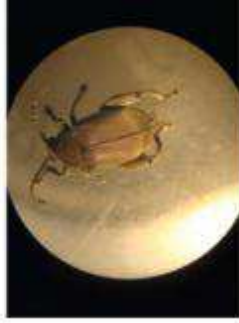


Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Integer ut turpis at augue molestie fringilla eu vel lectus. Aenean id urna est, vitae elementum libero. Nulla tristique diam ut dolor commodo cursus bibendum massa dictum. Integer a lacus eu nulla ornare blandit. Curabitur id quam velit. Sed sapien justo, posuere id ornare non, auctor eget purus. Nunc tincidunt mi est. Proin cursus quam non quam lobortis ac tristique nunc elementum. Aliquam quam neque, pellentesque id accumsan a, suscipit a eros. Mauris elementum gravida nisl et placerat. Morbi malesuada ante ut eros dapibus venenatis.

# TECNOLOGIAS PARA INOVAÇÃO NAS CADEIAS EUTERPE



*José Dalton Cruz Pessoa*  
*Gustavo Henrique de Almeida Teixeira*  
Editores

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*  
*Embrapa Instrumentação*  
*Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento*

# **TECNOLOGIAS PARA INOVAÇÃO NAS CADEIAS EUTERPE**

Editores

*José Dalton Cruz Pessoa*

*Gustavo Henrique de Almeida Teixeira*

*Embrapa*  
*Brasília, DF*  
*2012*

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Instrumentação**

Rua XV de Novembro, 1452  
Caixa Postal 741  
CEP 13560-970 - São Carlos-SP  
Fone: (16) 2107 2800  
Fax: (16) 2107 2902  
www.cnpdia.embrapa.br  
E-mail: sac@cnpdia.embrapa.br

**Unidade responsável pelo conteúdo e edição**

Embrapa Instrumentação

**Comitê de Publicações da Unidade**

Presidente: *João de Mendonça Naimé*  
Membros: *Débora Marcondes Bastos Pereira Mitori, Washington Luiz de Barros Melo, Sandra Protter Gouvea, Valéria de Fátima Cardoso.*  
Membro Suplente: *Paulo Sérgio de Paula Herrmann Junior*  
Revisor editorial: *Valéria de Fátima Cardoso*  
Normalização bibliográfica: *Valéria de Fátima Cardoso*  
Tratamento de ilustrações: *Gráfica Suprema*  
Capa: *José Dalton Cruz Pessoa*  
Editoração eletrônica: *Gráfica Suprema*  
**1ª edição**  
1ª impressão (2012): 300 exemplares

**Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)**

Embrapa Instrumentação

---

T255    Tecnologias para inovação nas cadeias eutérpe / José Dalton Cruz Pessoa, Gustavo Henrique de Almeida Teixeira editores. -- Brasília, DF : Embrapa, 2012.  
343 p. ; 16 cm x 23 cm.

ISBN: 978-85-7035-089-3

1. Açaí. 2. Tecnologia de alimento. 3. Processamento. I. Pessoa, José Dalton Cruz. II. Teixeira, Gustavo Henrique de Almeida. III. Embrapa Instrumentação.

CDD 21 ED. 634.9745  
664.8046

© Embrapa 2012

## AUTORES

**Ádina Lima de Santana**

Engenharia de alimentos, graduação  
Mestranda em Engenharia Química pela UFPA  
adina\_santana@hotmail.com

**Alan Ribeiro dos Reis**

Engenharia mecânica, mestrado  
Docente do Centro Universitário Herminio Ometto de Araras, Araras - SP  
alan\_sz5@yahoo.com.br

**Alessandra Ferraiolo Nogueira Domingues**

Engenharia química, doutorado  
Pesquisador da Embrapa Amazônia Oriental, Belém - PA  
ferraiolo@cpatu.embrapa.br

**André Colson Schwob**

Engenharia mecânica, bacharelado  
Sócio diretor da NUFruits do Brasil, Belém - PA  
andre.schwob@gmail.com

**Antônio Cordeiro de Santana**

Engenharia agrônômica, doutorado  
Professor Associado IV da Universidade Federal Rural da Amazônia  
acsantana@superig.com.br

**Carlos Triveño Rios**

Engenharia metalúrgica, doutorado  
Professor Adjunto da Universidade Federal do ABC, Santo André - SP  
carlos.triveno@ufabc.edu.br

**Cristiane Sanchez Farinas**

Engenharia química, doutorado  
Pesquisador da Embrapa Instrumentação, São Carlos - SP  
cristiane@cnpdia.embrapa.br

SAHA, B. C. Hemicellulose bioconversion. *J. Ind. Microbiological and Biotechnological*, v. 30, p. 279-291, 2001.

SILVA, J. P. A. **Estudo da produção do etanol por *Pichia stipitis* empregando hidrolisado de palha de arroz**. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Industrial) - Escola de Engenharia de Lorena, Lorena, 2007.

TEIXEIRA, L. B.; OLIVEIRA, R. F. de; FURLAN JUNIOR, J.; GERMANO, V. L. C.

**Características químicas de composto orgânico produzido com lixo orgânico, caroço de açaí, capim e serragem**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2004. (Embrapa Amazônia Oriental. Comunicado técnico).

YANG, S. Q.; YAN, Q. J.; JIANG, Z. Q.; LI, L. T.; TIAN, H. M.; WANG, Y. Z. High-level of xylanase production by the thermophilic *Paecilomyces thermophila* J18 on wheat straw in solid-state fermentation. *Bioresource Technology*, v. 97, n. 15, p. 1794-1800, 2006.

# 12. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DA AGROINDÚSTRIA

*Jose Dalton Cruz Pessoa*

*Alan Ribeiro dos Reis*

## INTRODUÇÃO

A produção média de frutos do açaizeiro entre 1990 e 2009, de acordo com o IBGE (IBGE, 2011), foi de 113.769 toneladas por ano, com um desvio padrão de aproximadamente 11,7%. A polpa, principal produto de comercialização, corresponde a apenas 15% da massa total do fruto, o restante corresponde ao resíduo formado por semente e borra. Realizando um cálculo simples, pode-se concluir que a agroindústria do açaí foi responsável por gerar em média 96.700 toneladas de resíduos por ano. Essa enorme quantidade de lixo orgânico, se não tratada de forma adequada, pode trazer malefícios à sociedade e ao meio ambiente.

