos briquetes. Conforme Quirino (1991), as extrusoras de rosca e de pistão mecânico trabalham com material a 10-12% de umidade. As de pistão hidráulico aceitam material com 18-20% de umidade. As peletizadoras trabalham com resíduos com até 20% de umidade. De qualquer maneira, a umidade que permanece no briquete após a briquetagem virá a reduzir seu poder calorífico.

#### 2.4.3 Estudos sobre briquetagem

A produção de briquetes de finos de carvão mineral e vegetal e de resíduos agroflorestais ocorre em larga escala nos EUA e nos países da Europa e do Sudeste Asiático. Casca de banana foi estudada por (WILAIPOON *et al.*, 2006; WILAIPOON 2009). Nestes estudos os briquetes foram produzidos com uma pressão variando de 3 a 11 MPa. Os briquetes submetidos a uma pressão de 7 MPa apresentaram melhor resultado nos testes de resistência à compressão (WILAIPOON, 2009).

Estudos com casca de arroz foram realizados por Ndiema *et al.* (2002), Oladeji (2010) e Morais *et al.* (2006), utilizando pressão de compactação, cerca de 20 MPa e os briquetes apresentaram poder calorífico superior de 17,73 MJ/kg (MORAIS *et al.*, 2006).

Outras biomassas também vêm sendo estudadas para utilização como briquetes, como, palha de trigo (DEMIRBAS e SAHIN, 1998; DEMIRBAS, 1999;

STELTE *et al.*, 2010); casca de avelã (DEMIRBAS, 1999), rejeitos de azeitona (YAMAN *et al.*, 2000).

No Brasil, briquetes a partir de bagaço de cana-de-açúcar foram produzidos e avaliados por Teixeira *et al.* (2010). Os briquetes foram produzidos com diâmetro de 30 mm e comprimidos em prensa hidráulica, durante 1 minuto, sob pressão de 5 toneladas.

Caroços de açaí foram utilizados para confecção de briquetes por Silva *et al.* (2004), utilizando briquetadeira por extrusão, com aquecimento da temperatura ambiente até 250 °C, e o produto final apresentou umidade em torno de 5% e densidade entre 1200 e 1400 kg/m.

Briquetes de casca de cupuaçu também apresentaram resultados satisfatórios para geração de energia, com poder calorífico de 26,7 MJ/kg (SANTOS *et al.*, 2004). Resíduos da agroindústria (frutas) foram utilizados para a produção de briquetes por Sant' Anna *et al.* (2012). Os briquetes obtidos apresentaram um poder calorífico de 15,7MJ/kg.

### 3 METODOLOGIA

Os principais procedimentos adotados neste estudo para atender aos objetivos propostos foram a obtenção, a preparação e a caracterização dos resíduos de casca de arroz, folha e pseudocaule de bananeira. Após estas etapas, foram produzidos briquetes com amostras dos três resíduos preparados e determinadas suas características e propriedades físicas, químicas e térmicas. Por fim, realizou-se a queima e a avaliação da combustibilidade dos briquetes.

Estes procedimentos podem ser visualizados no fluxograma apresentado na Figura 8.

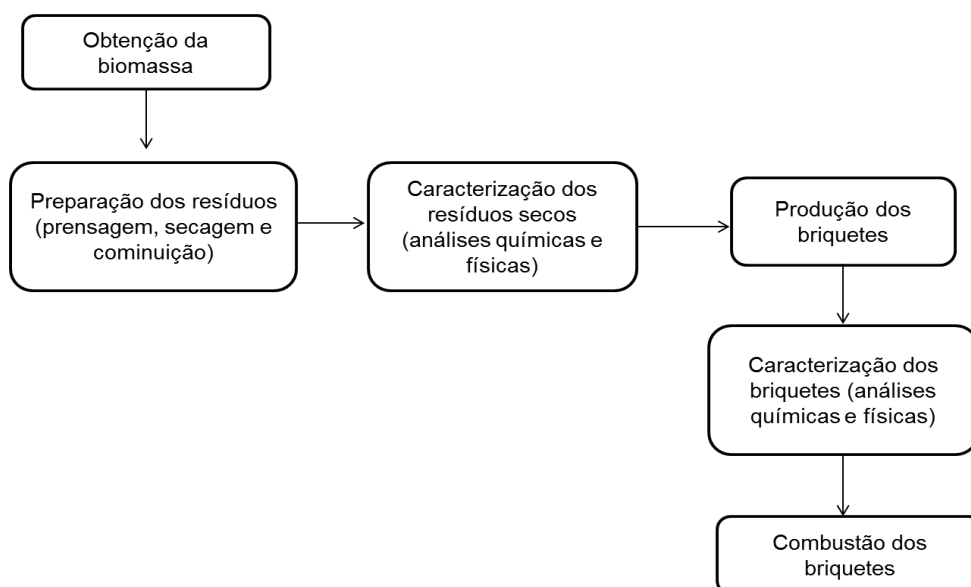


Figura 8 - Principais etapas desenvolvidas.

#### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados e avaliados neste trabalho foram resíduo agroindustrial de casca de arroz utilizado *in natura* e resíduos agrícolas, folha e pseudocaule de bananeira.

### 3.1.1 Casca de arroz

A amostra de casca de arroz (Figura 9) foi cedida em sacas de 50 kg, pela Indústria Vila Nova Ltda., localizada em Joinville - SC. A amostra foi retirada aleatoriamente após a etapa de descascamento do arroz no processo de beneficiamento industrial, e armazenada em local apropriado ao abrigo da luz e umidade.



Figura 9 - Amostra de casca de arroz utilizada.

### 3.1.2 Folha de bananeira

As amostras de folhas de bananeira, *Musa cabendishii*, popularmente conhecida na região sul do Brasil como nanica, foram coletadas diretamente da planta ou recolhidas do solo em uma propriedade localizada no distrito de Pirabeiraba, município de Joinville – SC. Foram coletadas apenas as folhas que já se encontravam ressecadas, conforme pode ser visualizado na Figura 10.



Figura 10 - Folha de bananeira *in natura*.

### 3.1.3 Pseudocaule da bananeira

As amostras de pseudocaule (Figura 11) foram obtidas diretamente do corte da bananeira na mesma propriedade em que foram coletadas as folhas. Foram utilizadas apenas as bananeiras que já tinham sido cortadas para obtenção dos frutos e que estavam dispostas no solo.



Figura 11 – Amostras de pseudocaule.

## 3.2 Preparação dos resíduos para o processo de briquetagem

### 3.2.1 Casca de arroz

A casca de arroz foi utilizada *in natura* na briquetagem, não necessitou de secagem e cominuição, pois já apresentava teor de umidade menor que 10%, determinado por termogravimetria, em estufa a 105 °C até peso constante, seguindo procedimentos da norma ASTM E871-82 (2006), e granulometria adequada para briquetagem, segundo Gonçalves (2010), Gentil (2008) e Morais (2007).

### 3.2.2 Folha de bananeira

No preparo do resíduo folha de bananeira, também não foi necessária a secagem, pois o resultado da análise de umidade, empregando o método ASTM E871-82 (2006), indicou umidade média de  $7,81 \pm 0,38\%$ , adequada para os processos de briquetagem.

Na trituração das amostras de folhas ressecadas, foi utilizado um triturador forrageiro (moinho de facas), modelo CID 125 mm (Figura 12), ajustado com peneiras de 5 mm.



Figura 12 – Triturador forrageiro.

Após moagem, os resíduos foram submetidos à análise granulométrica (ASTM E828-81, 2004) empregando peneiras da série Tyler com diferentes malhas, com tempo de agitação de 15 min e frequência de 80 Hz. Cerca de 60% das partículas ficaram retidas na peneira de 2,36 mm (peneira mesh 8). Desta forma, para a produção dos briquetes foram utilizadas partículas dos resíduos com tamanhos variando de 2,36 a 5 mm. Fotografia das folhas ressecadas e trituradas pode ser visualizada na Figura 13.



Figura 13 - Folhas ressecadas in natura após trituração.



### 3.2.3 Pseudocaule de bananeira

Devido ao seu alto teor de umidade, no preparo do pseudocaule de bananeira foi realizada a prensagem para retirada do excesso de umidade, antes da secagem do mesmo. O resíduo foi inicialmente cortado em pedaços cilíndricos de 30 cm de comprimento, fatiado e prensado em prensa Marca Hidro Industrial modelo HB350.

A umidade das amostras de pseudocaule prensado foi determinada empregando mesmo procedimento usado para as folhas. As amostras de pseudocaule cortadas e prensadas podem ser visualizadas na Figura 14.



Figura 14 - Amostras de pseudocaule após sofrer prensagem.

Após a prensagem, as amostras foram submetidas a ensaios de secagem com a finalidade de se conhecer a melhor condição de secagem do resíduo para ser utilizado no processo de briquetagem.

Os ensaios de secagem foram conduzidos em estufa Holtech HW500 com circulação de ar (velocidade média de 0,05 m/s) nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Cada ensaio foi realizado em triplicata empregando três bandejas de 0,45 x 0,45 m com fundo de tela (furo na forma de losango com área de 25 mm<sup>2</sup> e espessura do fio de 1 mm) contendo cada uma, em média, 1,13 kg de biomassa, conforme Figura 15 (a).



Periodicamente, de cada uma das bandejas empregadas e em diferentes posições, foram retiradas três amostras, para determinação do teor de umidade empregando o método ASTM E871-82 (2006).

As amostras de pseudocaule secas (Figura 15 b) foram submetidas ao processo de trituração seguindo mesmo procedimento empregado para as folhas ressecadas, com o maior percentual de partículas apresentando tamanhos de 2,36 a 5 mm.



Figura 15 - Disposição das amostras de pseudocaule no secador (a) e amostras de pseudocaule após secagem (b).

#### 3.2.4 Produção dos briquetes

Os briquetes foram confeccionados para cada tipo de resíduo de forma isolada empregando prensa briquetadeira hidráulica – PBH com cilindro de força máxima de 60 toneladas na empresa TECNOBRIQ, localizada em Joinville – SC.

A prensa briquetadeira hidráulica foi operada pelo sistema de compressão simétrica por ambas as faces através de dois cilindros hidráulicos reforçados. Com isso, foram gerados briquetes mais densos e de compactação uniforme com diâmetro de 50 mm. A pressão de compactação utilizada para a confecção dos briquetes foi de 18 MPa.

No processo de briquetagem foram empregados dois tempos de compactação conforme disponibilidade e configuração do equipamento: 1 e 0,8 s para a casca de arroz; 1 e 0,6 s para os resíduos da bananicultura.

Não houve aquecimento no momento da briquetagem evitando maior consumo de energia e não foi necessário utilizar agente aglutinante, devido ao tipo de briquetadeira empregada e à presença de lignina em todos os resíduos, que atua como aglomerante das partículas durante a compactação.

Na Figura 16, podem ser visualizados além do equipamento utilizado (a), a alimentação do equipamento com a biomassa (b), o detalhe da produção do briquete (c) e os briquetes produzidos (d).

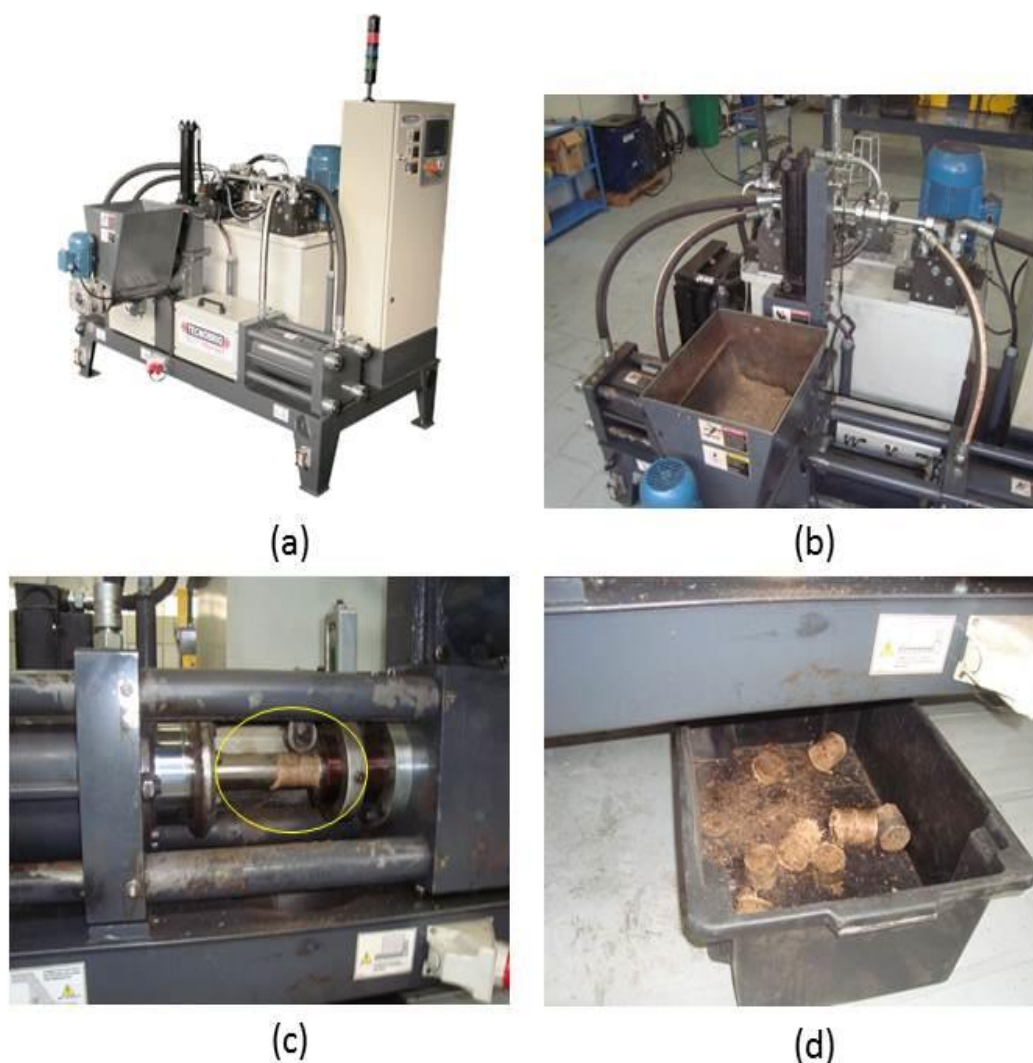


Figura 16 – Etapas do processo de briquetagem.

Na produção dos briquetes, a biomassa foi alimentada no compartimento superior da máquina briquetadeira (Figura 16b), depois com o auxílio de uma rosca foi empurrada até a matriz, sendo então compactada por dois cilindros hidráulicos que aplicam pressão nas duas faces do briquete (Figura 16c). Após o tempo definido para a compactação, os cilindros retornaram a posição inicial e o briquete foi liberado (Figura 16d).

### 3.3 Caracterização dos resíduos e dos briquetes

As análises empregadas para a caracterização dos resíduos (casca de arroz, folha e pseudocaule de bananeira) e dos briquetes produzidos podem ser visualizadas de maneira geral, no fluxograma apresentado na Figura 17.

