

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR DANIELE FILIPPETTO

..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 15 / 02 / 2008

Carlos A. Luengo
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado

Autor: **Daniele Filippetto**
Orientador: **Carlos Alberto Luengo**
Co-orientador: **Felix Eliecer Fonseca Felfli**

11/2008

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado

Autor: **Daniele Filippetto**
Orientador: **Carlos Alberto Luengo**
Co-orientador: **Felix Eliecer Fonseca Felfli**

Curso: Planejamento de Sistemas Energéticos

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Campinas, 2008
S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

F478b Filippetto, Daniele
Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade
técnico-econômica e potencial de mercado / Daniele
Filippetto. --Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientadores: Carlos Alberto Luengo, Felix Eliecer
Fonseca Felfli.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Briquetes (Combustível). 2. Resíduos vegetais. 3.
Biomassa vegetal. I. Luengo, Carlos Alberto. II. Felfli,
Felix Eliecer Fonseca. III. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. IV.
Título.

Título em Inglês: Briquetting of vegetal residue: technical and economic
feasibility and market potential

Palavras-chave em Inglês: Briquets, Briquettes, Briquetting machine, Vegetal
Residues, Biomass

Área de concentração: -

Titulação: Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos

Banca examinadora: Caio Glauco Sánchez, Walfrido Alonso Pippo

Data da defesa: 15/02/2008

Programa de Pós-Graduação: Planejamento de Sistemas Energéticos

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade
técnico-econômica e potencial de mercado**

**Autor: Daniele Filippetto
Orientador: Carlos Alberto Luengo
Co-orientador: Felix Eliecer Fonseca Felfli**

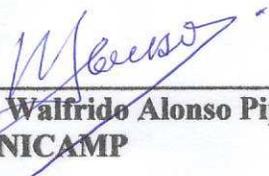
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



**Prof. Dr. Carlos Alberto Luengo, Presidente
IFGW/UNICAMP**



**Prof. Dr. Caio Glauco Sánchez
FEM/UNICAMP**



**Prof. Dr. Walfrido Alonso Pippo
IFGW/UNICAMP**

Campinas, 15 de fevereiro de 2008

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha querida esposa, pelo encorajamento e pela compreensão
A meus filhos Leonardo e Bruno, pelas horas de alegria

Urubu!

Urubu!

E' tutto urubu!

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Carlos Alberto Luengo, meu orientador, pelo apoio acadêmico e pela disponibilidade no uso das estruturas do Laboratório de Combustíveis Alternativos (Instituto de Física – IFGW).

A Felix Eliecer Fonseca Felfli pelo apoio, os conselhos e a paciência que permitiram a realização da pesquisa e a redação da dissertação.

A Dilcio José Rocha e Juan Miguel Mesa Pérez, pela disponibilidade das estruturas e dos equipamentos da Bioware.

A Henry, Robson e Thiago pela ajuda indispensável à realização dos testes.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de Treinamento Técnico (06/55429-8) e pelo apoio financeiro (PIPE 03/13313-5).

Aos colegas do Grupo de Combustíveis Alternativos pelas orientações e os conselhos.

Aos funcionários da Oficina de Mecânica pelo apoio técnico e a José Luis pelos ensaios de resistência dos briquetes.

A minha esposa, Lienne, pelas correções lingüísticas.

Á criação de frangos, pela valiosa contribuição científica à minha pesquisa.

Resumo

FILIPPETTO, Daniele, *Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado*. 2008. 73 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – Campinas.

Neste trabalho desenvolveu-se um estudo técnico-econômico sobre a briquetagem de resíduos vegetais focado na tecnologia da briquetadeira do tipo parafuso sem-fim, ainda inédita no Brasil. A vantagem dessa tecnologia é a produção de briquetes mais compactos, que além de servir para combustão direta, também são adequados para torrefação, carbonização e gaseificação. Investigou-se preliminarmente o mercado de briquetes no Brasil, através de um levantamento das empresas produtoras, que proporcionou dados sobre tecnologias empregadas, quantidades produzidas e preços de venda. Esse levantamento sugeriu a existência de um potencial de mercado para introdução de prensas de parafuso sem-fim. Estudou-se o desempenho de um protótipo de briquetadeira de parafuso sem-fim construído pela empresa Bioware Ltda, em parceria com a Universidade Estadual de Campinas. Avaliaram-se dados de produtividade e gasto de energia bem como as propriedades físico-químicas dos briquetes produzidos. Constatou-se o bom desempenho técnico do protótipo e a boa qualidade dos briquetes, de acordo com dados encontrados em literatura. Realizou-se um estudo de caso de uma planta de briquetagem que evidenciou a viabilidade econômica dessa tecnologia.