Além de atender às questões ambientais, as soluções elegíveis para esse problema devem atender às escalas de oferta do resíduo e demanda da solução, às limitações de logística, e serem capazes de absorver uma provável valorização do resíduo. Até onde é possível avaliar neste momento, a utilização dos resíduos para geração de energia térmica atende razoavelmente esses requisitos. Ou seja, nesse caso, parte da biomassa que é retirada da floresta e transferida para o meio urbano sem fim definido seria, após as transformações necessárias, utilizada para a geração de energia no próprio meio urbano ou no meio rural. A proposta não é nova, mas este capítulo contribui com uma apresentação organizada de resultados próprios e da literatura que esperamos que forme uma argumentação plausível ao leitor, ajudando empreendedores a analisar a oportunidade de utilizar os resíduos da agroindústria do açaí como fonte de energia. A transformação de uma possível solução técnica em uma solução estruturada passa por duas etapas: o das especificações técnicas e pelo plano de negócio. Este capítulo contribui para as especificações técnicas quando persegue e detalha a resposta à seguinte pergunta: como concentrar e liberar a energia disponível nos resíduos da agroindústria do açaí?

Em outro capítulo, é analisado o potencial de produção de celulase (que pode ser usada na produção de combustível a partir de biomassa) usando resíduos da agroindústria do açaí. Aqui exploraremos uma tecnologia já madura: a da carbonização para produção de carvão vegetal.

## IMPORTÂNCIA DO CARVÃO

O uso do carvão, tema deste texto, está intimamente ligado à criação do Brasil como país. Enfraquecida a chama da inovação e do empreendedorismo da época das grandes navegações, Portugal não tinha pessoas nem dinheiro para manter e justificar a posse de sua colônia, exceto por meio de um negócio muito lucrativo que incluiu a centralização do poder e mão de obra barata. Após as primeiras explorações e algumas tentativas de retorno menor, a produção de açúcar teve início na segunda metade do século XVI e começou a perder fôlego quase um século depois. A produção, concentrada na faixa litorânea, dependia da lenha como fonte de energia e dos animais de tração para transporte. Depois de décadas de exploração, as matas litorâneas não eram suficientes para fornecer o carvão necessário, forçando os senhores de engenho a buscar madeira a distâncias cada vez maiores, fomentando o negócio da pecuária que, para reduzir os conflitos com os agricultores, foi forçado pelo governo português a migrar para o interior, separando geograficamente os dois negócios que até hoje são importantes para o país (FURTADO, 2007).

Até 1972, a madeira representava a primeira fonte de energia do Brasil, superada em 1973 pelo petróleo, e em 1978 pela hidroeletricidade. Mesmo assim, em 1988, foram usados 114 milhões de metros cúbicos de madeira (67% da madeira usada para geração de energia no Brasil) para produção de 11 milhões de toneladas de carvão vegetal, a maior produção em comparação global. Deste montante 86,7% (7,8 milhões de toneladas) foram destinados à indústria siderúrgica (BRITO, 1990). Nessa época, 78% da matéria-prima usada na obtenção do carvão tinha origem na mata nativa.

De acordo com Uhlig et al. (2008), as biomassas (lenha e cana-de-açúcar) representaram, em 2005, 27% da oferta bruta de energia no Brasil, e, na década anterior, o consumo de lenha tinha permanecido praticamente inalterado. Especificamente naquele ano, a oferta de energia proveniente da lenha (12,9%), em relação ao total, foi praticamente igual à proveniente da energia hídrica (13,2%). Em 2005, o setor industrial consumiu 90,5% (8,7 milhões de toneladas) do carvão vegetal produzido no Brasil, utilizados para produção de ferro-gusa (84,9%), ferro-liga (10,1%) e cimento (4,4%). Naquele ano, o comércio de carvão vegetal movimentou 5,5 milhões de toneladas e 1,7 bilhões de reais.

Com técnicas modernas, é possível reduzir ou eliminar a fuligem e os voláteis tóxicos provenientes do processo de obtenção do carvão, e, com o incentivo adequado, utilizar apenas madeira de florestas plantadas como matéria-prima, o que tem o efeito de melhorar as condições de trabalho dos empregados do setor, sem contar que é uma fonte renovável de energia. Portanto, aplicando corretamente a tecnologia, a solução pode ser uma oportunidade de negócio sintonizada com as necessidades atuais de energia renovável, adequada à preservação do meio ambiente e socialmente justa.

## CONCEITOS RELEVANTES

O carvão vegetal é obtido da madeira quando submetida ao processo de carbonização, ou pirólise, que consiste em aquecer a biomassa em atmosfera com baixo teor de oxigênio e temperaturas entre 300°C e 500°C. Nessas condições, a celulose, a hemicelulose e a lignina são fracionados, sendo parte das frações liberadas para a atmosfera na forma de voláteis. O que sobra é o carvão, caracterizado como um sólido com teor de carbono entre 65% e

80%, teor de cinzas entre 1% e 3%, teor de material volátil entre 20 e 35%, e poder calorífico inferior médio de 7.365 kcal/kg (30,8 MJ/Kg). Para atingir esses valores, o complexo de reações concentra, basicamente, carbono e expulsa oxigênio da madeira (INFOENER, 2012).

Brito e Barrichelo (1981) descrevem a evolução do processo de carbonização da retorta de madeira: no processo descrito pelos autores, o aquecimento até 200°C provoca a saída quase que exclusivamente de vapor d'água. Entre 270°C e 300°C, formam-se reações exotérmicas caracterizadas por forte desprendimento de gases como ácido acético, álcool metílico, frações leves de alcatrão e gases combustíveis. No intervalo de 300°C a 600°C, ocorre uma diminuição do volume de gases produzidos. Neste intervalo, o principal constituinte dos gases é o alcatrão. Acima de 600 °C, inicia-se a fase de dissociação do carvão, reduzindo consideravelmente seu poder calorífico. Os autores também discriminam os tipos de carvão de acordo com sua aplicação: carvão para uso doméstico (obtido a baixas temperaturas, entre 350°C e 400°C); carvão metalúrgico (com pelo menos 80% de carbono, obtido a pelo menos 650°C); carvão para gasogênio (onde os critérios de caracterização são menos estritos que do carvão metalúrgico); carvão ativo (muito poroso); carvão para a indústria química (pureza e boa reatividade química) e outros usos (e.g. indústria de cimento, que requer um produto pulverizado).