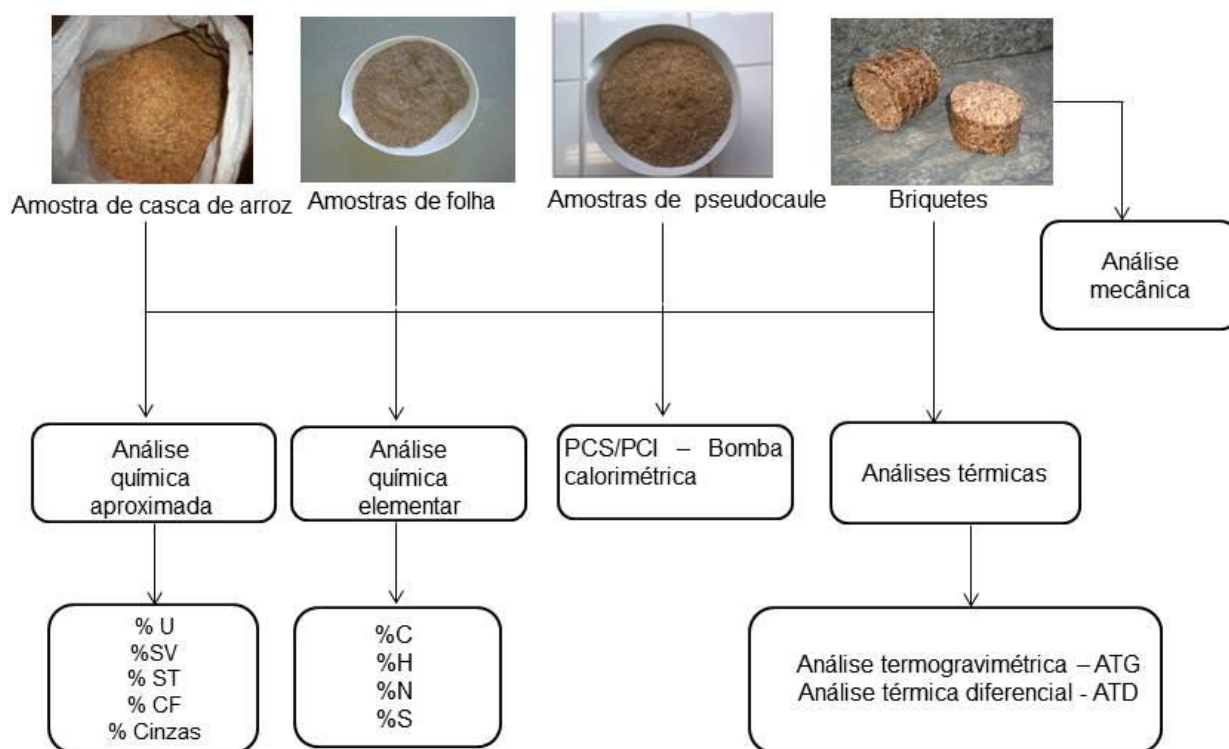


Figura 17 - Fluxograma geral das análises realizadas nas amostras de casca de arroz, folha e pseudocaule de bananeira e nos briquetes produzidos.

Os briquetes utilizados nas análises, foram aqueles compactados com tempo de 1 s, por serem os briquetes em maior número. Somente as análises de resistência a compressão mecânica e densidade aparente foram realizadas nos briquetes com os dois tempos de compactação.

#### 3.3.1 Análise aproximada

Pela análise química aproximada foram determinados os teores de umidade (%U), sólidos totais (%ST) e voláteis (%SV), cinzas e carbono fixo (%CF) das amostras por

termogravimetria (secagem em estufa e queima em mufla). Todos os procedimentos foram realizados em triplicata e os cadinhos utilizados foram limpos e secos previamente.

Os resultados foram avaliados por análise estatística de variância (ANOVA) das médias, utilizando o teste de Tukey com intervalo de confiança de 95%. A hipótese de igualdade das médias analisadas foi rejeitada para  $p < 0,05$ .

Para a determinação da umidade e de sólidos totais, foram utilizados os procedimentos descritos nas normas ASTM E1871-82 (2006) e ASTM E1756-08 (2008), respectivamente. Nos ensaios foram empregados 0,5 mg das amostras e as mesmas foram secas em estufa a 105°C durante três horas conforme os procedimentos.

Para o cálculo da umidade (%U) utilizou-se a Equação 4:

$$U\% = \frac{mac - msc}{m_0} \quad (4)$$

Onde,  $mac$  representa a massa da amostra com o peso do cadinho,  $msc$  é a massa da amostra após a secagem a 105 °C mais o peso do cadinho e  $m_0$  é a quantidade de amostra inicialmente colocada no cadinho.

Para o cálculo de sólidos totais empregou-se a Equação 5:

$$\%ST = \frac{(msc - mc)}{(mac - mc)} \times 100 \quad (5)$$

Onde,  $mc$  é a massa do cadinho.

Para a determinação de materiais voláteis, empregou-se a metodologia ASTM E872 – 82 (2006). As Equações 6 e 7 foram utilizadas para o cálculo do teor de sólidos voláteis, também descrita por García *et al.* (2012).

$$\%SV = A = \frac{mac - mcal}{m_0} \quad (6)$$

Onde,  $mcal$  representa a massa da amostra calcinada após queima em mufla a 575 °C por 3 horas. O teor de material volátil é então determinado pela Equação 7, onde se subtrai o valor encontrado na Equação 6 ( $A$ ) pela umidade encontrada na Equação 1:

$$\%SV = A - \%U \quad (7)$$

O teor de cinzas foi obtido pela Equação 8, após queima em mufla a 575 °C durante 3 horas, conforme García *et al.* (2012) e ASTM E1755-01 (2007).

$$\%cinzas = \left[ \frac{(m_{cal} - m_c)}{m_{sc} - m_c} \right] \times 100 \quad (8)$$

O teor de carbono fixo foi determinado utilizando a Equação 9 por meio dos valores de sólidos voláteis e cinzas, anteriormente determinados pelas Equações 6 e 8 respectivamente (GARCIA *et al.*, 2012).

$$\%CF = 100 - (\%cinzas + \%SV) \quad (9)$$

### 3.3.2 Análise química elementar

Foram determinados os teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) por analisador elementar e enxofre (S) por espectrômetro de emissão atômica com plasma induzido (ICP-AES), modelo Spectro Cirrus CCD, pela Central Analítica do Instituto de Química da Universidade Estadual de São Paulo – USP.

O método consiste na queima das amostras em atmosfera oxidante, com combustão completa desenvolvida. As amostras são reduzidas a um grupo de gases, tais como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, os quais são continuamente medidos e a partir destes, são calculados os percentuais dos elementos C, H, N e S (GARCIA *et al.*, 2012).

As análises foram realizadas em duplicata nas amostras de resíduos e de briquetes.

### 3.3.3 Poder Calorífico

O poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) dos briquetes compactados com tempo de 1 segundo, e dos resíduos, foi determinado por bomba calorimétrica, modelo 1241 Parr, seguindo as normas ABNT NBR 8633 e ABNT 8636, indicadas para o carvão vegetal, porém adaptada para qualquer combustível sólido.

Os ensaios foram efetuados no Núcleo de Extensão do Departamento de Química - UFMG. As análises foram realizadas em duplicata.

Considera-se poder calorífico, a quantidade de calor despreendida durante a combustão de uma unidade de massa, podendo ser Poder Calorífico Superior (PCS) quando considera o calor de vaporização da água ocorrido durante este processo, ou inferior (PCI) quando este vapor é descontado (GENTIL, 2008).

### 3.3.4 Avaliação do comportamento térmico dos resíduos e dos briquetes

Para o estudo do comportamento térmico dos resíduos e dos briquetes em processos de combustão foram realizadas Análise Termogravimétrica - ATG e Análise Térmica Diferencial - ATD.

As análises foram realizadas sob atmosfera oxidante (ar sintético), na faixa de temperatura da ambiente até 900 °C e taxa de aquecimento de 10 °C/min em analisador térmico simultâneo, modelo Netzsch STA 449F3, no Laboratório de Polímeros e Compósitos da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

### 3.4 Avaliação das densidades aparente e energética dos resíduos e dos briquetes

Para se determinar a densidade aparente dos resíduos e dos briquetes foi utilizado um becker de volume e peso conhecidos, e uma quantidade conhecida de biomassa. A densidade foi calculada pela razão entre a massa da biomassa utilizada pelo volume do recipiente.

Da mesma forma, a densidade aparente do briquete foi determinada calculando a razão entre o peso do briquete e o seu volume, obtido a partir de suas dimensões utilizando um paquímetro. Foram determinadas as densidades aparentes dos briquetes compactados com os dois tempos diferentes.

A densidade energética foi determinada multiplicando-se a densidade aparente dos resíduos e dos briquetes pelo poder calorífico superior, seguindo método adotado por Protasio *et al.* (2011) e Nogueira (2008). Os resultados foram expressos em MJ/m<sup>3</sup>. No caso da densidade energética, foram utilizados somente os briquetes com tempo de compactação igual a 1 s.

### 3.5 Avaliação do comportamento mecânico dos briquetes

A resistência à compressão mecânica dos briquetes foi determinada para avaliar o comportamento dos briquetes quando submetidos a uma determinada carga ou esforço, para fins de armazenamento e transporte (GONÇALVES, 2010). No ensaio, o briquete é submetido à pressão contínua e progressiva até que o mesmo frature.



A resistência à compressão mecânica foi analisada em Máquina Universal Emic 200 kN, com velocidade de 1 mm/min, no laboratório do Núcleo de Materiais Cerâmicos e Vidros (CERMAT), do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

A carga de compressão foi aplicada na parte superior dos briquetes de forma longitudinal, em uma área de aproximadamente 20 cm<sup>2</sup> (5 cm de altura e 5 cm de diâmetro) de modo a se obter a força máxima suportada pelo briquete até sua ruptura. Para os ensaios foram utilizados cinco briquetes de cada biomassa estudada e de cada tempo diferente de compactação.

### 3.6 Estudo da combustão dos briquetes

Para avaliar o comportamento dos briquetes durante processos de combustão os briquetes foram submetidos a combustão e suas emissões gasosas analisadas. Para cada tipo de resíduo foram utilizados quatro briquetes. Inicialmente, os briquetes foram colocados sobre uma grelha no interior de uma churrasqueira doméstica.

Para dar início à ignição dos briquetes, utilizou-se inicialmente 10 g de álcool, conforme empregado em estudo realizado por Ramos e Paula *et al.* (2011). No entanto, verificou-se que a quantidade de álcool não seria suficiente e a dosagem foi aumentada para 20 g, utilizando esta mesma quantidade para todos os ensaios. O álcool (sólido) foi colocado em um recipiente metálico logo abaixo da grelha e dos briquetes. O posicionamento dos briquetes sob a grelha já em processo de combustão pode ser visualizado na Figura 18.



Figura 18 – Posicionamento dos briquetes sobre a grelha.

Para quantificar as emissões geradas, foi utilizado um multi analisador de gases de combustão, modelo Optima 7 do fabricante Confor (Figura 19 a). Foram realizadas medições a cada 3 min, totalizando 5 medições em 15 min, posicionando a sonda do equipamento acima dos briquetes, na base da abertura da churrasqueira (Figura 19 b).



Figura 19 - Equipamento utilizado (a) e medições dos gases durante a combustão dos briquetes (b).

Os parâmetros monitorados foram oxigênio ( $O_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO,  $NO_2$ ,  $NO_x$ ) e dióxido de enxofre ( $SO_2$ ). Durante a queima dos briquetes, não foi realizado nenhum controle no fornecimento de oxigênio.

No Brasil, não existem normas específicas para a queima de biomassa. A principal norma reguladora nacional é a Resolução Conama nº 382 de 2006 para os níveis de emissões atmosféricas de alguns processos industriais, e se considera o tipo de combustível e a potência do equipamento utilizado na combustão (BRASIL, 2006), por este motivo, a queima dos briquetes não foi comparada com a legislação. O objetivo principal do ensaio de combustão foi o de avaliar a combustibilidade dos briquetes.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Secagem dos resíduos de pseudocaule

Antes da prensagem, a umidade medida do pseudocaule era de 90% e depois de aproximadamente  $62,03 \pm 1,69\%$ . Para o processo de briquetagem, o teor de umidade da biomassa deve ser entre 8 e 15% (GENTIL, 2008). Para atingir esta faixa, a biomassa foi submetida ao processo de secagem e a cinética de secagem foi avaliada.

O processo de secagem implica em uma considerável redução de volume (GOUVEIA *et al.*, 2003), além disso, o conhecimento da cinética de secagem permite desenvolver as melhores condições operacionais levando em consideração o tempo e gasto energético empregados no processo. A variação do teor de umidade do pseudocaule em função do tempo de secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C é mostrado na Figura 20.

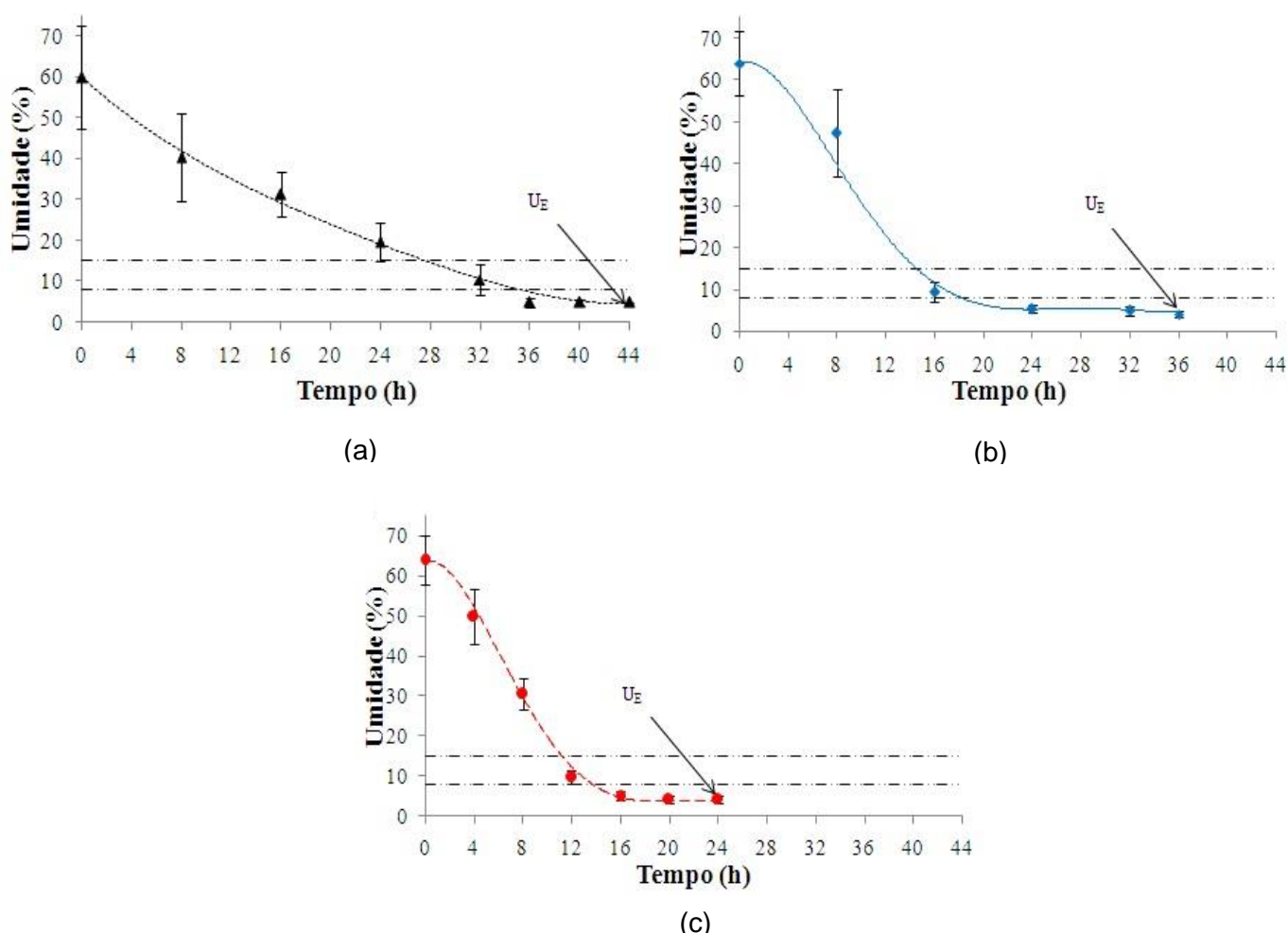


Figura 20 - Variação do teor de umidade do pseudocaule da bananeira em função do tempo de secagem em secador de leito fixo com circulação de ar a 50°C (a), 60°C (b) e 70°C (c).