Palavras Chave

- Briquetes, Briquetadeira, Resíduos Vegetais, Biomassa

Abstract

FILIPPETTO, Daniele, *Briquetting of vegetal residues: technical and economic feasibility and market potential*. 2008. 73 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – Campinas.

In this work a technical and economic study about briquetting of vegetable residues focused on screw briquetting technology – still not introduced in Brazil – was developed. The advantage of this technology is the production of more compact briquettes that, as well as for direct burning purpose, are suitable for torrefaction, carbonization and gasification. The Brazilian briquettes market was previously investigated by means of a survey on production factories. This survey provided information about present technologies, briquettes production quantities, and sale price. The investigation suggested the existence of a market potential for introducing screw briquetting machines. The performance of a prototype of screw briquetting machine built by Bioware Ltda in partnership with the State University of Campinas was examined. Data on productivity and energy requirements were investigated and chemical and physical properties of produced briquettes were analyzed. A good technical performance of the machine and a good quality of the briquettes were observed. A case study on a screw briquetting plant was investigated and it provided economic feasibility.

Key words

Briquets, Briquettes, Briquetting machine, Vegetal Residues, Biomass

Índice

Capítulo 1: Introdução	1
Capítulo 2: Compactação de biomassa	3
2.1 <i>Compactação de biomassa: conceitos e histórico</i>	3
2.2 <i>Mecanismos de compactação</i>	4
2.3 <i>Vantagem da compactação</i>	4
2.4 <i>Resíduos compactáveis</i>	5
2.5 <i>Tecnologias de compactação</i>	5
2.5.1 Prensa de pistão mecânico	6
2.5.2 Prensa de parafuso sem-fim	7
2.5.3 Prensa de rolo	10
2.5.4 Prensa peletizadora	11
2.6 <i>Energia requerida para a compactação</i>	12
2.7 <i>Fatores que influenciam a compactação</i>	12
2.7.1 Efeito da temperatura	12
2.7.2 Efeito da pressão	12
2.7.3 Efeito do teor de umidade	13
2.7.4 Efeito do tamanho das partículas	13
2.8 <i>Outros componentes de uma planta de briquetagem</i>	13
2.9 <i>Comparação das briquetadeiras de pistão e de parafuso</i>	14
2.10 <i>Melhoramentos das briquetadeiras de parafuso</i>	14
2.10.1 Redução do desgaste da rosca	15
2.10.2 Redução da energia de compactação	16
2.11 <i>Viabilidade econômica da briquetagem</i>	16
Capítulo 3: Levantamento sobre a briquetagem de resíduos vegetais no Brasil e proposta tecnológica	18
3.1 <i>Metodologia de pesquisa</i>	18
3.2 <i>Resultados do levantamento</i>	19
3.2.1 Empresas de briquetagem e tecnologias empregadas	19

3.2.2	Matéria-prima	20
3.2.3	Produção mensal	21
3.2.4	Preço de venda	21
3.2.5	Extensão do mercado consumidor	22
3.3	<i>Proposta tecnológica da briquetadeira de parafuso sem-fim</i>	23
Capítulo 4: Testes de compactação		24
4.1	<i>Descrição da briquetadeira BIOTOR-R100</i>	24
4.1.1	Acionamento e controle da briquetadeira	27
4.1.2	Geometria das matrizes	27
4.2	<i>Caracterização da biomassa</i>	29
4.2.1	Análise imediata	29
4.2.2	Distribuição granulométrica	29
4.2.3	Densidade aparente	30
4.3	<i>Resultados dos testes de briquetagem</i>	31
4.3.1	Curvas de potência e produtividade <i>versus</i> rotação do motor	31
4.3.2	Influência do comprimento da matriz	35
4.3.3	Matriz de dois estágios	37
4.3.4	Matriz de conicidade reduzida	38
4.4	<i>Caracterização dos briquetes</i>	38
4.4.1	Densidade	38
4.4.2	Análise imediata	39
4.4.3	Resistência mecânica dos briquetes	39
Capítulo 5: Estudo de viabilidade econômica		42
5.1	<i>Investimento</i>	42
5.2	<i>Mão-de-obra</i>	43
5.3	<i>Insumos</i>	43
5.4	<i>Custos de manutenção, depreciação e seguro.</i>	44
5.5	<i>Impostos</i>	44
5.6	<i>Projeção de vendas</i>	44
5.7	<i>Desempenho econômico da planta</i>	46
5.8	<i>Indicadores de Rentabilidade</i>	52
5.9	<i>Comparação e discussão dos resultados</i>	53
5.10	<i>Análise de sensibilidade</i>	54
Capítulo 6: Conclusões		57
6.1	<i>Sugestões para futuros trabalhos.</i>	58
Referências bibliográficas		60