O Poder Calorífico é a quantidade de calor produzida pela combustão completa de uma unidade de massa do combustível. O calor liberado pela combustão de uma unidade de massa do combustível em um volume constante, com toda água condensada, é definido como Poder Calorífico Superior (PCS). O Poder Calorífico Inferior (PCI) é o calor liberado pela combustão de uma unidade de massa do combustível nas mesmas condições, mas com a água permanecendo no estado de vapor. Portanto PCI=PCS-entalpia de vaporização da água. Outra unidade muito útil é a Tonelada Equivalente de Petróleo (TEP), que é a massa (em toneladas) do combustível que produz a mesma energia que uma tonelada de petróleo cru (de composição pré-definida, aproximadamente 42 gigajoules, em torno de 10 megakcal).

## INSTRUMENTAÇÕES PARA BRIQUETAGEM E PIROLÍSE

Ao sair da despoldadora, a semente de açaí absorveu um percentual pequeno de água (PESSOA; SILVA, 2007), mas sua superfície está encharcada graças à capilaridade entre os monostelos<sup>1</sup> e a semente. Dessa forma, o volume relativamente grande (algumas toneladas) de frutos processados diariamente em uma unidade industrial contém um percentual de água não desprezível que interfere no rendimento do processo de queima se esse resíduo for lançado diretamente no forno. A solução mais econômica é secá-lo ao sol, como nos antigos terreiros de café. Após a remoção da água de superfície, a semente ainda contém um percentual de água da ordem de 10% (m/m) que ainda reduziria a eficiência da combustão. Essa água também pode ser retirada em forno rotativo. Depois disso, o caroço está pronto para queima nas melhores condições *in natura*. De acordo com a composição da biomassa, a combustão pode gerar mais ou menos resíduo sólido, que deverá ser retirado periodicamente do forno durante sua manutenção.

Outra alternativa é concentrar a energia disponível na biomassa do caroço por meio do

<sup>1</sup> Ver capítulo sobre a anatomia do fruto.

processo de pirólise<sup>2</sup>, que tem a vantagem de reduzir para 30% ou 40% a massa original, diminuir o resíduo da queima e o custo do transporte, e aumentar a eficiência da combustão. A semente seca também pode ser remodelada em outro formato para adequar-se a mercados específicos que preferem utilizar pó ou briquetes de diferentes tamanhos e formatos.

Para dar nova forma à biomassa (briquetagem), são necessárias duas etapas básicas após o secamento: trituração e compactação. São apresentados a seguir os princípios de funcionamento de algumas instrumentações, sem considerar as especificações para uso industrial.

## SECAGEM

A forma de secagem mais barata e comumente utilizada é a secagem natural, onde a biomassa é espalhada sobre o solo. Durante a secagem, a pressão de vapor d'água do ar que circunda os caroços tende a aumentar, comprometendo a eficiência do processo. Para reduzir este efeito, é necessário garantir a renovação do ar, estocando o material em lugar arejado, pois quanto maior o deslocamento do ar mais rápida será a secagem. Para garantir a secagem homogênea dos caroços, as pilhas devem ser revolvidas, forçando a circulação do ar por todo o material. A exposição direta à radiação solar promove um sobreaquecimento em relação à temperatura ambiente de até 22°C durante os períodos de insolação máxima, intensificando a secagem (COSTA, 2007).

O uso de ar quente aumenta o rendimento do processo, reduzindo o tempo de detenção de cada lote a ser seco. Como opções de métodos de secagem a ar quente, podem ser citados: estufas com circulação natural ou forçada do ar (processo em batelada), secador de tambor rotativo (processo contínuo) e secador com transportador de correia de fluxo equicorrente ou contracorrente (processo contínuo).

## TRITURAÇÃO

A trituração, ou moagem, aumenta a relação área/volume da amostra com pelo menos três implicações interessantes. A primeira é que aumenta o fluxo de oxigênio, facilitando a oxidação (i.e. a combustão) do material. Essa característica é conveniente nos casos em que o combustível é insuflado diretamente no forno. A segunda característica é a redução de volume do lote, o que pode ter implicações logísticas. A terceira permite a reformatação da amostra por meio da compressão no molde desejado.

O processo de trituração pode ser feito de diversas maneiras: compressão, impacto, abrasão e corte, por via seca ou úmida. Em processos de via seca, a matéria-prima passou anteriormente por secagem até atingir a umidade adequada. Já por via úmida, pode-se utilizar o insumo com sua umidade natural.

A energia necessária para trituração ou moagem de um material é inversamente proporcional à granulometria desejada. Quando se deseja dimensões bastante reduzidas há aumento considerável do tempo de detenção do material no interior da câmara de trituração ou mesmo a necessidade de repassar o material pela câmara. Em alguns casos, os moinhos podem ser dispostos em série para evitar o tempo de espera para o

<sup>2</sup> Reação a alta temperatura em atmosfera com pouco ou nenhum oxigênio.

repasse. Alguns dos tipos mais comuns de moinhos foram listados a seguir:

- Moinho de Martelo – Martelos rotativos esmagam e trituram o material por choques mecânicos.
- Moinho de Bolas e Moinhos de Barras – Esferas ou barras, soltas no interior do tambor rotativo; ao se chocarem contra o material (caroço de açaí) provocam sua redução de tamanho.
- Moinho de Facas – O movimento (rotativo) da faca empurra a biomassa para o canal onde estão as facas e as contra-facas (fixa). Nesse canal, a biomassa é triturada por desbaste.

## PRENSAGEM E BRIQUETAGEM

A prensagem é um processo de adensamento do material, e portanto da energia, que reduz o volume da carga e facilita o transporte, permitindo a formatação do material (normalmente em geometria cilíndrica), o que ajuda a organização do estoque.