Na temperatura de 50 °C (Figura 20a) o teor de umidade superior (15%) da faixa ideal de umidade (de 8 a 15%), foi alcançado após 27,5 h de secagem. Para 60 °C (Figura 20b) e 70 °C (Figura 20c), esse valor foi da ordem de 14,5 h e 11,3 h, respectivamente.

Considerando como teor de umidade ideal (11,5%), o valor médio da faixa de umidade referenciada, o tempo de secagem ideal para cada uma das temperaturas avaliadas foi de 31, 16 e 12 h, respectivamente.

Em trabalho realizado por Santini e Haselein (2002), sobre secagem de *Pinus elliottii*, empregando o mesmo tipo de processo e com velocidade do ar de secagem de 2,3 m/s, foram obtidos os tempos de secagem de 73,5 h e 18,7 h em temperaturas de 50 °C e 110 °C, respectivamente, chegando a uma umidade final de 10% para 50 °C e 9% para 110 °C.

O comportamento das curvas de secagem está correlacionado ao tipo de secador e condições operacionais empregadas, bem como, às características da biomassa. Bourscheidt *et al.* (2011) utilizaram estufa com circulação de ar para secar bagaço de malte e cevada de indústria de cerveja (com umidade inicial de aproximadamente 82%), em temperaturas de 40 e 60°C. Os resultados mostram que quanto maior a temperatura de secagem, menor o tempo de secagem (BOURSCHEIDT *et al.*, 2011).

O teor de umidade de equilíbrio ( $U_E$ ) obtido para o pseudocaule para cada uma das três temperaturas testadas (50, 60 e 70°C) foi de 4,90, 4,05 e 4,26%, respectivamente. Este parâmetro indica a quantidade de água que é retida intimamente na estrutura do sólido, ou em poros delgados, que não foi removida nas condições operacionais de secagem empregadas. Em estudos de secagem de resíduos sólidos urbanos, Ruiz e Wisniewski (2008) obtiveram umidade de equilíbrio da amostra de 5,2%.

A partir das curvas cinéticas ajustadas da Figura 20 foram obtidos os valores da velocidade de secagem (conforme apresentado na Figura 21), calculados a partir da tangente do ângulo de inclinação destas curvas (TRINDADE *et al.*, 2011).

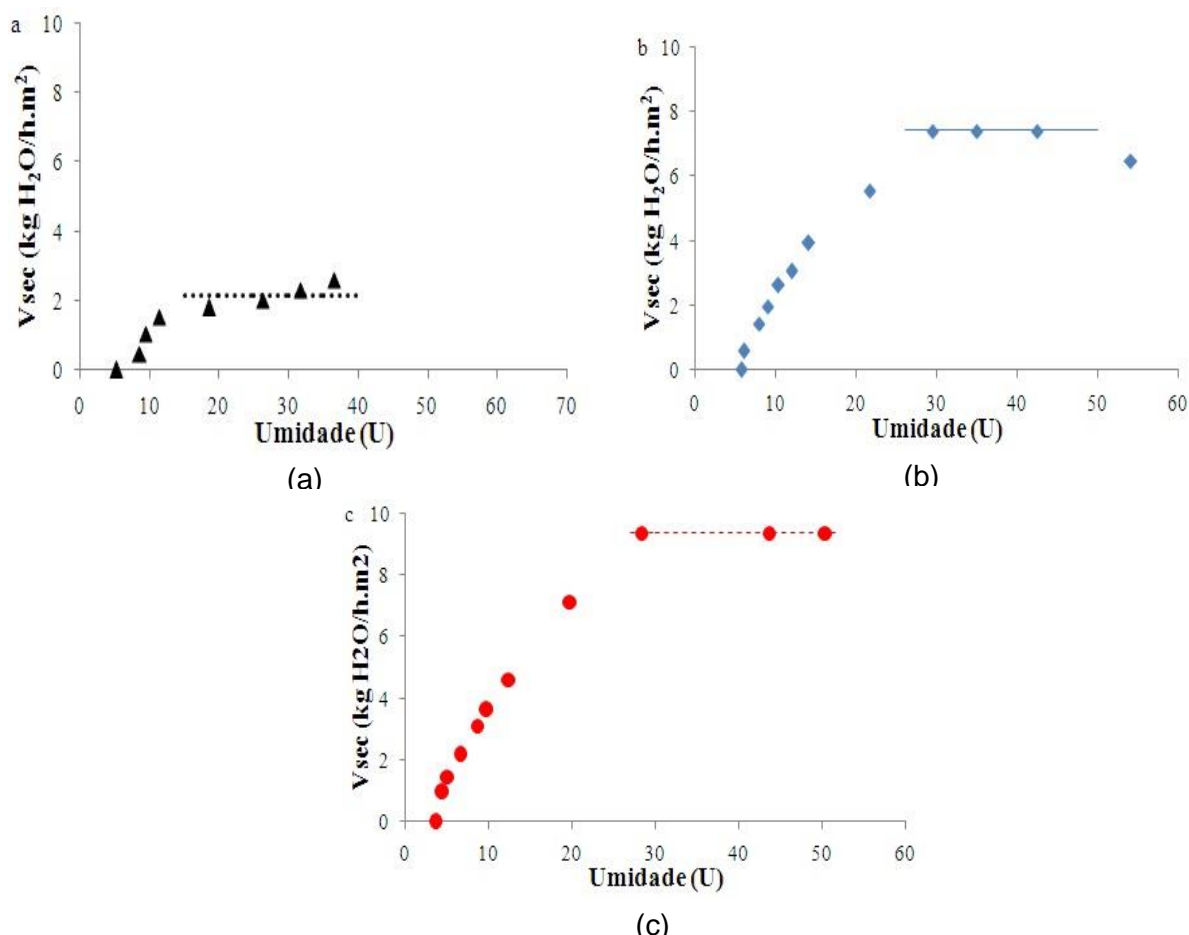


Figura 21 - Velocidade de secagem em função da variação do teor de umidade (U) do pseudocaule da bananeira: a) 50 °C, b) 60 °C, c) 70 °C.

Observa-se na Figura 21 (a), curva a 50 °C, que entre 10 e 40% de umidade, a secagem ocorreu a uma velocidade constante de praticamente 2,14  $\text{kg H}_2\text{O/h.m}^2$ . A 60 °C (Figura 21 b), a velocidade constante de 7,41  $\text{kg H}_2\text{O/h.m}^2$  ocorreu entre os teores de umidade de 26 e 50%. Na Figura 21 (c) (secagem a 70°C), verifica-se que entre 27 e 52% de umidade, a velocidade de secagem é constante, na ordem de 9,38  $\text{kg H}_2\text{O/h.m}^2$ .

Os valores de velocidade de secagem no período inicial de cada um dos ensaios, ou seja, para os maiores valores de  $U$ , não foram calculados em função da ausência de maior número de pontos experimentais durante esta fase, o que também levou a diferentes comportamentos como observado nos gráficos da Figura 20. O comportamento da velocidade no início do processo de secagem é importante, pois pode indicar o tipo de estrutura física do material e a forma de distribuição da água no seu interior.

A taxa de secagem pode ser acelerada com o aumento da temperatura do ar de secagem e, ou, com o aumento do fluxo de ar que passa pelo produto por unidade de

tempo. A quantidade de ar utilizada para a secagem depende de vários fatores. Entre eles a umidade inicial do produto e a espessura da camada (GOUVEIA *et al.*, 2003).

Yoshida e Menegalli (2000) secaram milho superdoce a uma temperatura de 50 °C e velocidade do ar de 1,28 e 0,75 m/s, concluindo que a taxa de secagem tem um pequeno aumento, quando se trabalha com valores de velocidade maiores, podendo-se considerar que a velocidade do ar tem um pequeno efeito sob as curvas de secagem quando comparada a temperatura, a qual exerce maior influência do que a velocidade do ar de secagem (GOUVEIA *et al.*, 2003).

Segundo Foust *et al.* (1982), a maioria dos sólidos orgânicos, como as biomassas estudadas, ou é amorfa, ou fibrosa ou gelatinosa, e constitui a segunda classe principal de materiais. Estes materiais retêm a umidade como parte integral da estrutura do sólido, ou então a retêm no interior de fibras ou de poros delgados internos.

Nestas substâncias, o movimento da umidade é lento e provavelmente ocorre pela difusão do líquido através da estrutura do sólido. Por isso, as curvas de secagem das substâncias mostram períodos de taxa constante muito curtos, que terminam em valores elevados do teor crítico de umidade. Pelas mesmas razões, o primeiro período de taxa decrescente é muito reduzido, e a maior parte do processo de secagem ocorre no segundo período de taxa decrescente.

A briquetagem dos resíduos de pseudocaule, bem como, a determinação da densidade foram realizadas utilizando as amostras de pseudocaule secas a 70 °C, visando menor tempo no processo de preparação do mesmo.

## 4.2 Análises químicas aproximada e elementar

Nos itens a seguir são apresentados os resultados das análises químicas aproximada e elementar, dos resíduos agrícolas pseudocaule e folha de bananeira, ambos secos e triturados e do resíduo agroindustrial casca de arroz *in natura*, e os resultados das análises químicas dos briquetes produzidos a partir dessas biomassas.

Os resultados da análise estatística realizada para os valores obtidos da análise aproximada e que apresentaram igualdade estatística podem ser visualizados nas tabelas do Anexo I.

## 4.2.1 Resíduos

### 4.2.1.1 Análise química aproximada

Na Figura 22, são apresentados os resultados obtidos na análise química aproximada, dos resíduos agrícolas pseudocaule e folha de bananeira após os processos de secagem e cominuição, e do resíduo agroindustrial *in natura* casca de arroz.

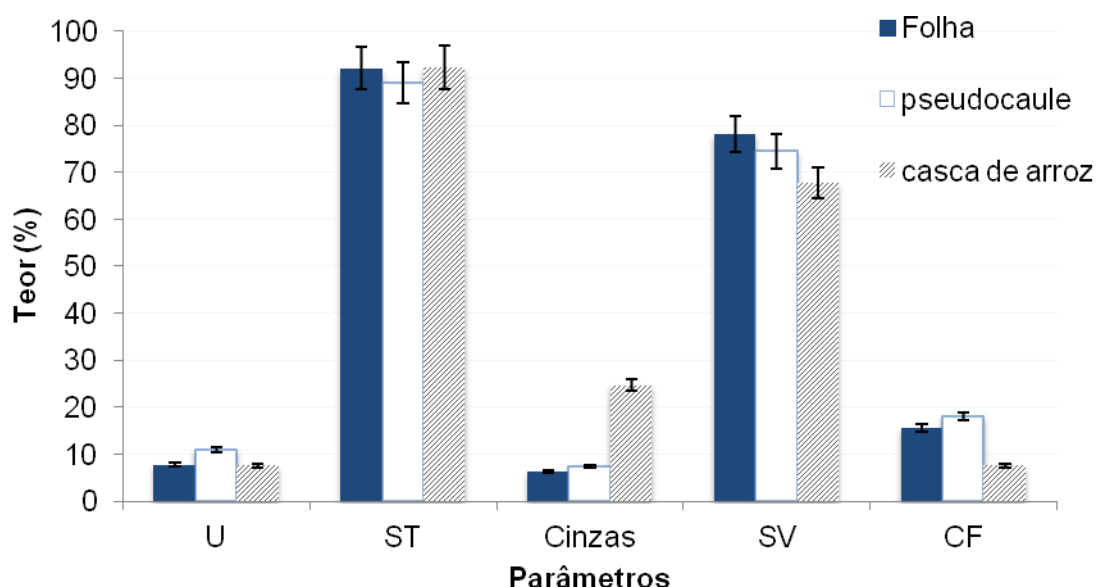


Figura 22 - Teor de umidade (U), sólidos totais (ST), cinzas, sólidos voláteis (SV) e carbono fixo (CF) dos resíduos secos folha e pseudocaule de bananeira e casca de arroz *in natura*.

A partir da Figura 22, observa-se que os teores de umidade para os resíduos (a) de folha, pseudocaule (após secagem) e casca de arroz foram de  $7,81 \pm 0,30$  %,  $10,90 \pm 0,29$  % e  $7,61 \pm 0,09$  %, respectivamente. A casca de arroz e a folha apresentaram umidade média semelhante. Esses valores encontram-se na faixa ideal de umidade, de 8 a 15%, para serem transformados em briquetes, conforme afirmado por Gonçalves (2010), Wilaipon (2009) e Gentil (2008).

Segundo Moers *et al.* (2011), o controle da umidade em biomassas vegetais para produção de briquetes é importante devido ao consumo de energia durante a combustão dos mesmos. De acordo com QUIRINO (1991), máquinas briquetadeiras de pistão hidráulico aceitam materiais com até 20% de umidade.

A umidade das biomassas interfere diretamente em outros parâmetros como o poder calorífico inferior, que decresce com o aumento da umidade, e a condutividade térmica (QUIRINO, 1991; MOERS *et al.*, 2011).

Os teores de sólidos totais foram de  $92,18 \pm 0,3\%$  para os resíduos de folha,  $89,10 \pm 0,3\%$  para o pseudocaule e  $92,38 \pm 0,09\%$  para a casca de arroz.

Os teores de sólidos voláteis foram de  $78,17 \pm 0,8\%$  para as folhas, de  $74,52 \pm 3\%$  para o pseudocaule e de  $67,75 \pm 3,9\%$  para a casca de arroz, semelhante aos determinados por Felfli *et al.*, (2011), com um teor de  $73,2\%$  para casca de café e Morais *et al.* (2006) com um teor de  $64,26\%$  para a casca de arroz, indicando a presença de matéria orgânica.

A casca de arroz apresentou teor de cinzas  $24,63 \pm 3,9\%$ , após queima em mufla. Valor muito semelhante foi encontrado por Morais *et al.* (2006), em estudos com briquetes de casca de arroz. Nesse estudo, a casca de arroz *in natura* apresentou teor de cinzas de  $24,84\%$ .

Segundo Della *et al.* (2005), após a queima da matéria orgânica contida na casca de arroz sobra a cinza de difícil degradação e com pouquíssimos nutrientes para o solo, contendo aproximadamente de 95 a 98% de sílica no estado amorfo, o que contribui para o elevado teor de cinzas nessa biomassa.

Os resíduos da bananicultura apresentaram teores de cinzas muito próximos, de  $6,23 \pm 0,42\%$  para a folha e de  $7,42 \pm 0,17\%$  para o pseudocaule. Fernandes (2012), em estudo sobre pirólise, obteve valores de cinzas para folha e pseudocaule de bananeira de  $7,44\%$  e  $8,04\%$  respectivamente.