Lista de figuras

Figura 2.1. Prensa de pistão mecânico (ERIKSSON; PRIOR, 1990).	7
Figura 2.2. Detalhe da prensa de parafuso cônico (BHATTACHARYA; SETT; SHRESTHA, 1989).	8
Figura 2.3. Prensa de parafuso com matriz aquecida (BHATTACHARYA; SETT; SHRESTHA, 1989). ..	9
Figura 2.4. Briquetes de prensa de parafuso com matriz de seção circular.	10
Figura 2.5. Prensa de rolo (BHATTACHARYA; SETT; SHRESTHA, 1989).	11
Figura 2.6. Detalhe de peletizadora (BHATTACHARYA; SETT; SHRESTHA, 1989).	11
Figura 3.1. Distribuição das empresas de briquetagem no Brasil	20
Figura 3.2. Preço dos briquetes praticado no mercado nacional pelas empresas produtoras	22
Figura 4.1. Briquetadeira BIOTOR-R100	25
Figura 4.2. Detalhe do aquecimento da matriz.	25
Figura 4.3. Parafuso sem-fim	26
Figura 4.4. Briquetadeira BIOTOR-R100 com acabamento final	26
Figura 4.5. Briquetes de seção redonda.	28
Figura 4.6. Briquetes de seção redonda.	28
Figura 4.7. Pedacos de briquetes de seção quadrada.	28
Figura 4.8 Gráfico da distribuição granulométrica da casca de arroz	30
Figura 4.9. Curvas características de produtividade e potência	32
Figura 4.10. Energia específica na produção de briquetes	33
Figura 4.11. Exemplo de fase regular na absorção de potência	34
Figura 4.12. Exemplo de fase instável na absorção de potência	35
Figura 4.13. Produtividade em função do comprimento da matriz e da rotação do motor	36
Figura 4.14. Prensa preparada para teste de resistência radial	40
Figura 4.15. Amostra de briquete de casca de arroz quebrada após o ensaio mecânico	41
Figura 4.16. Briquete de prensa de pistão	41

Lista de tabelas

Tabela 2.1. Prensa de pistão <i>versus</i> prensa de rosca sem-fim (GROVER; MISHRA; CLANCY, 1994)...	15
Tabela 4.1. Análise imediata da casca de arroz (base seca)	29
Tabela 4.2. Produtividade e potência em função da velocidade do motor	31
Tabela 4.3. Produtividade de briquetes em função do comprimento da matriz e da velocidade do motor .	36
Tabela 4.4. Potência média absorvida pelo motor.....	37
Tabela 4.5. Densidade dos briquetes	39
Tabela 4.6. Caracterização química dos briquetes	39
Tabela 5.1. Discriminação dos custos de investimento.....	43
Tabela 5.2. Projeção de vendas para o caso A	45
Tabela 5.3. Projeção de vendas para os casos B e C	45
Tabela 5.4. Estrutura de custos operacionais anuais do caso A	46
Tabela 5.5. Estrutura de custos operacionais anuais do caso B.....	46
Tabela 5.6. Estrutura de custos operacionais anuais do caso C.....	47
Tabela 5.7. Custos para produzir uma tonelada de briquetes	47
Tabela 5.8. Resultado de exercício - Caso A.....	48
Tabela 5.9. Resultado de exercício - Caso B.....	49
Tabela 5.10. Resultado de exercício - Caso C.....	50
Tabela 5.11. Fluxo de Caixa - Caso A	51
Tabela 5.12. Fluxo de Caixa - Caso B.....	51
Tabela 5.13. Fluxo de Caixa - Caso C.....	52
Tabela 5.14. Indicadores de rentabilidade.....	53
Tabela 5.15. Projeções do preço de venda dos briquetes	54
Tabela 5.16. Sensibilidade ao custo da energia elétrica	55
Tabela 5.17. Sensibilidade ao custo da serragem.....	55
Tabela 5.18. Sensibilidade à variação do preço de venda	55