A eficiência da densificação da biomassa depende de quatro grandezas: a granulometria da amostra, a temperatura, a pressão aplicada e o teor de lignina. Em temperaturas próximas a 250°C a lignina entra no estado plástico aderindo às partículas ao redor. Quando a temperatura volta ao valor ambiente, o material torna-se rígido e fácil de ser manuseado e transportado. O problema é que nem toda biomassa tem lignina suficiente para permitir a aglutinação. Nesse caso, pode-se usar um aglutinante, como o alcatrão obtido na pirólise. Entretanto, entre as especificações de um processo eficiente está a minimização do consumo de energia e do custo, por isso procura-se evitar o uso de aglutinante quando possível.

São usados basicamente dois métodos de briquetagem. (1) No processo de extrusão, a biomassa triturada é transportada por uma rosca cônica e pressionada contra a abertura que molda o briquete. (2) No processo de impacto, o material é pré-comprimido por uma rosca e em seguida forçado a passar por uma passagem cônica por meio de um pistão. Em estudo realizado na República Dominicana, Svenningson (1987) avaliou os dois métodos e listou vários fatores que devem ser levados em conta na escolha de um ou outro método, como custo operacional, facilidade de manutenção entre outros, mas na situação estudada o autor concluiu que a briquetadeira por pistão apresentou melhor desempenho.

## PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS GRANULADAS

As sementes de açaí foram moídas e separadas em quatro lotes de acordo com a faixa granulométrica: 1,0 mm – 0,8 mm; 0,8 mm – 0,5 mm; 0,5 mm – 0,212 mm e abaixo de 0,212 mm. Após a moagem, foram levados ao forno a uma temperatura de 105°C por um período de 24h. Após a secagem, as amostras foram embaladas a vácuo, conservando assim a baixa umidade para realização dos testes seguintes.

Na preparação dos briquetes, foi utilizada uma prensa hidráulica com molde cilíndrico, em alguns ensaios envolto por manta térmica.

## DESCRIÇÃO DOS RESÍDUOS

### A BORRA

Material particulado de coloração predominantemente púrpura devido à presença de antocianinas contidas no parênquima fenólico. É formado principalmente pelo esqueleto de células esclerenquimáticas e parte das fibras que envolvem a semente, mas também por pedaços de células da epiderme e do parênquima fenólico.

A borra representa cerca de 3,13% da matéria seca dos resíduos da agroindústria (TOWNSEND et al., 2001) e algumas de suas características podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição da borra.

Composição	Teor [%]
Extrato Etéreo	3,2
Extratos não Nitrogenados	1,0
Proteína Bruta	5,2
Cinzas	3,0

Fonte: Adaptado de Townsend et al. (2001) e Martins et al. (2009).

### O CAROÇO INTERIO E SUAS FIBRAS

O fruto do açaizeiro é uma baga, ou seja, possui um pericarpo formado por um epicarpo, um mesocarpo e um endocarpo carnosos contíguo à semente. Despolpando o pericarpo, sobra o que chamamos de caroço, o maior subproduto da agroindústria do açaí. É formado pela união do endocarpo e do endosperma sólido, de coloração branca, e rico em celulose e hemicelulose. O caroço é recoberto por fibras (monostelos) originadas no interior da semente (Figura 1).



Figura 1. a) Monostelos envolvendo o caroço; b) Monostelos parcialmente retirados, expondo o caroço; c) Caroço com corte revelando o endosperma. Adaptado de Ribeiro (2010).

O armazenamento do caroço de açaí é favorecido por sua forma esférica e tamanho reduzido com o valor do raio variando entre 5 e 10 mm. Compacto, apresenta alta resistência mecânica a esforços de compressão, chegando a resistir a uma carga de até 116,2 kgf (testes realizados com 10 repetições em instrumento para ensaios mecânicos da marca EMIC modelo DL3000).

## CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

### CURVA DE SECAMENTO DO CAROÇO

O controle de umidade da biomassa é de grande importância para garantir um bom rendimento do processo de queima. Com o intuito de reduzir a umidade, a secagem é a primeira etapa de preparação para a maioria dos processos de aproveitamento energético. Com o intuito de conhecer a curva de secamento do caroço de Açaí, foram feitas duas análises de secagem por um período de 24 horas. Para isso, foram separados 4 lotes de caroços com 200g cada. A temperatura do forno (EDGCON 3P - 7000) foi de 110°C para os lotes A e B e de 125°C para os lotes C e D. As curvas são apresentadas na Figura 2, onde cada ponto corresponde à média de dois lotes. O secamento apresenta um comportamento exponencial nas duas temperaturas, para o que são propostos os seguintes modelos teóricos:

• Para secamento a 110°C:  $Y=8,2e^{-(x/20,4)}+16,6e^{-(x/1,5)}$ ;  $R^2=0,99976$

• Para secamento a 125°C:  $Y=15,1e^{-(x/0,7)}+10,1e^{-(x/5,8)}$ ;  $R^2=0,99968$

Pode-se concluir também que o tempo para a retirada da metade da carga hídrica em um lote de caroços inteiros é de aproximadamente 2,5 horas em ambas as temperaturas. Contudo, para retirar 90% da água do caroço, a temperatura de secamento é mais importante. Na temperatura maior (125°C), são necessárias 13 horas, enquanto que a 110°C esse tempo ultrapassa as 24 horas do ensaio.

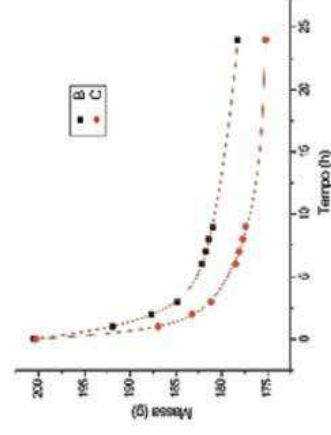
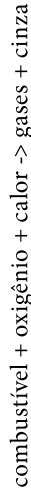


Figura 2. Linha de tendência da média dos pontos obtidos nos testes para as duas temperaturas.

## ANÁLISE ELEMENTAR E COMPOSIÇÃO CENTESIMAL

Para entender a importância de medir os teores de Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Enxofre no resíduo, lembremos que a queima do resíduo é uma reação de oxidação, em que o oxigênio reage com os elementos do combustível, gerando gases e resíduos sólidos:



Os gases que serão produzidos dependem do conteúdo do combustível. Espera-se que ele tenha uma alta concentração de carbono para gerar muito calor, e hidrogênio para favorecer as reações de oxidação. É desejável também que ele tenha baixos teores de Nitrogênio e Enxofre para reduzir ou impedir a produção de gases tóxicos como  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{NO}_x$ . Por isso, medimos o conteúdo CHNS (Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Enxofre) da semente moída.