A quantidade de cinza é um dado importante quando a biomassa for empregada como combustível em caldeiras, pois em altas temperaturas podem fundir e provocar incrustações nos equipamentos. A cinza residual é indesejável, portanto quanto menor o teor melhor é a qualidade do combustível (GENTIL, 2008; ALVES *et al.*, 2012; OLADEJI, 2010). Em alta concentração, podem diminuir o poder calorífico, e ainda causar perda de energia e sua presença afeta também a transferência de calor (MOERS *et al.*, 2011).

Ainda conforme a Figura 22 observa-se que a casca de arroz apresentou teor de  $7,61 \pm 0,09\%$  de carbono fixo. Valores semelhantes de carbono fixo foram encontrados em estudos de Felfli *et al.* (2011) com outras biomassas, como casca de café e serragem. Vieira (2012) em estudo sobre carbonização da casca de arroz obteve um teor de carbono fixo inferior ( $3,48\%$ ) ao obtido neste trabalho.

O teor de carbono fixo está relacionado à quantidade de cinzas e volátil, pois o mesmo representa a massa restante após a saída de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de umidade (VIERA, 2012).

A folha e o pseudocaule apresentaram teores de carbono fixo semelhantes, de  $15,59 \pm 0,4\%$  e  $18,05 \pm 3,8\%$ , respectivamente, os quais foram superiores ao teor de

carbono fixo da casca de arroz. Com relação ao carbono fixo tem-se que quanto maior este valor maior o calor gerado na combustão (SILVEIRA, 2008).

#### 4.2.1.2 Análise química elementar

Na Figura 23 são apresentados os resultados obtidos na análise química elementar, dos resíduos agrícolas pseudocaule e folha de bananeira, ambos secos e triturados e do resíduo agroindustrial casca de arroz *in natura*.

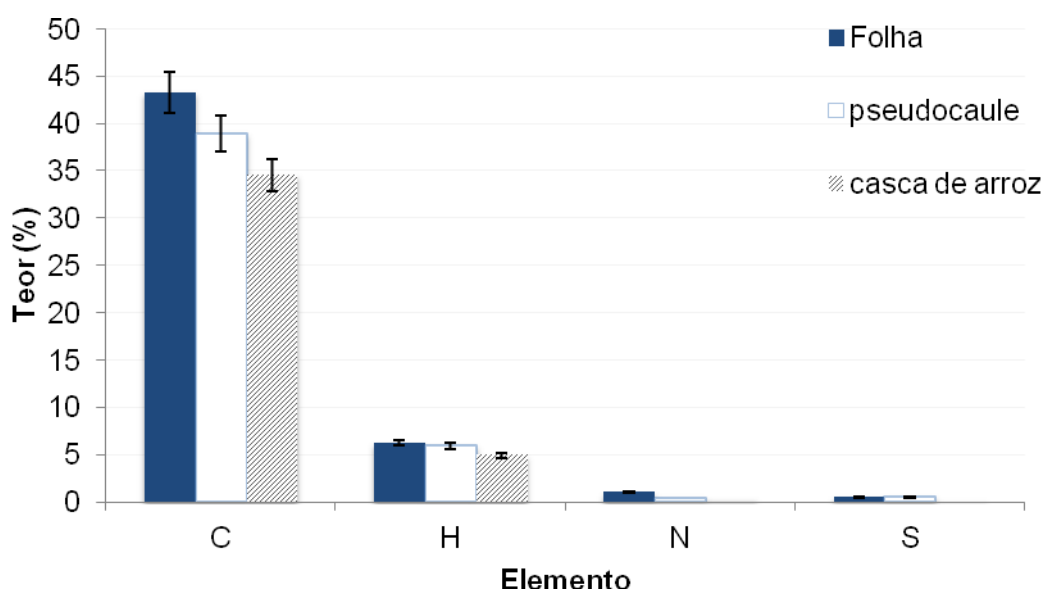


Figura 23 - Teor de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S) dos resíduos secos folha e pseudocaule de bananeira e casca de arroz *in natura*.

Conforme a Figura 23, as folhas de bananeira apresentaram teor de carbono de  $43,28 \pm 0,14$  %, o pseudocaule de  $38,92 \pm 0,4$  %, casca de arroz de  $34,55 \pm 1,68$  %. Morais *et al.* (2006) obtiveram para a casca de arroz *in natura*, teor de carbono de 32,37 %.

Fernandes (2012), também caracterizou folhas e pseudocaule de bananeira, obtendo um teor de carbono de 43,48 % e 33,38 %, respectivamente. Quanto maior o teor de carbono, maior é o potencial combustível da biomassa, ou seja, maior seu poder calorífico (CAMARGO, 2006).

Outras biomassas estudadas apresentaram teores de carbono semelhantes, como espiga de milho, de 40,50 % (WILAIPON, 2007), casca de banana, de 41,47 % (WILAIPON, 2009), casca de café, de 47,5 % (FELFLI *et al.*, 2011) e caroço de açaí com 48 % (NOGUEIRA, 2008).

A casca de arroz apresentou teor de hidrogênio de  $4,93 \pm 0,17$  %, e o pseudocaule, de  $5,93 \pm 0,12$  %, enquanto a folha da bananeira apresentou valor um pouco mais elevado, de  $6,24 \pm 0,02$  %. Teores similares foram encontrados para a casca de arroz por *Morais et al.* (2006), de 4,29 %, e por *Felfli et al.* (2011), de 5,2% também para a casca de arroz, e por *Wilaipon* (2009), de 5,68%, para casca de banana. O hidrogênio, assim como o carbono, durante a combustão são oxidados e geram energia na forma de calor.

Foram encontrados baixos teores de nitrogênio e enxofre, para as três biomassas estudadas assim como obtidos por *Fernandes* (2012), em estudos com folha e pseudocaule de bananeira e *Chou et al.* (2009) para casca de arroz.

## 4.2.2 Briquetes

### 4.2.2.1 Análise química aproximada

Os briquetes produzidos a partir das biomassas estudadas, casca de arroz, folha e pseudocaule de bananeira apresentaram resultados a partir da análise química aproximada, semelhantes aos resíduos de origem, conforme ilustrado na Figura 24.

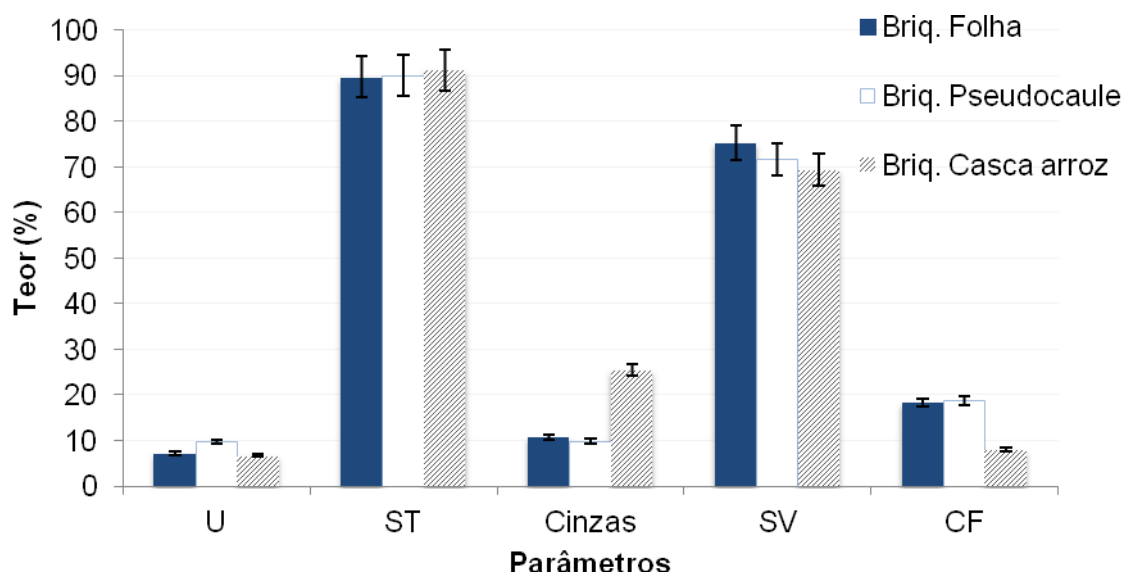


Figura 24 - Teor de umidade (U), sólidos totais (ST), cinzas, sólidos voláteis (SV) e carbono fixo (CF) dos briquetes produzidos.

Os briquetes de folha, pseudocaule e casca de arroz apresentaram teores de umidade de  $7,17 \pm 0,31$  %,  $9,74 \pm 0,37$  % e  $6,68 \pm 0,33$  %, respectivamente, sendo que para os briquetes de casca de arroz e folha de bananeira os valores foram semelhantes.



Esses valores foram ligeiramente inferiores aos resíduos inicialmente utilizados. Estes resultados podem ser explicados pelo pequeno aquecimento que ocorre naturalmente na máquina briquetadeira, no momento da compactação dos resíduos, reduzindo a umidade final dos briquetes.

Os baixos valores de umidade dos briquetes são fatores importantes se comparados com a umidade da lenha, em torno de 25 a 35 %, pois são muito mais resistentes ao apodrecimento ou à fermentação que os resíduos na condição natural, facilitando a estocagem e o transporte (QUIRINO, 1991).

Briquetes de madeira, geralmente com umidade na faixa de 5 % a 15 %, têm se mostrado mais competitivos do que a lenha, principalmente na época de chuva, quando essa está molhada (GENTIL, 2008).

Teores de umidade acima de 70 % podem comprometer uma queima eficiente dos briquetes e afetam a qualidade da chama durante a combustão (MOERS *et al.*, 2011). No início do processo, ocorre consumo de energia para evaporar a água presente nestes materiais, contribuindo negativamente no balanço global de energia, reduzindo a energia gerada que se pretende aproveitar.

Os briquetes de folha e pseudocaule de bananeira e casca de arroz apresentaram teores de sólidos totais de  $89,70 \pm 0,9$  %,  $90,07 \pm 1,5$  % e  $91,20 \pm 0,9$  %, respectivamente. Os teores de sólidos voláteis para os briquetes das três biomassas foram muito próximos, de  $75,3 \pm 0,8$  %;  $71,7 \pm 1,1$  %; e  $69,44 \pm 1,3$  %, respectivamente, para folha, pseudocaule e casca de arroz. Oladeji (2010) obteve briquetes em prensa hidráulica de casca de arroz e palha de milho com teores de sólidos voláteis de 67,98 e 86,53 %, respectivamente. Teores elevados de sólidos voláteis indicam a facilidade com que o material entra em combustão (GENTIL, 2008).

Em estudos com a espécie vegetal Sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia*), o teor de voláteis para o material seco e triturado (caule) foi de  $79,09 \pm 1,82$  % e para o material compactado de  $70,89 \pm 0,33$  % (ALVES *et al.*, 2012).

Os briquetes apresentaram valores de cinzas de  $10,70 \pm 1,03$ % para a folha,  $9,85 \pm 0,25$  % para o pseudocaule e  $25,43 \pm 0,70$  % para a casca de arroz. Os briquetes apresentaram o mesmo comportamento dos resíduos com teores de carbono fixo baixos para o briquete de casca de arroz, de  $7,99 \pm 0,01$  % e teores mais elevados para os briquetes de folha, de  $18,25 \pm 0,4$  3% e de  $18,74 \pm 0,66$  % para pseudocaule, assim como os briquetes de folha de sabiá, que apresentaram teores de carbono fixo de 20,76 % (ALVES *et al.*, 2012). Oladeji obteve briquetes em prensa hidráulica de casca de arroz e palha de milho com teores de carbono fixo de 14,4 e 12,07 %, respectivamente.

#### 4.2.2.2 Análise química elementar

Na Figura 25 são apresentados os resultados da análise química elementar das amostras dos briquetes produzidos com os três resíduos estudados. Os resultados indicam os teores dos elementos carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre nas amostras.

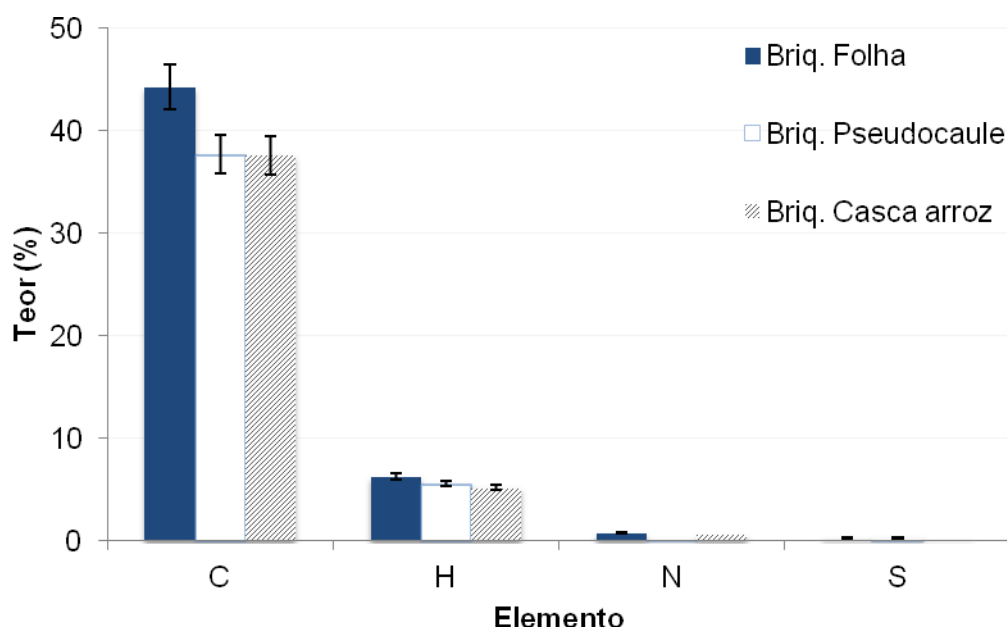


Figura 25 - Teor de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S) dos resíduos secos folha e pseudocaule de bananeira e casca de arroz in natura.

Conforme a Figura 25, o briquete de casca de arroz apresentou um teor de carbono de  $37,59 \pm 0,8$  %. Os briquetes de folha e pseudocaule de bananeira apresentaram teores de carbono de  $44,28 \pm 0,2$  % e  $37,69 \pm 1,80$  %, respectivamente.

O teor de hidrogênio para o briquete de folha de bananeira foi de  $6,23 \pm 0,03$  % e para o pseudocaule  $5,58 \pm 0,43$  %. Teores similares foram encontrados por Oladeji (2010) 5,8 % para o briquete de casca de arroz. Quanto maior este teor, maior é o poder calorífico do material.

Foram encontrados baixos teores de nitrogênio e enxofre, para os briquetes produzidos assim como obtidos por Oladeji (2010) para briquetes de casca de arroz e palha de milho. Estes resultados em todas as amostras são favoráveis, pois implicam em baixa geração de óxidos de enxofre e nitrosos durante processo de combustão, os quais são gases tóxicos e corrosivos (OLADEJI, 2010; SÄNGER *et al.* 2001). Briquetes de casca de arroz estudados por Morais *et al.* (2006), também apresentaram valores reduzidos de nitrogênio e enxofre.

As diferenças nos resultados obtidos neste trabalho quando comparados com a literatura podem ser explicadas por possíveis diferenças e falta de dados na metodologia empregada, e também pelas diferenças geográficas e características do ambiente que interferem nas propriedades finais das culturas.