Para a realização dessas medidas, foram utilizadas amostras com granulometria menor que 0,212mm, preparadas como descrito anteriormente. As medidas foram feitas no Laboratório de Análises Químicas da USP, *Campus* São Carlos, utilizando o equipamento da marca CE Instruments modelo-1110 sob a supervisão do Dr. Paulo Jorge Marques Cordeiro. Os resultados revelaram os seguintes conteúdos:

Carbono: 50,62%  $\pm$  0,30%

Hidrogênio: 6,868%  $\pm$  0,093%

Nitrogênio: 0,703%  $\pm$  0,015%

Enxofre: 0,45%  $\pm$  0,53%

Em revisão bibliográfica sobre tecnologia e economia do briquete de madeira, Gentil (2008) reuniu dados de análise elementar equivalentes aos valores acima. Para madeiras não-resinosas, os valores médios são de 50,8% para carbono e 6,4% para hidrogênio, valores próximos aos do açaí. Para as madeiras resinosas, a média de carbono é um pouco maior: 52,9% de carbono e 6,3% de hidrogênio. No mesmo trabalho, o autor apresenta a análise macromolecular média da madeira, com teor de celulose de 40% a 45%, hemicelulose de 25% a 30%, e lignina de 25% a 35%.

Altman (1956) fez a mesma análise para a semente de açaí, obtendo teores menores de celulose (34,41%), menos da metade de hemicelulose (12,26%) e um terço de lignina (7,72%). Em trabalho mais recente, entretanto, Rodríguez-Zúñiga et al. (2008) obtiveram valores um pouco diferentes: 53,20% para celulose, 12,26% para hemicelulose e 22,30% para lignina. Ambos os autores mediram o teor de proteínas do caroço de açaí, informação relevante nas aplicações do resíduo como matéria-prima de ração animal. Os valores de 4,34% para o primeiro autor e 5,2% para o segundo podem ser interpretados como equivalentes, considerando a variabilidade natural do objeto de pesquisa.

## TEOR DE VOLÁTEIS

Os voláteis, no contexto deste capítulo, são as substâncias liberadas na forma de gás durante a queima do combustível. Para quantificar o teor de materiais voláteis presentes no caroço moído e seco, foi adotado procedimento baseado no roteiro proposto pela NBR 8112 - Determinação do teor de materiais voláteis do carvão vegetal (ABNT, 1986).

As amostras foram retiradas do lote com granulometria igual ou inferior a 0,212 mm. Foi inserido aproximadamente 1,0 g de amostra em um cadinho de porcelana marca Chiarotti - Mod. A-53. Os valores da massa do cadinho vazio e cadinho com amostra foram coletados utilizando uma balança analítica da marca Mettler - Mod. AE 200. Após a pesagem, o cadinho foi levado ao forno (marca EDGCON 3P - Mod.7000) pré-aquecido a 900 °C, ficando 3 minutos em frente ao forno com a porta aberta e mais 3 minutos no interior do forno. Em seguida, o cadinho foi colocado no interior de um dessecador para resfriamento. Após o resfriamento, o cadinho com as cinzas foi novamente pesado e o valor da massa anotado. Este teste foi realizado em triplicata. O valor obtido para o teor de voláteis do caroço seco e moído, com granulometria igual ou inferior a 0,212mm foi de 87,107%  $\pm$  1,048%.

## TERMORAVIMETRIA

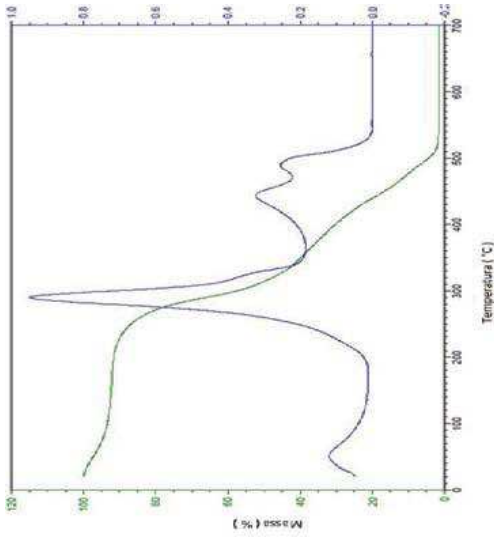
Ao estudarmos a curva de perda de massa em função do aumento da temperatura, é possível gerar informações que sustentem a escolha da temperatura ideal de carbonização. As curvas 'termogravimétricas' apresentadas nas Figuras 3 e 4 foram obtidas de sementes moídas (como descrito anteriormente) a partir de amostras com aproximadamente 10,0mg, utilizando o modelo Q500 da TA Instruments. Os parâmetros do experimento incluem a razão de aquecimento de 10°C.min<sup>-1</sup> e fluxo de 30 mL.min<sup>-1</sup> de ar sintético ou nitrogênio.

A atmosfera em torno da amostra altera o resultado termogravimétrico: em atmosfera reativa como o ar, as reações de óxido-redução são possíveis e pode ocorrer a queima do material; em atmosfera não-reativa, a perda de massa computa a degradação de moléculas maiores e a volatilização de algumas substâncias. A queima nesse caso se limita à eventual fração de oxigênio retido na amostra.