### 4.3 Avaliação do comportamento térmico

#### 4.3.1 Resíduos de folha e pseudocaule de bananeira e casca de arroz

Nas Figuras 26, 27 e 28 estão apresentadas as curvas de ATG e ATD em atmosfera oxidante das amostras de folha e pseudocaule de bananeira e casca de arroz.

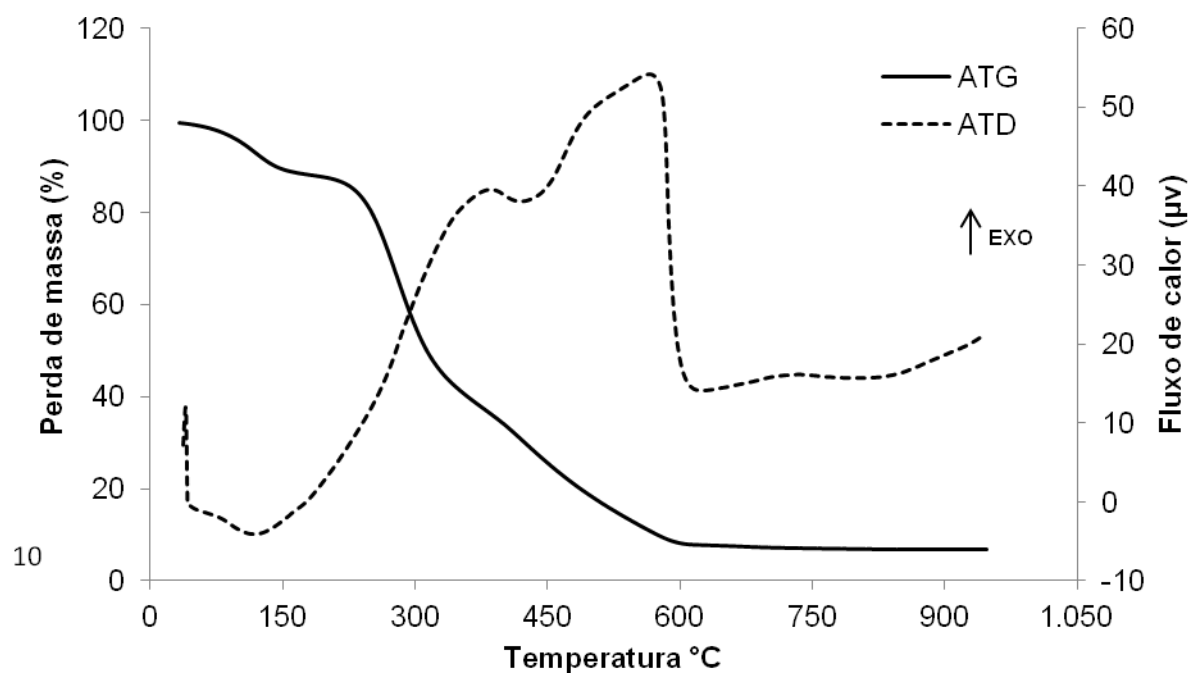


Figura 26 - ATG e ATD das amostras de folha de bananeira.

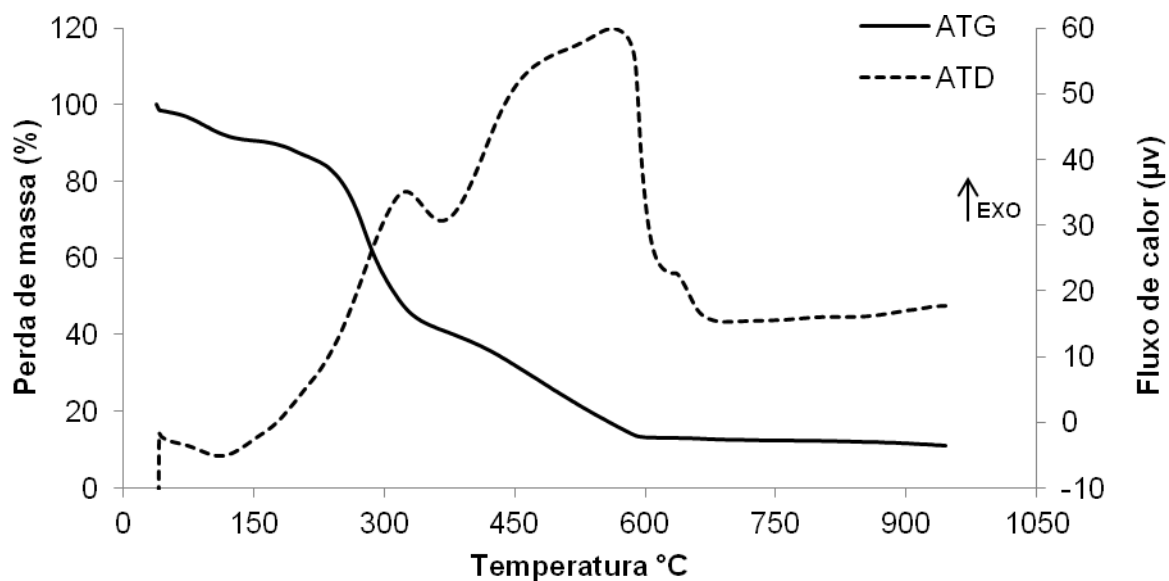


Figura 27 - ATG e ATD das amostras de pseudocaule de bananeira

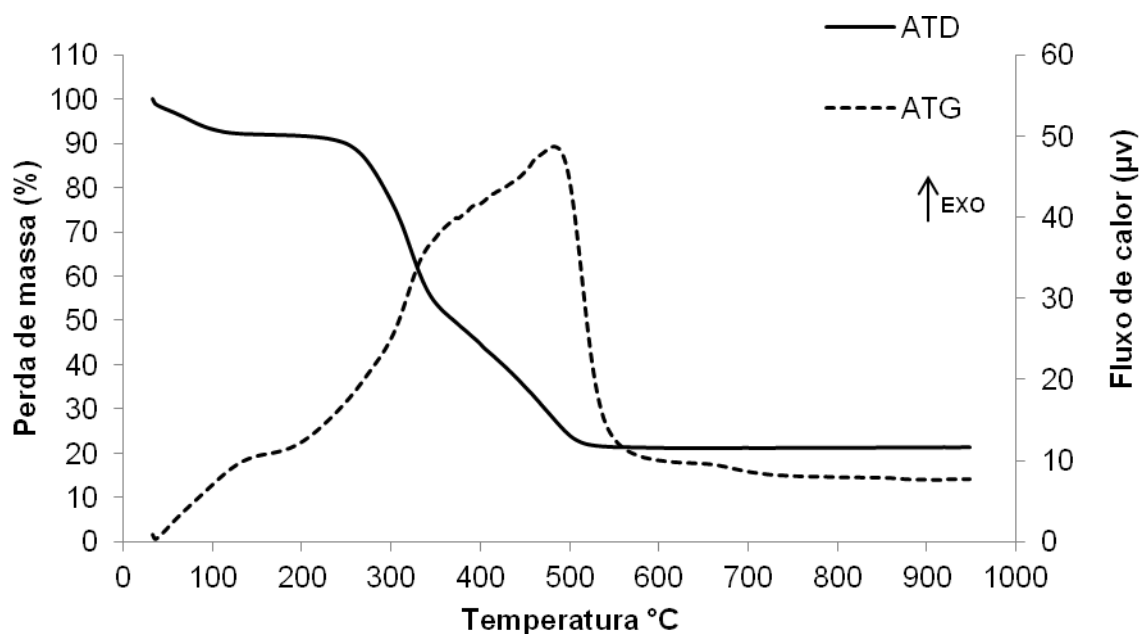


Figura 28 - ATG e ATD das amostras de casca de arroz *in natura*.

Os resíduos apresentaram três estágios de degradação térmica. O primeiro ocorreu da temperatura ambiente até aproximadamente 150°C, o qual está relacionado à perda de umidade das amostras, correspondente a uma perda de massa de 9,25 % para as folhas (Figura 26), 10,27 % para o pseudocaule (Figura 27) e 7,94 % para a casca de arroz

(Figura 28). Estes valores são próximos aos valores encontrados por análise aproximada, apresentados anteriormente.

No segundo estágio, compreendido entre 140 °C e 520 °C, para a casca de arroz, entre 145 °C e 585 °C, para a folha e entre 136 °C e 560 °C para o pseudocaule de bananeira ocorreu a maior perda de massa, atribuída à degradação de materiais voláteis e da hemicelulose, celulose e parte da lignina, constituintes das biomassas, com perdas mássicas para as amostras de folhas, pseudocaule e casca, de 80,33 %, 87,92 % e 72,66 %, respectivamente. Nesse estágio também é possível identificar as temperaturas de ignição do processo de combustão das biomassas (DEMIRBAS, 2003).

No terceiro estágio, as perdas de massa são relativas à parte da lignina que ainda não havia sido degradada e representam os compostos inorgânicos restantes das amostras como a sílica, que correspondem em média a 16,52 % em massa da casca de arroz. Os resultados indicam que 89,58 % da folha de bananeira se decompõem em até 585 °C, 98,19 % da estrutura do pseudocaule se decompõe em 560 °C e 80,6 % das amostras de casca de arroz *in natura* se decompõem em até 520 °C.

Ainda conforme as figuras 26 e 27 observa-se que as folhas e o pseudocaule apresentaram eventos endotérmicos significativos ocorridos para as amostras na faixa de temperatura entre aproximadamente 50 e 170 °C com um pico em 124 °C para as folhas e entre 50 e 160 °C com um pico em 120 °C para o pseudocaule. Estes eventos endotérmicos correspondem à perda de umidade.

Souza *et al.* (2007) em estudos com casca de arroz nas mesmas condições deste trabalho, verificaram que 99% da amostra de casca de arroz *in natura*, se decompôs em até 475 °C.

As curvas de degradação térmica de casca de girassol, em atmosfera oxidante, apresentadas por Demirbas (2003), apresentaram as primeiras perdas de massa entre 126 e 230 °C, que representa a liberação de alguns compostos voláteis e o início da ignição da biomassa. Entre 326 e 426°C ocorreu uma rápida e a maior perda de massa.

Da mesma forma como observado nas curvas de ATG, as três amostras apresentaram comportamento térmico semelhante em ATD para os resíduos.

As folhas e o pseudocaule apresentaram eventos endotérmicos significativos ocorridos para as amostras na faixa de temperatura entre aproximadamente 50 e 170 °C com um pico em 124 °C para as folhas e entre 50 e 160 °C com um pico em 120 °C para o pseudocaule. Estes eventos endotérmicos correspondem à perda de umidade. A casca de arroz não apresentou um evento endotérmico significativo, devido a pouca umidade que as amostras apresentavam.

Os picos exotérmicos correspondem aos estágios de degradação térmica das frações de hemicelulose, celulose e lignina, gradativamente. A maior liberação de energia, na qual ocorre a degradação dos materiais voláteis, foi observada para todas as amostras no terceiro evento ocorrido para as folhas em 558 °C, para o pseudocaule em 550 °C e para a casca de arroz em 475 °C.

Souza *et al.* (2007) em ensaios com casca de arroz em atmosfera oxidante, obtiveram picos exotérmicos, em forma de bandas, com máximos em 323, °C, 384 °C e 424,7 °C, nos quais ocorreram a combustão dos extrativos, celulose, hemicelulose e lignina. Após aproximadamente 700 °C, o processo se tornou estável para as três amostras.

#### 4.3.2 Briquetes

Nas Figuras 29, 30 e 31 estão apresentadas as curvas de ATG e ATD em atmosfera oxidante das amostras dos briquetes confeccionados a partir dos resíduos secos de folha e pseudocaule de bananeira e da casca de arroz *in natura*.

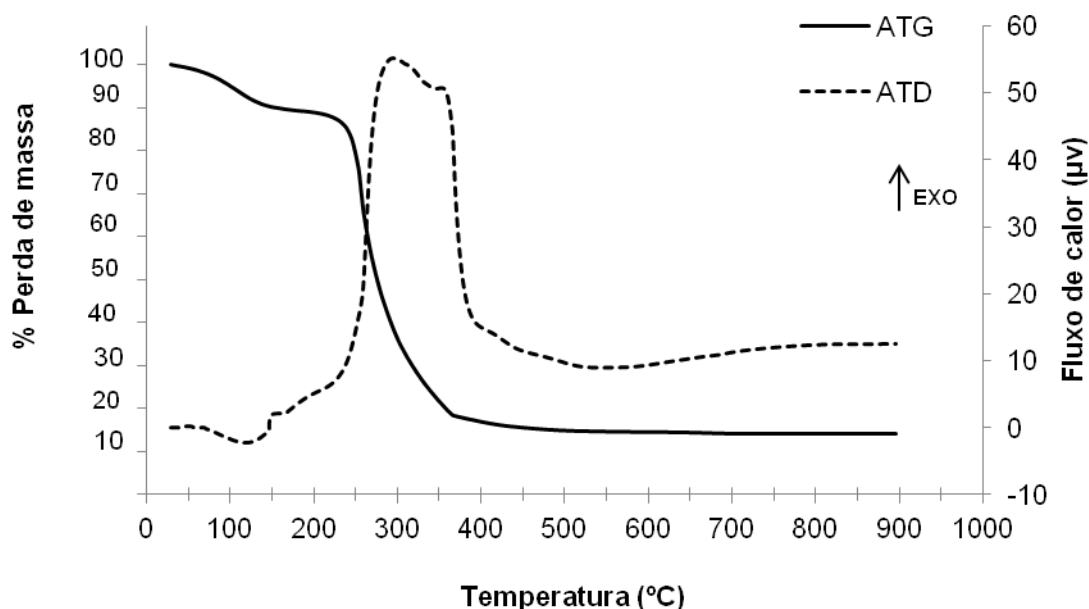


Figura 29 - ATG e ATD das amostras de briquetes de folha de bananeira.

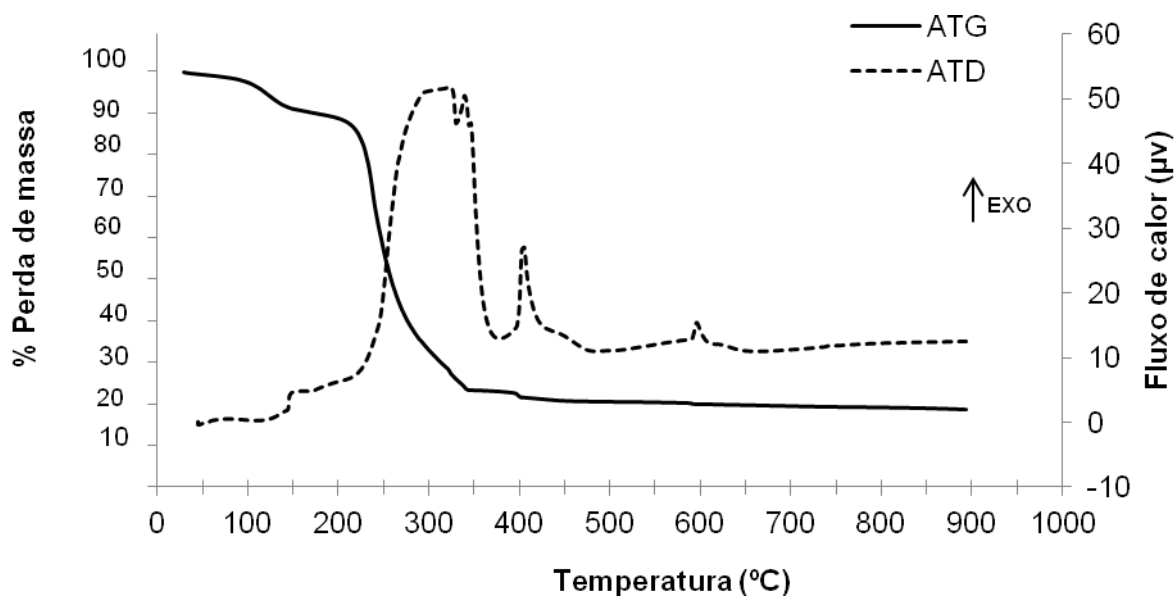


Figura 31 - ATG e ATD das amostras de briquetes de pseudocaule de bananeira.

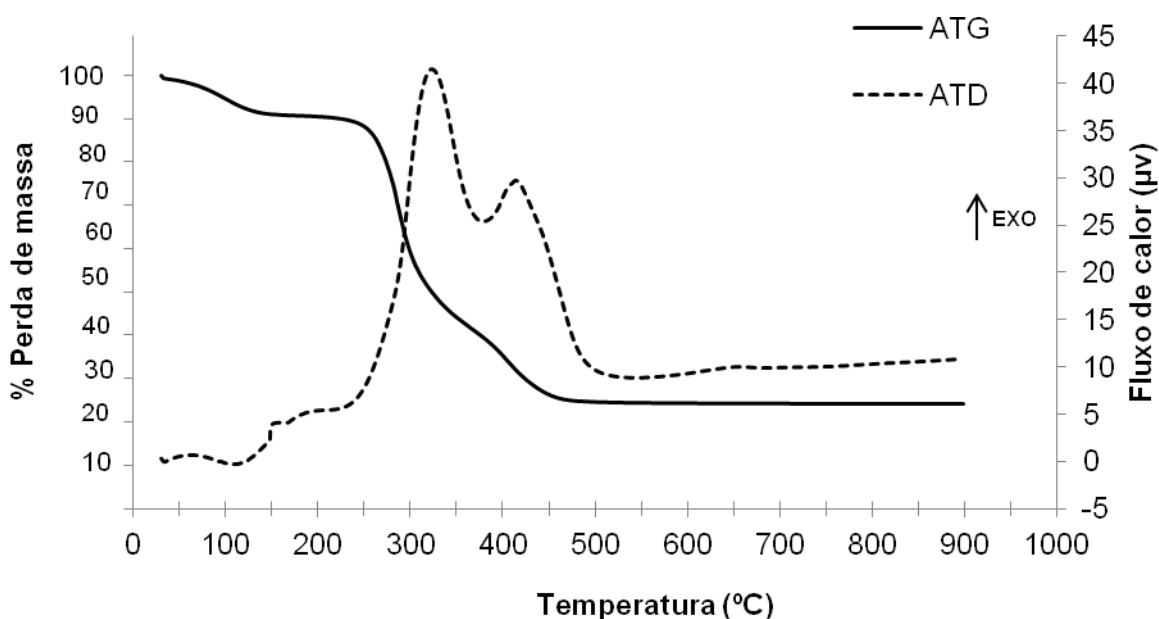


Figura 32 - ATG e ATD das amostras de briquetes de casca de arroz.

A perda de umidade representada no primeiro estágio foi de 9,2 % para o briquete de folha (Figura 29), 11 % para o briquete de pseudocaule (Figura 30) e 8,2 % para o briquete de casca de arroz (Figura 31).

No segundo estágio, ocorreram as maiores perdas de massa, resultado da degradação da hemicelulose, celulose e parte da lignina, representando uma perda de massa de 87,8 %, 69,8 % e 76,5 % para os briquetes de folha, pseudocaule e casca de

arroz respectivamente. Wilaipon (2007), em estudos com briquetes de palha de milho, obteve a máxima perda de massa na temperatura de 353 °C representando 55 % da massa.

Acima de 500 °C, no terceiro estágio, ocorreram perdas de massa menos significativas, tanto para os resíduos quanto para os briquetes, até aproximadamente 1000 °C, que representa a cinza resultante da degradação da celulose e da lignina remanescentes.

A casca *in natura* e o briquete de casca de arroz apresentaram-se mais estáveis termicamente do que a folha e o pseudocaule de bananeira, o que pode estar relacionado ao maior teor de sólidos fixos (cinzas) presentes, fato este verificado pelo maior teor de resíduo para a casca ao final da análise, de aproximadamente 22 % para os resíduos e o briquete, enquanto que para as amostras de bananeira ficou em torno de 15 %.

A partir das curvas ATD observadas nas figuras 29, 30 e 31, constatou-se que ocorreram picos endotérmicos em 106 °C para o briquete de folha, em 85 °C para os briquetes de pseudocaule e em 80 °C para o briquete de casca de arroz.

A maior liberação de energia foi observada para os briquetes de folha de bananeira e ocorreu na temperatura de 286 °C. Os outros briquetes, de pseudocaule e casca de arroz, apresentaram maior liberação de energia em 300 °C e 315 °C, respectivamente.

As propriedades térmicas apresentadas para todas as amostras indicam potencial para os resíduos serem utilizados como biomassa combustível na forma de briquetes em processo de combustão.

#### 4.4 Avaliação do poder calorífico e densidade energética

Os resultados das análises de poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI) da casca de arroz, folhas e pseudocaule de bananeira e dos briquetes produzidos, obtidos por bomba calorimétrica estão destacados e apresentados na Tabela 3. Outros resultados foram obtidos da literatura, todos determinados por bomba calorimétrica, para fins comparativos entre as diferentes biomassas e briquetes.



Tabela 3 – Comparação entre poder calorífico das amostras estudadas com a literatura.

Biomassa	Poder Calorífico (MJ/kg)	
	PCS	PCI
Casca de arroz <sup>1</sup>	15,7±0,3	13,02±0,4
Folha de bananeira <sup>1</sup>	17,1±0,3	15,6±0,3
Pseudocaule de bananeira <sup>1</sup>	13,7±0,1	12,2±0,1
Briquete casca de arroz <sup>1</sup>	18,10±0,5	16,6±0,5
Briquete folha de bananeira <sup>1</sup>	17,70±0,2	16,2±0,2
Briquete Pseudocaule de bananeira <sup>1</sup>	14,9±0,1	13,4±0,1
Casca de banana <sup>2</sup>	18,89	-
Casca de semente de algodão <sup>3</sup>	18,68	-
Serragem de madeira <sup>3</sup>	18,96	-
Bagaço de cana <sup>4</sup>	15,48	-
Casca de café <sup>5</sup>	18,4	-
Serragem <sup>5</sup>	18	-
Palha de milho <sup>6</sup>	-	15,7
Briquete de palha de milho <sup>7</sup>	20,89	-
Briquete de casca de arroz <sup>7</sup>	13,38	-
Briquete casca de coco verde <sup>8</sup>	17,99	-

<sup>1</sup>Bomba calorimétrica; <sup>2</sup> Wilaipon (2009); <sup>3</sup> Morais (2007); <sup>4</sup> Quirino *et al.* (2004); <sup>5</sup>Felfli *et al.* (2011); <sup>6</sup>ABIB (2011); <sup>7</sup>Oladeji (2010); <sup>8</sup> Silveira (2008).

Na Tabela 4, podem ser visualizados os valores da densidade aparente e energética dos resíduos e dos briquetes compactados com tempo de 1 segundo.

Tabela 4 - Densidade aparente e energética dos resíduos e dos briquetes.

Resultados	Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade energética (MJ/m <sup>3</sup> )
Folha de Bananeira	46 ±1,82	786,6
Pseudocaule de Bananeira	153±0,07	2.096,1
Casca de arroz	104±0,1	1.632,8
Briquete de folha	990±0,05	17.523
Briquete de pseudocaule	990±0,06	14.751
Briquete de casca de arroz	900±0,05	16.290

A partir da Tabela 3, observa-se que o poder calorífico superior e inferior, tanto para os briquetes quanto para os resíduos, apresentaram resultados similares aos de outras biomassas estudadas. De acordo com Oladeji (2010), estes valores de energia são suficientes para produzir calor necessário para cozinhar em equipamentos domésticos e para pequenas aplicações em escala industrial. Os valores apresentados nas Tabelas 3 e 4 evidenciam o fato de que os resíduos na forma compactada (briquetes) apresentaram um poder calorífico superior aos resíduos secos *in natura*. Este fato pode ser explicado pela maior densidade dos resíduos quando são compactados, o que aumenta consequentemente os valores de densidade energética.

O briquete de pseudocaule, assim como o resíduo seco apresentou valores de poder calorífico (superior e inferior), um pouco inferior a das outras biomassas avaliadas. Este fator pode estar relacionado, principalmente, ao maior teor de umidade presente no pseudocaule tanto como o resíduo seco quanto como o briquete.

Os resultados indicam que o melhor comportamento de maneira geral foi observado para os resíduos e os briquetes de folha de bananeira, pois apresentaram alto valor de poder calorífico, os maiores valores de densidade energética, os menores valores de cinzas e os maiores teores de carbono e hidrogênio, comparados com as outras amostras, o que é desejável em um combustível sólido (OLADEJI, 2010; NOGUEIRA, 2008). A biomassa e o briquete de folha também apresentaram os maiores resultados de materiais voláteis. Quanto maior o teor de voláteis maior será a reatividade e consequentemente, a ignição. Enfim, este parâmetro representa a facilidade com que uma biomassa queima (MOERS *et al.*, 2011).

A densidade aparente dos briquetes foi alta se comparada com a densidade de resíduos como casca de café ( $462 \text{ kg/m}^3$ ) e serragem de eucalipto de ( $224 \text{ kg/m}^3$ ) (PROTASIO *et al.*, 2011), e com a própria lenha que tem densidade média de  $500 \text{ kg/m}^3$  (GENTIL, 2008). Estes resultados indicam a importância da compactação dos resíduos lignocelulósicos para um melhor aproveitamento energético, pois as densidades dos resíduos juntamente com o poder calorífico superior irão influenciar diretamente na densidade energética da biomassa.

Os resultados de densidade energética para os briquetes foram similares aos de Silva e Morais (2008), que apresentaram valores para os briquetes de bagaço de cana-de-açúcar, com 10 % de umidade, da ordem de  $18.254 \text{ MJ/m}^3$ . Neste trabalho, os briquetes apresentavam densidade aparente de  $1.000 \text{ kg/m}^3$  e foram produzidos em prensa hidráulica. Silva e Morais (2008) observaram ainda que o bagaço de cana-de-

açúcar compactado apresentou um aumento de 900% na densidade energética comparado com o bagaço in natura.

Por ser um produto emergente no Brasil, não existem ainda normas regulamentadoras para a produção e utilização dos briquetes. No entanto, o Brasil vem exportando cada vez mais *pellets* e briquetes, principalmente para a Europa (ABIB, 2012). Alguns países utilizam padronizações próprias, como a Suécia (Swedish Pellet Standard SS 18 71 20 e Swedish Briquette Standard SS 18 71 21), Finlândia, Áustria (ONORM M 1735) e Alemanha (DIN 51731/DIN plus).

A norma austríaca ONORM M 1735 para briquetes de madeira mostra que as dimensões de briquetes de madeira devem estar entre 20 mm e 120 mm de diâmetro, com no máximo de 400 mm de comprimento. Na Tabela 5 são mostradas as principais especificações para briquetes de madeira, conforme a norma sueca SS 18 71 21.

Tabela 5 - Norma Sueca SS 18 71 21 para especificações de briquetes de madeira.

Propriedade	Unidade	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Dimensões- Ø	mm	min 25	min 25	min 25
Dimensões-comprimento	mm	máx 300	máx 100	
Densidade a granel	Kg/m <sup>3</sup>	> 550	> 450	> 450
Durabilidade	Massa % de finos <15 mm	≤ 8	≤ 10	> 10
Poder Calorífico Útil	MJ/kg	≥ 16,2	≥ 16,2	-
Teor de cinza	% MS	≤ 1,5	≤ 1,5	-
Teor de umidade	% bu	≤ 12	≤ 12	≤ 15
Teor de enxofre	% MS	≤ 0,08	≤ 0,08	-
Cloretos	% MS	≤ 0,03	≤ 0,03	-

Fonte: Gentil, 2008.

Os resultados apresentados para os briquetes neste estudo mostram que algumas características avaliadas estariam de acordo com a norma sueca, como o diâmetro que deve ter um valor mínimo de 25 mm, a densidade, o poder calorífico e os teores de cinzas, umidade e enxofre.

#### 4.5 Avaliação das propriedades mecânicas

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados dos ensaios de compressão mecânica e densidade aparente de três amostras de cada briquete produzido considerando os dois tempos de compactação empregados. Estes resultados são importantes para se determinar as melhores condições de armazenamento e transporte dos briquetes.

Tabela 6 – Resistência mecânica e densidade aparente dos briquetes.

Resultados	Briquete Folha de bananeira		Briquete Pseudocaule de bananeira		Briquete Casca de arroz	
Tempo de compactação (s)	0,6	1	0,6	1	0,8	1
Resistência a compressão mecânica (MPa)	3,60±2,30	5,30±1,50	9,50±3,60	15,03±3,70	19,9±0,4	19,8±5,4
Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	1000±0,06	990±0,05	1100±0,08	990±0,06	900±0,05	900±0,04

Os briquetes de pseudocaule apresentaram maiores valores de resistência à compressão comparados com os briquetes de folha de bananeira. Isto pode ser explicado pelas características das biomassas. O pseudocaule apresentou uma estrutura mais fibrosa, e de acordo com Furtado *et al.* (2010), quanto maior a proporção de fibras inteiras no material, maior será a resistência a compressão.

Furtado *et al.* (2010), em estudos com biomassa florestal, obtiveram briquetes confeccionados com pressão de compactação de 5 MPa com resistência à compressão de 16,38 MPa. Oladeji (2010) obteve briquetes de palha de milho com 2,34 MPa de resistência a compressão, os briquetes foram produzidos com pressão de compactação de 2,10 MPa em briquetadeira hidráulica.

Paula *et al.* (2011), em estudo com diversos resíduos lignocelulósicos, produziram briquetes em briquetadeira mecânica com 15 MPa de pressão de compactação, e tempo de 2 minutos. Os briquetes de serragem apresentaram densidade aparente de 868 kg/m<sup>3</sup> e resistência mecânica de 16,45 MPa. Nesse mesmo estudo, briquetes de casca de arroz apresentaram densidade aparente de 900 g/cm<sup>3</sup> e resistência mecânica de 13,32 MPa.

A variação do tempo de compactação dos briquetes foi pequena, e os valores indicam que nesse caso o tempo não foi um fator de influência na resistência mecânica dos briquetes. Na densidade aparente, o tempo de compactação também teve pouca influência nos briquetes, o que resultou em uma densidade energética determinada principalmente pelo poder calorífico das amostras.

Além do tempo e da pressão de compactação, o tipo de biomassa e o tipo de equipamento também podem influenciar na densidade e resistência mecânica dos briquetes.

#### 4.6 Avaliação da combustão dos briquetes

Os produtos da degradação térmica da biomassa consistem de umidade, materiais voláteis, e cinzas. Os voláteis são subdividida em gases, tais como hidrocarbonetos leves, monóxido de carbono, dióxido de carbono e alcatrões. Os rendimentos dependem da temperatura e da taxa de aquecimento. Algumas propriedades variam com a espécie da biomassa e dependem do ambiente de combustão (DEMIRBAS, 2003).