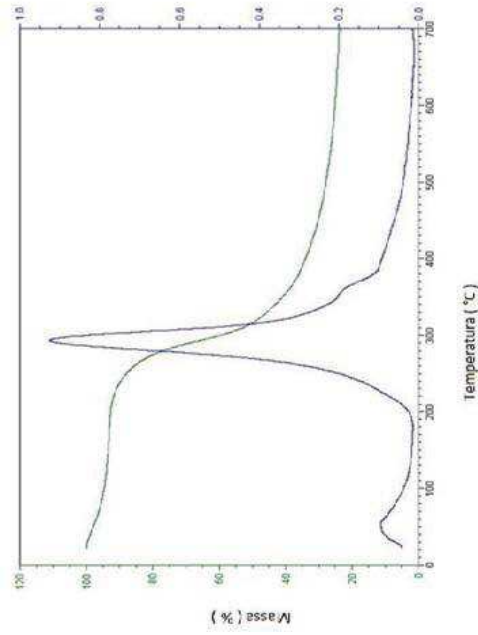
A análise das curvas de perda de massa em função da temperatura se torna mais fácil quando observada sua derivada primeira. A Figura 3, relativa à degradação em ar sintético por exemplo, mostra 4 picos. O primeiro indica a vaporização da água contida na amostra. O segundo e o terceiro, equivalentes a um longo declive da curva, indicam a degradação da lignina, da celulose e da hemicelulose. Finalmente, os compostos mais termorresistentes são queimados a partir da inflexão indicada no quarto pico. Depois de tudo isso, resta 1,5% de cinzas, estando na faixa considerada satisfatória (entre 0,5% e 2,0%).

Em atmosfera de nitrogênio (Figura 4), observa-se também a perda de 5% de água, e a decomposição da hemicelulose e quebra de ligações da celulose indicada pelo pico em 300°C. A terceira variação de massa ocorreu a partir de aproximadamente 370°C devido à decomposição final da celulose e da lignina.





**Figura 3.** Queima da semente de açaí moída com granulometria menor ou igual a 0,212mm, em atmosfera de ar sintético.



**Figura 4.** Queima da semente de açaí moída com granulometria menor ou igual a 0,212mm, em atmosfera de nitrogênio.

## BRIQUETES

A briquetagem é uma opção para a produção de biomassa adensada para geração de energia térmica a partir da queima. As principais diferenças entre pélete e briquete estão relacionadas às dimensões e processos de fabricação. O comprimento do briquete pode variar de 40 mm a 400 mm com diâmetro entre 40 mm e 100 mm. O pélete<sup>3</sup> possui dimensões menores quando comparadas ao briquete, apresentando diâmetros entre 4 mm e 18 mm e comprimentos de até 40 mm (BEZZON, 1994; DIAS, 2002). Em ambos os casos, a biomassa adensada é obtida por extrusão, diferenciando-se quanto à forma de compactação. Para produção de péletes, o material é forçado a passar por uma matriz de múltiplos furos através da ação de uma rosca sem fim. Já os briquetes são forçados a passar por uma matriz de furo único pela ação de um pistão ou de uma rosca. Em ambos os casos a matriz pode ser aquecida a uma temperatura entre 170°C e 250°C, devendo ser evitadas temperaturas acima de 250°C, por promoverem a degradação da lignina.

A lignina presente na semente triturada, por ser um polímero termoplástico, começa a escoar após o aquecimento sob temperaturas superiores a 170°C, passando a atuar como agente aglomerante. Ao se solidificar na superfície, além de contribuir para o aumento da resistência mecânica, também cria uma barreira à umidade, justificando a não utilização de produtos aglomerantes como cola, resina, cera ou amido (GENTIL, 2008) na manufatura do briquete.

## MASSA ESPECÍFICA

Medimos a massa específica (massa/volume) da semente moída com o seguinte procedimento: as amostras foram retiradas de um dos lotes descritos acima com granulometria igual ou inferior a 0,212 mm, para preencher um becker da marca Satelit (mod. HS100 com capacidade 10 ml e massa 11,250g), tomando cuidado para compactar o mínimo possível a amostra ao depositá-la. A massa do becker foi então medida em balança analítica da marca Marte (mod. AL 500). Esse procedimento foi realizado em triplicata. Com esse procedimento, obteve-se a massa específica da semente seca e moída, com granulometria igual ou inferior a 0,212mm:  $0,610\text{g}\cdot\text{ml}^{-1} \pm 0,042\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$ . Para a granulometria de 0,5mm obteve-se  $0,481\text{g}\cdot\text{ml}^{-1} \pm 0,001\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$ , e para 1,0mm o valor foi de  $0,680\text{g}\cdot\text{ml}^{-1} \pm 0,008\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$ .

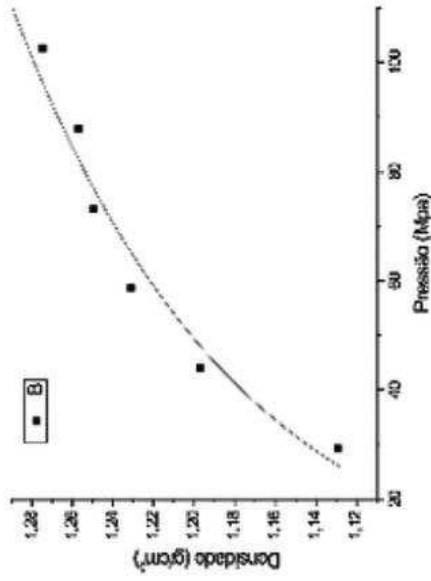
A densidade de um pó, especialmente com baixa granulometria, é muito sensível à pressão aplicada. Os valores acima são uma referência inicial em aplicações onde a massa total é relevante, como em logística, ou naquelas em que a diferença de densidade é o fator de separação dos materiais, como nos tanques de decantação.

## CURVA DE COMPACTAÇÃO

Para estimar a pressão ideal de compactação do pó no processo de manufatura de briquetes, as amostras foram moídas como descrito acima, utilizando um moinho de facas até atingir granulometria menor ou igual a 0,212mm, como detalhado anteriormente.

<sup>3</sup> Massa comprimida, de tamanho pequeno e muitas vezes redonda.

Depois de serem moídas as amostras, foram colocadas em molde cilíndrico com diâmetro interno de 13 mm para serem prensadas com ajuda de uma prensa hidráulica com capacidade para 15 toneladas. A massa média de cada amostra foi de 1g (+/- 0,6%). Para a compactação, foram utilizadas pressões entre 4 ton e 14 ton, sendo que, após a prensagem, as amostras foram pesadas com ajuda de uma balança analítica e medidas suas dimensões com um paquímetro para o cálculo do volume e densidade ( $D=Massa/Volume$ ) da amostra. A pressão foi calculada dividindo a força aplicada pela área transversal do molde (Figura 5).



**Figura 5.** Gráfico característico da relação entre Densidade x Pressão para a semente de açaí moída (granulometria menor ou igual a 0,212mm). Transformando o eixo da Pressão nos seus valores logarítmicos, a função da densidade pode ser assim escrita como uma reta:  $Y=0,7641+0,25748 \log(x)$ ;  $R^2 = 0,981$ .

Não se observou formação de trincas perpendiculares (laminação) à direção de aplicação de carga dos corpos de prova, indicando que na faixa até 100 MPa o corpo de prova se mantém íntegro. Apesar de não conclusiva, a curva sugere que a partir de 70 MPa a taxa de variação da densidade tende a diminuir com a pressão aplicada. Por isso escolhemos, arbitrariamente, a pressão de 88 MPa (correspondente a 12 T de carga aplicada para o molde utilizado) para a confecção dos corpos de prova para o ensaio mecânico dos briquetes.

## RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS BRIQUETES

Foram preparados quatro lotes de briquetes com 8% de umidade, sendo cada lote formado por 10 briquetes. Os briquetes foram moldados com comprimento de 35mm e diâmetro de 14mm, a partir de amostras com granulometria menor ou igual a 0,212mm, como descrito

anteriormente, sem aglutinante.

A metade de cada lote (5 briquetes) foi levada ao forno EDGCON 3P – 7000 à temperatura de 180°C por 24h. Posteriormente, os briquetes foram submetidos a testes de resistência à compressão longitudinal e radial, e resistência à flexão bi-apoiada, com o equipamento de testes mecânicos EMIC modelo DL-3000. Com este equipamento, foi possível determinar o ponto de ruptura dos briquetes, como mostrado na Tabela 2.

**Tabela 2.** Força de ruptura de briquetes submetidos ou não a tratamento térmico. Os briquetes, com comprimento de 35mm e diâmetro de 14mm, foram moldados a partir de sementes de açaí moída (granulometria menor ou igual a 0,212mm)

Tratamento	Resistência à compressão axial (Ca) [kgf]	Resistência à compressão radial (Cr) [kgf]	Resistência à flexão bi-apoiada (F <sub>ba</sub> ) [kgf]
Sem aquecimento	259,4	4,8	0,1
Com aquecimento (180°C)	309,2	31,7	2,2

Em relação ao ponto de aplicação da força, os briquetes são mais frágeis para forças aplicadas no centro, perpendicular ao eixo maior, quando apoiado nas suas duas extremidades. Como era de se esperar, o aquecimento a 180°C por 24 horas endureceu o briquete, conferindo-lhe resistências de 1,2 vezes (compressão radial) a 22 vezes (flexão bi-apoiada) maior. O briquete sem tratamento apresenta resistências relativamente baixas (especialmente ao longo do raio), o que inviabiliza seu transporte em escala comercial, mas em embalagens e empilhamentos adequados o briquete tratado não apresenta limitações tão estritas. De acordo com os dados da Tabela 2, os briquetes seriam mais bem preservados contra fraturas mecânicas se armazenados na posição vertical, de preferência em embalagens de papelão ou equivalentes.

## PÉLETES E CARVÃO

Brito et al. (1982) explica que há três métodos para se expressar a densidade do carvão vegetal: a densidade a granel, a densidade aparente e a densidade verdadeira. Para os caroços de açaí, a densidade a granel corresponde à razão de um volume pré-definido de

sementes de açaí dividida por sua massa, enquanto que a densidade aparente seria muito parecida com a densidade verdadeira e corresponderia à densidade da semente. Segundo Carvalho & Nakagawa (2000), as sementes de maior tamanho, ou as que apresentam maior densidade, são as que foram melhor nutridas durante seu desenvolvimento. Ou seja, sementes provenientes de áreas de cultivo com adubação tendem a ser mais densas, com maior concentração de carbono e, portanto, fornecerem carvão com maior poder calorífico. Luczynski (2008) mediu a densidade a granel usando a norma NBR 6922/81 e encontrou o valor de 723,15 kg m<sup>-3</sup> (0,723g·ml<sup>-1</sup>).

#### CAPACIDADE DE CARGA DO CARVÃO DA SEMENTE DE AÇAÍ

A resistência à compressão dos péletes de açaí foi realizada na Embrapa Instrumentação, em São Carlos, SP, em ensaios com 10 repetições utilizando instrumento para ensaios mecânicos da marca EMIC modelo DL3000. As sementes carbonizadas apresentam resistência a esforços de compressão de 7,2 kgf para carvões obtidos a 300°C, 2,6 kgf para carvões obtidos a 400°C e 2,3 kgf para carvões obtidos a 500°C, indicando que a resistência diminui em uma tendência exponencial com a temperatura de carbonização. Por outro lado, o armazenamento do pélete é favorecido por sua forma esférica, tamanho reduzido e resistência mecânica. Além disso, Uhlig e colaboradores (2008) indicam que a sustentabilidade da produção de ferro-gusa a partir de carvão vegetal está comprometida devido à forte dependência com o carvão proveniente de florestas nativas, o que poderia ser mitigado com o uso de péletes de açaí.

#### PODER CALORÍFICO

A tabela 3 representa o Poder Calorífico Superior (PCS) de diferentes biomassas comparadas à semente de açaí não carbonizado e carbonizado em diferentes temperaturas.

**Tabela 3.** Poder Calorífico Superior (PCS) de diferentes biomassas, sendo que a semente de açaí (SA) carbonizada a 500°C foi a que apresentou o maior valor. São usadas as seguintes siglas para as biomassas: SA - Semente de açaí; CSA - Carvão da Semente de Açaí; CCB - Casca da semente da Castanha-do-Brasil; OCB - Ouriço da Castanha-do-Brasil

Num	Biomassa	PCS (Kcal·Kg <sup>-1</sup> )
1	SA (100%)	4.275
2	CCB (100%)	4.278
3	SA (50%) + OCB (50%)	4.297
4	SA (50%) + CCB (50%)	4.308
5	SA (33,34%) + CCB (33,33%) + OCB (33,33%)	4.316
6	OCB (100%)	4.359
7	SA (100%) - queima incompleta	5.255
8	SA (100%) - 300°C	6.352
9	SA (100%) - 400°C	7.210
10	SA (100%) - 500°C	7.691

Quirino et al. (2005) apresentam o Poder Calorífico Superior de 240 espécies florestais. Das espécies listadas, a de menor poder calorífico foi a *Eriotheca globosa* (Puba colorada) com 3.888 Kcal·kg<sup>-1</sup> e a de maior valor foi a *Mesilaurus itauba* (Itauba) com 5.263 Kcal·kg<sup>-1</sup>. De acordo com os dados da Tabela 3, a semente de açaí apresentou valor intermediário de 4.275 Kcal·kg<sup>-1</sup>.