Nas Figuras 33 e 34 podem ser visualizadas as fotos dos briquetes de casca de arroz e dos resíduos da bananicultura, respectivamente, após a queima em churrasqueira.



Figura 33 - Amostras de briquetes de casca de arroz após 15 min de queima.



(a)



(b)

Figura 34 - Amostras de briquetes de folha (a) e pseudocaule (b) após 15 min de queima.

A queima do briquete de casca de arroz, Figura 33, foi lenta e incompleta. Não houve manutenção da chama após os 15 min de monitoramento do processo, o que pode ter ocorrido devido ao alto teor de cinzas (24,63%, conforme Figura 22) presentes na casca de arroz, dificultando também a propagação do calor para o interior do briquete. A queima incompleta pode ter ocorrido devido ao menor teor de sólidos voláteis e carbono presente nas amostras e pela menor liberação de energia quando comparada com os resíduos da bananicultura, observada nas curvas de ATD. As amostras de briquetes de folha (Figura 34-a) e de pseudocaule (Figura 34-b) demonstraram um comportamento diferente em relação à queima, comparados com os briquetes de casca de arroz. Houve total carbonização após os 15 min de monitoramento.

Na Figura 35 podem ser visualizados os teores de  $\text{CO}_2$  (a) e as concentrações CO (b) liberados durante a queima dos briquetes.

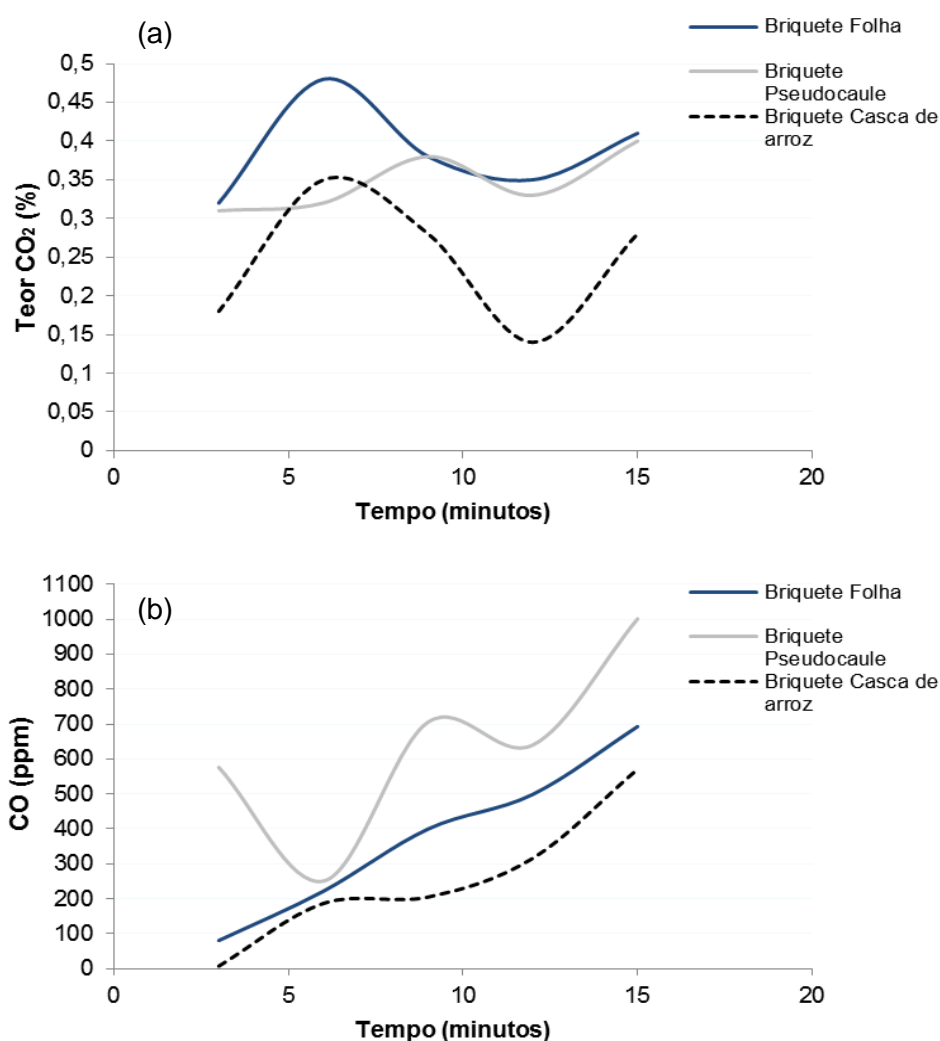


Figura 35 - Concentrações de  $\text{CO}_2$  (a) e CO (b), liberados durante a combustão dos briquetes.

Como resultado da combustão completa tem-se: dióxido de carbono, vapor d' água, óxido de enxofre e óxido de nitrogênio. Na combustão incompleta, além dessas substâncias, é produzido também o monóxido de carbono. Os briquetes de folha apresentaram a maior liberação de CO<sub>2</sub> com um pico de 0,48% em 6 min de queima, conforme a Figura 35-a. Os briquetes de casca de arroz foram os que apresentaram as menores emissões de gás carbônico, o que pode ter ocorrido em função da combustão parcial dos briquetes.

Os elevados teores de CO, observados durante a queima dos briquetes (Figura 35-b), são devidos principalmente à diminuição do oxigênio durante a combustão. O maior valor observado foi o de 1001 ppm para o briquete de pseudocaule, em 15 min, no final da medição. O oxigênio presente na biomassa fornece parte do oxigênio necessário para a combustão. Geralmente, este oxigênio não é suficiente para favorecer a queima, sendo necessário introduzir mais oxigênio na câmara de combustão (MORAIS, 2007).

Apesar da queima ser mais eficiente, comparado com o briquete de casca de arroz, a queima do briquete de folha gerou uma grande quantidade de fumaça. Na Figura 36 podem ser visualizadas as concentrações de SO<sub>2</sub> (a) e de NO<sub>x</sub> (b) liberados durante a queima dos briquetes.

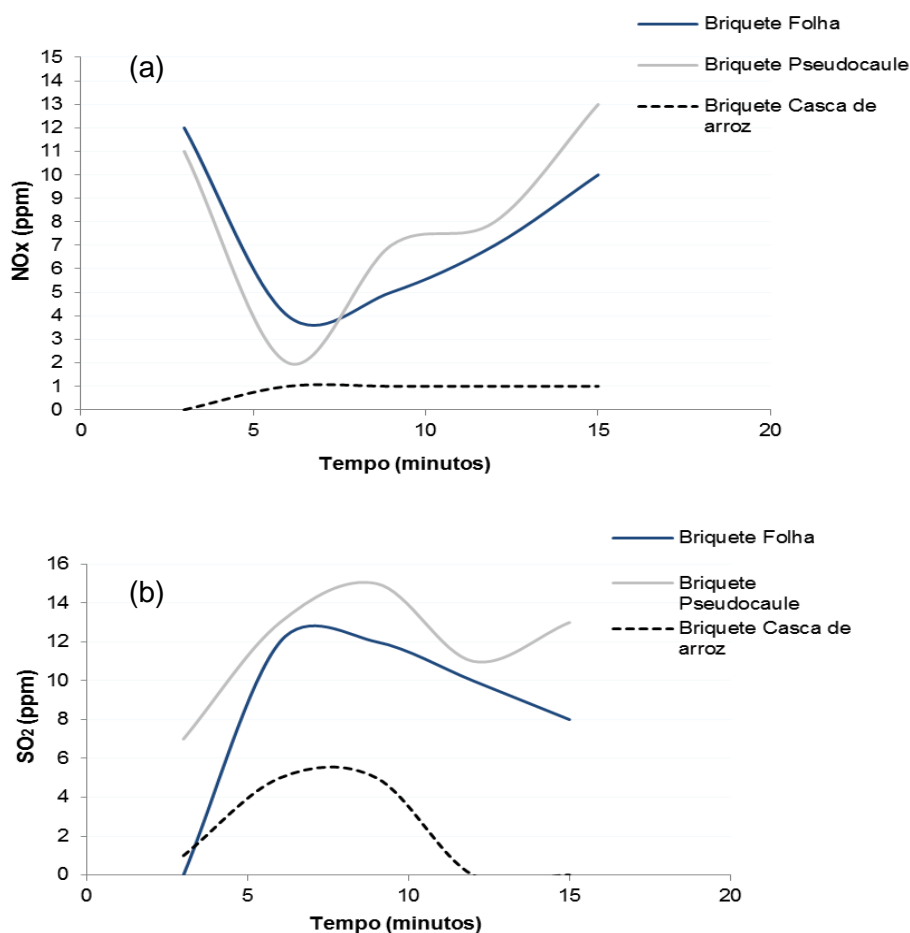


Figura 36 - Emissões de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> durante a queima dos briquetes.



Os teores de NO<sub>x</sub> (NO e NO<sub>2</sub>) e SO<sub>2</sub> emitidos durante a combustão dos briquetes foram baixos, conforme observado na Figura 36 (a) e (b), respectivamente. Os valores reduzidos de óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre são devidos, principalmente, aos baixos teores de nitrogênio e enxofre encontrados nas amostras dos resíduos e dos briquetes, determinados pela análise elementar, resultados estes favoráveis quando considerado o impacto ambiental que pode ser causado pela emissão desses gases na atmosfera.



## CONCLUSÃO

Os resultados da caracterização química das amostras de folhas, pseudocaule da bananeira e da casca de arroz por análises química aproximada e elementar mostraram que esses resíduos apresentaram composição química semelhante entre si e a outras biomassas lignocelulósicas.

Apenas o pseudocaule necessitou de secagem prévia antes da sua briquetagem. Esta operação adicional pode inviabilizar economicamente o seu uso como biomassa para combustão, necessitando ser realizada análise de viabilidade econômica do processo todo.

As análises de ATG e ATD em atmosfera oxidante mostraram a ocorrência de absorção de energia referente à umidade ainda presente nas amostras no início do processo e alta liberação de energia entre, aproximadamente, 150 e 600 °C, com máximo em torno de 580 °C para os resíduos avaliados e em 350 °C para os briquetes, faixa esta na qual ocorre a degradação do material volátil presente nas mesmas, incluindo frações lignocelulósicas, que são degradadas gradativamente até o final do processo.

Os briquetes de casca de arroz apresentaram a maior resistência à compressão e maior poder calorífico, no entanto, as maiores quantidades de cinza residual contida nos seus briquetes, bem como os menores teores de sólidos voláteis e carbono, impossibilitaram a sua queima total como combustível de churrasqueira, com conseqüente menor liberação de energia durante a combustão. De modo geral, os briquetes de folha de bananeira ressecadas apresentaram boas características térmicas e físicas, com destaque para o PCS da ordem de 17,7 MJ/kg e densidade energética de 17.523 MJ/m<sup>3</sup> e a melhor combustibilidade.

Apesar de existirem muitos estudos, o mercado de briquetes no Brasil ainda é escasso, principalmente pela falta de padronização na produção dos briquetes e nas propriedades que estes devem possuir o que dificulta a produção em grande escala.

A combustão dos briquetes é uma atividade que deve ser avaliada com cuidado, pois deve existir uma adequação às emissões de poluentes regulamentados pelas normas ambientais.

Os resultados deste trabalho mostram um caminho a seguir na procura de soluções técnicas ambientalmente corretas para o aproveitamento energético dos resíduos agrícolas e agroindustriais visando à minimização da quantidade destes no campo e conseqüente preservação do meio ambiente. Para a região norte de Santa Catarina, a

utilização destes resíduos como briquetes seria uma alternativa interessante à lenha e ao carvão vegetal, devido à abundância destas culturas na região.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Avaliar a influência do tamanho das partículas de biomassa lignocelulósica na qualidade final dos briquetes;
- ✓ Analisar os briquetes confeccionados a partir de misturas dos resíduos folha, pseudocaule e casca de arroz;
- ✓ Analisar a influência do tempo de compactação e tipo de briquetadeira utilizada na qualidade final dos briquetes;
- ✓ Realizar a combustão de maneira controlada, dos briquetes e analisar as emissões geradas;
- ✓ Realizar o balanço de energia do processo de obtenção, preparação e briquetagem dos resíduos;
- ✓ Realizar análise de viabilidade econômica da produção de briquetes dos resíduos da bananicultura e rizicultura;
- ✓ Avaliar possíveis aplicações industriais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, S. R. Pirólise rápida de casca de arroz: Estudo de parâmetros e caracterização de produtos. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - UFRGS, Porto Alegre, 2010.

ALVES, E. J.; OLIVEIRA, M. de A.; DANTAS, J. L. L.; OLIVEIRA, S.L. de. A cultura da banana: aspectos técnicos, socioeconômicos e agroindustriais. Brasília: EMBRAPA, 2ª. Ed. p.585. SP/Cruz das Almas, 1997.

ALVES, G.H.O.; SANTOS, L.A.; DIAS, A.B.A.; MENDES, M.R.; MENEZES, R.K.O.; BARBOZA, A.S.R.; SOUZA, J.E.A.; MENEGHETTI, S.M.P. Estudo de aproveitamento energético da espécie vegetal sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia Benth.*). 5º Encontro Nacional de Tecnologia Química, Maceió, 2012. Disponível em: <http://www.abq.org.br/entequi/2012/trabalhos/50/50-408-13845.html>. Acesso em 02/2013.

ABIB - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA INDÚSTRIAS BIOMASSA BRASIL BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL. Inventário Residual Brasil - WoodPellets - Briquete – Energia, 2011. E – book. Disponível em: <http://pt.calameo.com/read/000200968cc3a949579a0>. Acesso em 27/02/2012.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8.628: Carvão mineral - Determinação do poder calorífico superior e do poder calorífico inferior - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 8633: Carvão vegetal - determinação do poder calorífico - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica no Brasil. Brasília: ANEEL, 2ª Ed. 2005. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm>. Acesso em 02/05/2011.

\_\_\_\_\_. Atlas de Energia Elétrica no Brasil. Brasília: ANEEL, 3ª Ed., 2008. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/visualizar\\_texto.cfm?idtxt=1689](http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1689). Acesso em 20/09/2012.

ASTM - Annual book of ASTM standards: E828-81. Standard Test Method for Designating the Size of RDF-3 From its Sieve Analysis, 2004.

\_\_\_\_\_. E 871 - 82. Standard Test Method Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels, 2006.

\_\_\_\_\_. E 872 – 82. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels, 2006.

\_\_\_\_\_. E 1755-01. Standard Test Method for Ash in Biomass, 2007.

\_\_\_\_\_. E 1756-08. Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass, 2008.

ARAÚJO, F. C.; ANAMI M. H.; TRAVESSINI R. Desenvolvimento e ensaio de briquetes fabricados a partir de resíduos lignocelulósicos da agroindústria. Inovação e Tecnologia, Medianeira – PR, v.1, n. 1, p.1-8, 2010.

BARRETO, E. J. F. Tecnologias de Energias Renováveis. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

BOURSCHEIDT, C.T; OLIVEIRA, B. H.; GONÇALVES, G. da C. Estudo da secagem do bagaço de malte resíduo úmido obtido do processo industrial de cervejaria. II International Symposium on Agricultural and Agroindustrial Waste Management. Foz do Iguaçu, Brazil, 2011.

CAMARGO, F. L. Estudo da pirólise rápida de bagaço de cana em reator de leito fluidizado borbulhante. Tese (Doutorado), EM/UNICAMP, Campinas, SP, 2006.

CANEVAROLO JR. Técnicas de caracterização de polímeros. São Paulo: Artliber, 2004.