Na forma de carvão, a semente de açaí mostrou o maior valor de PCS. Vale et al. (2002) mediram o Poder Calorífico Superior do carvão obtido de *Eucalyptus grandis* em diferentes temperaturas de carbonização e obtiveram: a 300°C, PCS = 6.648 Kcal·kg<sup>-1</sup>; a 400°C, 7.261 Kcal·kg<sup>-1</sup>; e a 500°C, 7.604 Kcal·kg<sup>-1</sup>. Esses dados mostram o aumento da concentração energética em função da temperatura de carbonização e também o rendimento, um pouco superior do carvão da semente de açaí, cujo PCS é de 7.691 Kcal·kg<sup>-1</sup> a 500°C.

#### CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES GERAIS

A resistência mecânica do pélete de açaí é menor que a do briquete, e cai exponencialmente entre 300°C e 500°C (temperaturas de carbonização), entretanto seu poder calorífico aumenta 21% na mesma faixa de temperatura.

Apesar de não ter uma resistência excepcional, o pélete requer embalagens flexíveis mais baratas para o transporte, apresentou a maior concentração energética das biomassas comparadas e dispensa a etapa de formatação, o que reduz o custo de produção. O pélete também tem um maior leque de aplicações, podendo ser usado quando se requer um produto pulverizado como na indústria de cimento.

## Referências

- ALTMAN, R. F. A. O Carvão do açai (Euterpe oleracea Mart.) **Boletim Técnico do Instituto Agrônomico do Norte**, Belém, PA, v. 31, p. 109-111, 1956.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: Carvão vegetal: análise imediata: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986. 5 p.
- BEZZON, G. **Síntese de novos combustíveis sólidos a partir de resíduos agroflorestais e possíveis contribuições no cenário energético brasileiro**. 1994. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 1994.
- BRITO, J. O. Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. **Documentos Florestais**, Piracicaba, n. 9, p. 1-19, maio, 1990.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da amazônia. **IPEF, Piracicaba**, v. 2, n. 5, p. 1-25, 1981.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; MURAMOTO, M. C.; COUTO, H. T. Z. do. **Estimativa da densidade a granel do carvão vegetal a partir de sua densidade aparente**. Piracicaba: IPEF, 1982. (Circular Técnica, 150).
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes**: ciência, tecnologia e produção. 4. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2000. 588 p.
- COSTA, E. C. **Secagem Industrial**. São Paulo: Editora Blücher, 2007. 178 p.
- DIAS, J. **Utilização da biomassa: avaliação de resíduos e utilização de pellets em ldeiras domésticas**. 2002. Tese (Doutorado) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2002.
- FURTADO, C. **Formação econômica do Brasil**. 34a ed. São Paulo: Companhia das letras, 2007.
- GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e Economia do Briquete de Madeira**. 2008. 195 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.
- IBGE. **Sistema IBGE de recuperação automática de dados SIDRA: Tabela 289: Quantidade produzida na extração vegetal por tipo de produto extrativo: Produção de açai de 1990 a 2009**. 2011. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=t&o=18&i=P&c=289>>. Acesso em: 15 out. 2011.
- INFOENER. **Carvão vegetal no Brasil**. Disponível em: [http://infoener.itec.usp.br/scripts/biomassa/br\\_carvao.asp](http://infoener.itec.usp.br/scripts/biomassa/br_carvao.asp). Acesso em: 1 fev. 2012.
- LUCZYNSKI M. **Estudo da viabilidade econômica para a utilização da semente da Euterpe oleracea Mart. (açai) como recurso energético**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.
- MARTINS, M. A.; PESSOA, J. D. C.; MATTOSO, L. H. C. Avaliação termogravimétrica de resíduos da agroindústria do açai (euterpe oleracea mart.). **Rev. Bras. Fruticultura**. [S. l.], v. 31, p. 3, 2009.
- PESSOA, J. D. C.; SILVA, P. V. da S. Açai (Euterpe oleracea) fruit water uptake during storage and pre-processing. **Fruits**, Paris, v. 62, n. 5, p. 295-302, 2007.
- QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e materiais lignino-celulósicos. **Revista da Madeira**, São Paulo, n. 89, p. 100-106, 2005.
- RIBEIRO, G. V. **Morfoanatomia do fruto de açai em função do teor de água utilizando microscopia óptica e microtomografia de Raios-X**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.
- RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, U. F.; FARINAS, C. S.; BERTUCCI, V.; LEMO, V. A. Produção de complexos lignocelulíticos em substratos derivados de resíduos agroindustriais por fermentação semisólida. In: **WORKSHOP DE BIOTRANSFORMAÇÃO**, 2008, Guarujá. **Anais ...** [S. l.: s. n.]. 2008.
- SVENNINGSON, P. Biomass briquettes in the Dominican Republic. Part II: Technical analysis. **Biomass**, London, v. 13, n. 4, p. 275-291, 1987.
- TOWNSEND, C. R.; COSTA, N. L.; PEREIRA, R. G. A. P.; SENGGER, C. C. D. **Características Químico-Bromatológicas do caroço de açai**. Brasília, DF: Ministério da Agricultura e do abastecimento, 2001. 5 p. (Comunicado Técnico, n. 193).
- UHLIG, A.; GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T. O uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica e o impacto sobre as mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Energia**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 2, p. 67-85, 2008.
- VALE, A. T. do; ABREU, V. L. S.; GONÇALEZ, J. C.; COSTA, A. F. da. Estimativa do poder calorífico superior do carvão vegetal de madeiras de Eucalyptus grandis em função do teor de carbono fixo e do teor de materiais voláteis. **Brasil florestal**, Brasília, DF, n. 73, p. 47 - 52, 2002.