CASTELLÓ, M. L. Estudo da glicerina por Análises Térmicas. Dissertação (Mestrado em Tecnologias de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

CENBIO – Centro Nacional de Referencia em Biomassa. Fontes de biomassa. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/saibamais/fontes.htm>. Acesso em 10/2012.

CEPA – Centro de Socieconomia e Planejamento Agrícola, Epagri, Santa Catarina. Síntese Anual da Agricultura de Santa Catarina (2011/2012), 2012. Disponível em: [http://cepa.epagri.sc.gov.br/Publicacoes/Sintese\\_2012/sintese%202012.pdf](http://cepa.epagri.sc.gov.br/Publicacoes/Sintese_2012/sintese%202012.pdf). Acesso em 09/2012.

CHOU, C. S.; LIN SH.; LU WC. Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran. Fuel Processing Technology, v.90, p.980–987, 2009.

CORBITT, R. A. Standard handbook of environmental engineering. 2nd edition. USA: McGraw-Hill, 1999.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S. Sistemas Energéticos em Biomassa. Amazonas: Imprensa Universitária, 1990.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. Biomassa para Energia. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2008.

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

DELLA, V. P.; KÜHN I.; HOTZA, D. Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais: Cinza de Casca de Arroz como Fonte Alternativa de Sílica. Cerâmica Industrial, v.10, n. 2, 2005.

DEMIRBAS, A. Properties of charcoal derived from hazelnut shell and production of briquettes using pyrolytic oil. Energy, v. 24, p.141-150, 1999

\_\_\_\_\_. Physical properties of briquettes from waste paper and wheat straw mixtures. Energy Conversion and Management, v. 40, p. 437-445, 1999.

\_\_\_\_\_. Combustion characteristics of different biomass fuels. Progress in Energy and Combustion Science, v. 30, p. 219 – 230, 2003.

DEMIRBAS, A.; SAHIN A. Evaluation of biomass residue 1: briquetting waste paper and wheat straw mixtures. Fuel Processing Technology, v. 55, p.175 -183, 1998.

DINIZ Juraci. Conversão térmica de casca de arroz à baixa temperatura: Produção de bioóleo e resíduo sílico – carbonoso adsorvente. Tese (Doutorado em Química), UFSM - Santa Maria, RS, 2005.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. A cultura da banana / Mandioca e Fruticultura Tropical. Embrapa Informação Tecnológica 3ª. Ed., p. 110. Brasília, DF, 2006.

EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. Histórico da produção de arroz irrigado. Disponível em: [http://www.epagri.sc.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=84](http://www.epagri.sc.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=84). Acesso em 10/2012.

FEDERIZZI Mauri. Potencialidade do uso de resíduos lignocelulósicos da Bananicultura como substrato de fermentação do processo de Metanização. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE – Joinville, 2008.

FELFLI, F. F.; MESA J. M.; ROCHA J. D.; FILIPPETTO D.; LUENGO C. A. e PIPPO W. A. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. Biomass and Bioenergy, v.35, p. 232-242, Campinas – SP, 2011.

FERIOTTI D. G. Proposta de aproveitamento de pseudocaule da bananeira (*Musa cavendish*). Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Bioquímicos). Instituto Mauá de Tecnologia - São Caetano do Sul, 2010.

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

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. Princípios das Operações Unitárias. 2.ed. Rio de Janeiro, 1982. 670p.

FURTADO T.S.; VALIN M.; BRAND M. A.; BELOTTE A.F.J. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v.30, n.62, p. 101-106, 2010.

GARCIA, R.; PIZZARO, C.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. Bioresource Technology, v. 103, p. 249-258, 2012.

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

GÓMEZ, E. O. Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP – Campinas, SP, 2002.

GONÇALVES J. Evaristo. Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de eucalyptus grandis. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Botucatu – SP, 2010.

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

GOUVEIA E. R.; NASCIMENTO, R. T.; SOUTO-MAIOR, A. Validação de metodologia para a caracterização química de bagaço de cana-de-açúcar. Química Nova, v. 32, nº. 6, p. 1500-1503, 2009.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE ESTATÍSTICA E GEOGRAFIA. Produção Agrícola Municipal 2011. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/link.php?codmun=420910> Acesso em 02/2013.

IOANNIDOU, O.; ZABANIOUTOU, A.; ANTONAKOU, E.V; PAPAIZISI, K.M.; LAPPAS, A.A.; ATHANASSIOU C. Investigating the potential for energy, fuel, materials and chemicals production from corn residues (cobs and stalks) by non-catalytic and catalytic pyrolysis in two reactor configurations. Renew Sustain Energy Reviews, v. 13, p. 750 – 762, 2008.

IPPUJ – Fundação Instituto de Pesquisa e Planejamento para o Desenvolvimento Sustentável de Joinville. Joinville Cidade em dados 2010/2011. Joinville: Prefeitura Municipal, 2011.

JARA, E.R.P. O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989.

LIPPEL; Briquetadeira. Disponível em: [http:// www.lippel.com.br/](http://www.lippel.com.br/). Acesso em 08/11.

LUCAS, E. F.; SOARES, B. G.; MONTEIRO, E. Caracterização de Polímeros: Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica. Rio de Janeiro: E – papers, 2001.

MARSOLLA, A. Planta de briquetagem de carvão vegetal. São Paulo: Rosa Madeireira, 1998.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI A.; MUSTAFFA, W. E.S.B. Biomass energy in Malaysia: Current state and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.15, p.3360– 3370, 2011.

MELO, V. P. Produção de briquetes de carvão vegetal com alcatrão de madeira. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, 2000.

MOERS E.M.; VIEIRA A. C.; FERNANDES D.M.; SOUZA S. N. M.; BARICATTI R. A. Caracterização da biomassa residual proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia. I COLASSA – Congresso Latino Americano de Suinocultura e Sustentabilidade Ambiental. Foz do Iguaçu, PR. 2011.

MORAIS D. M. Briquetes ligno - celulósicos como potencial energético para queima de blocos cerâmicos: aplicação em uma indústria de cerâmica vermelha que abastece o Distrito Federal. Tese (Doutorado em estruturas e construção civil). Brasília, 2007.

MORAIS, M. R., SEYE, O.; FREITAS, K. T. Obtenção de briquetes de carvão vegetal de cascas de arroz utilizando baixa pressão de compactação. Encontro de energia no meio rural, 2006, Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo>. Acesso em 06/11.

NDIEMA, C.K.W., MANGA, P.N.; RUTTOH, C.R. Influence of die pressure on relaxation characteristics of briquetted biomass. *Energy Conversion and Management*, v 43, p. 2157-2161, 2002.

NOGUERA G. Combustão e gasificação de biomassa sólida. Brasília : Ministério de Minas e Energia, 2008.

OLADEJI, J.T. Fuel Characterization of Briquettes Produced from Corncob and Rice Husk Residues. *The Pacific Journal of Science and Technology*, v 11, nº1, 2010.



PASCUAL C.S.C.I. Efeitos da parboilização do arroz (*Oryza Sativa* L.) integral sobre os compostos bioativos e a disponibilidade do amido. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos).USP - São Paulo, 2010.

PEREIRA, A. L. S.; CORDEIRO E. M. S.; NASCIMENTO D. M.; MORAIS J.P. S.; Sousa M. S. M.; ROSA M.de F. Extração e caracterização de nanocelulose de fibras do pseudocaule da bananeira. Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação, Maceió, 2010.

PROTASIO T.P.; ALVES I. C. N.; TRUGILHO P. F.; SILVA V. O.; BALIZA A. E. R. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 31, nº 68, p. 273 -283, 2011.

QUIRINO, W. F. - Características de briquetes de carvão vegetal a seu comportamento na combustão. Dissertação (Mestrado). Piracicaba, SP, 1991.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V.L.S.; AZEVEDO, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. Biomassa e Energia, v.1, nº.2, p. 173-182, 2004.

PAULA, R. L. E.; TRUGILHO, P. F.; REZENDE, R. N.; ASSIS, C. O.; BALIZA, A., E., R. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 31, n. 66, p. 103 – 112, Colombo, 2011.

ROCHA E.P.A; SOUZA D.F.; DAMASCENO S. M. Estudo da viabilidade da utilização de briquete de capim como fonte alternativa de energia para queima em alto-forno. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. Uberlândia, 2009. Disponível em: <http://www.cobeqic2009.feq.ufu.br/uploads/media/99021911.pdf>. Acesso em 02/2013.

RODRIGUES, S. B. Resíduos da Agroindústria como fonte de fibras para elaboração de pães integrais. Dissertação (Mestrado em Ciências). Piracicaba, SP, 2010.

ROSA M.F.; SOUZA F. M.S.M; FIGUEIREDO M.C.B.; MORAIS J.P.S.; SANTAELLA S.T.; LEITÃO R.C. Valorização de resíduos da agroindústria. II Simpósio internacional sobre gerenciamento de resíduos agropecuários e agroindustriais – II SIGERA: Volume 1: Palestras. Foz do Iguaçu, PR. 2011.

RUIZ T.; WISNIEWSKI C. Correlation between dewatering and hydro-textural characteristics of sewage sludge during drying. Separation and Purification Technology, v. 61, p. 204-210, 2008.

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

SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R. Efeito da temperatura e velocidade do ar sobre a taxa de secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. *Ciência Florestal*, v. 12, p. 99-106, 2002.

SANTOS, E. C. S.; SOUZA, R. C. R.; SEYE, O. Aproveitamento da casca do cupuaçuzeiro para a produção de energia. *ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL*, 5., 2004, Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br>, Acesso em 08/11.

SCHULZ, M., A. Produção de bioetanol a partir de rejeitos da bananicultura: polpa e cascas de banana. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE – Joinville.

SILVA, J. V. H.; BITTAR, Amir Prudente; SERRA, Juan Carlos Valdés; ZUKOWISKI, Joel Carlos. Diagnóstico do reaproveitamento de resíduos com potencial energético no Município de Palmas -TO. *Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal*, v. 8, n. 2, p. 226-233, 2011.

SILVA, I. T. da; ALMEIDA, A.C.; MONTEIRO, J.H. Uso do caroço de açaí como possibilidade de desenvolvimento sustentável do meio rural, da agricultura familiar e de eletrificação rural no Estado do Pará. *ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL*, 5., 2004, Campinas. Disponível online em: [www.scielo.br](http://www.scielo.br), acesso em 08/11.

SILVA M.B.; MORAIS A.S. Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro, 2008.

SILVEIRA S. Monica. Aproveitamento das cascas de coco verde para produção de briquete em salvador – BA. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo). Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia – Salvador, 2008.

SOFFNER, M. L. A. P. Produção de polpa celulósica a partir de engaço de bananeira. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SOUZA, A.T.; CONCEIÇÃO, O. A. Fatores que afetam a qualidade da banana na agricultura familiar catarinense. Florianópolis: Instituto Cepa/SC, p. 80, 2002.

SOUZA, R. C. R.; DOS SANTOS, E. C. S.; MORAIS, M. R.; SEYE, O. Carbonização da casca de arroz (*Oriza sativa*) para uso energético. XXXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Bonito - MS, 2007.

SOUZA, O.; FEDERIZZI, M.; COELHO, B.; WAGNER, T. M.; WISBECK, E. Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização

para a produção de biogás. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.14, n.14, p. 438-443, 2010.

SPEYER, R. F. *Thermal analysis of materials*. New York, EUA: Marcel Dekker. 1994.

STELTE, W.; VÁRZEA, J. K.; SANADI, A. R.; BARSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN U. B. A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. *Biomass and Bioenergy*. v 35, n. 2, p. 910-918. 2011.

TECNOBRIQ Briquetadeiras – Site disponível em <http://www.tecnobriq.com.br/>. Acesso em 06/11.

TEIXEIRA, S. R.; PEÑA, A. F.; LIMA, V. R. G. Use of residues from Industrial Carbonized sugarcane bagasse to produce charcoal briquette. *Proceedings Venice 2010, Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste Venice, Italy; 8-11 November 2010*.

TOCK, J. Y.; LAI, C. L.; LEE K. T.; TAN K.; BHATIA S. Banana biomass as potential renewable energy resource: A Malaysian case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, p.798–805, 2010.

YAMAJI, F. M.; CHRISOSTOMO, W.; VENDRASCO, L.; FLORES, W. P. the use of forest residues for pellets and briquettes production in Brazil. *Proceedings Venice 2010, Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venice, Italy; 8-11, November 2010*.

YAMAN, S., SAHAN, M. H. SESEN, K. H.; KUCUKBAYRAK, S. Production of fuel briquettes from olive refuse and paper mill waste. *Fuel Processing Technology*, v.68, p.23-31, 2000.

YANIK J.; STAHL R.; TROEGER, N.; SINAG A. Pyrolysis of algal biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2012.

YOSHIDA, C.M.P.; MENEGALLI, F.C. Drying of supersweet corn. In: *Internacional Drying Symposium*, 12, Noordwijkerhout. Elsevier, 2000.

WILAIPON, P., TRIRATTANASIRICHAJ K.; TANGCHAICHIT K.. The effects of moderate die pressure on banana-peel briquettes. *The 2nd International Conference on Thermal Engineering and Applications*. United Arab Emirates, Jan 3-6, 2006.

WILAIPON, P. Physical characteristics of maize cob briquette under moderate die pressure. *American Journal of Applied Sciences*. v. 4, n.12 p. 995-998, 2007.

\_\_\_\_\_.The effects of briquetting pressure on banana-peel briquette and the banana waste in northern Thailand. *American Journal of Applied Sciences*. v. 6, n. 1, p. 167-171, 2009.

## ANEXO I

Resultados da análise de variância, ANOVA, pelo Teste de Tukey.

<b>Carbono Fixo - Resíduos</b>		<b>Carbono Fixo - Briquetes</b>	
<i>Níveis</i>	<i>P-valor</i>	<i>Níveis</i>	<i>P-valor</i>
Folha-Casca	0,010880694	Folha-Casca	5,72191E-07
Pseuocaule-Casca	0,00291039	Pseudocaule-Casca	4,60369E-07
Pseudocauel-Folha	0,419593347	Pseudocaule-Folha	0,436649939

<b>Cinzas - Resíduos</b>		<b>Cinzas - Briquetes</b>	
<i>Níveis</i>	<i>P-valor</i>	<i>Níveis</i>	<i>P-valor</i>
Folha-Casca	0,0001698	Folha-Casca	9,26067E-07
Pseudocaule-Casca	0,000247855	Pseudocaule-Casca	7,35933E-07
Pseudocaule-Folha	0,810391208	Pseudocaule-Folha	0,392866865

<b>Umidade - Resíduos</b>		<b>Umidade - Briquetes</b>	
<i>Níveis</i>	<i>P-valor</i>	<i>Níveis</i>	<i>P-valor</i>
Folha-Casca	0,690726866	Folha-Casca	0,261519466
Pseudocaule-Casca	1,94885E-05	Pseudocaule-Casca	7,69727E-05
Pseudocaule-Folha	2,81959E-05	Pseudocaule-Folha	0,000204538

<b>Sólidos Voláteis - Resíduos</b>		<b>Sólidos Voláteis - Briquetes</b>	
<i>Níveis</i>	<i>P-valor</i>	<i>Níveis</i>	<i>P-valor</i>
Folha-Casca	0,019260998	Folha-Casca	0,261519466
Pseudocaule-Casca	0,10002196	Pseudocaule-Casca	7,69727E-05
Pseudocaule-Folha	0,417419263	Pseudocaule-Folha	0,000204538