Capítulo 1

Introdução

A busca de fontes energéticas alternativas e sustentáveis tornou-se, nos últimos anos, um assunto de importância primária. No ramo dos combustíveis, a utilização de biomassa é vista como uma das possíveis alternativas ao uso das fontes fósseis. A sustentabilidade do uso de biomassa, todavia, requer um manuseio cuidadoso e consciente dos recursos naturais, para evitar desequilíbrios ambientais e destruição de ecossistemas. O reaproveitamento energético de resíduos vegetais gerados a partir de várias atividades agro-industriais pode ser uma forma de reduzir a pressão sobre recursos naturais diretamente explorados como fonte de combustíveis. A compactação desses resíduos providencia um produto (briquete) diretamente competitivo com lenha e carvão vegetal, podendo, em alguns casos, ser um ótimo substituto. A compactação é uma alternativa não somente para aproveitar resíduos como para facilitar o transporte destes para aplicações em lugares distantes da fonte. Um levantamento sobre a briquetagem no Brasil evidenciou que nesse país existem algumas dezenas de empresas que compactam resíduos de biomassa. Todas elas utilizam briquetadeiras de pistão, algumas de fabricação nacional, outras importadas. Segundo os dados levantados, não existe, no Brasil, nenhuma empresa que produza briquetadeiras de parafuso sem-fim para compactação de resíduos vegetais, apesar desse tipo de máquina ser utilizado, há anos, em alguns países. Essas briquetadeiras apresentam uma mecânica mais simples e são economicamente viáveis para pequenas e médias empresas que geram volumes modestos de resíduos. Os briquetes produzidos com as briquetadeiras de parafuso sem-fim resultam mais coesos e resistentes, podendo ser transportados com menor perda de material e, além de servir para combustão direta, também são adequados para outras aplicações, podendo ser

torrefeitos ou convertidos em carvão vegetal. Esse trabalho tem como objetivo fundamental realizar um estudo da viabilidade técnica e do potencial de mercado das briquetadeiras de parafuso sem-fim no Brasil. Para isto foram conduzidos vários testes com um protótipo, desenvolvido pela Bioware Ltda em parceria com a UNICAMP, objetivando caracterizar seu desempenho e a qualidade dos briquetes. Também foi desenvolvida uma pesquisa de campo com a finalidade de caracterizar o estado atual da produção e comércio de briquetes no Brasil e de determinar as possibilidades de introduzir as briquetadeiras de rosca sem-fim no mercado local. Este estudo foi complementado por uma análise de viabilidade econômica.

Capítulo 2

Compactação de biomassa

A utilização de resíduos vegetais (galhos, casca de arroz e café, bagaço, serragem, etc.) como combustível representa uma interessante alternativa aos combustíveis sólidos tradicionais (lenha e carvão). O modo mais fácil e simples de utilizar o poder calorífico destes materiais é a combustão direta. Entretanto, esta prática apresenta algumas desvantagens (SRIVASTAVA; MAHESHWARI; OHIA, 1995):

- Os resíduos vegetais possuem baixa densidade e muitos deles se encontram em forma de pó, provocando poeira e poluição, tornando difícil e caro o manuseio, o transporte, o armazenamento e seu uso como combustível.
- A maioria dos resíduos agro-florestais contém elevada umidade. Portanto, entre 18 e 20% do calor gerado na combustão é consumido para secar a própria biomassa, perdendo assim grande parte de seu potencial energético.

A compactação dos resíduos vegetais em forma de briquetes (briquetagem) pode ser uma solução para alguns destes problemas.

2.1 Compactação de biomassa: conceitos e histórico

A briquetagem de biomassa é uma prática muito antiga e uma das diversas técnicas que em termos gerais são classificadas como tecnologia de compactação. O processo de briquetagem consiste na aplicação de pressão em uma massa de partículas dispersas com objetivo de torná-las um sólido geométrico compacto de alta densidade. Esta operação pode ser realizada com ou sem a presença de um agente aglutinante.

Srivastava, Maheshwari e Ohia (1995) relataram que a briquetagem, como tecnologia, foi inventada no começo do século XIX. Na segunda metade do século XIX foi desenvolvida a primeira máquina a pistão para produzir briquetes de turfa (STAUBER, 1895). Em 1923, a sociedade “Pacific Coal and Wood” de Los Angeles estava já comercializando briquetes de resíduos de madeira, usando uma prensa especialmente projetada. Os briquetes eram cilíndricos, com diâmetro aproximado de 7,5 cm e comprimento de 25 cm, amarrados com arame para manter a coesão durante o transporte. Relatos indicam que estes briquetes apresentavam excelentes propriedades de combustão (SRIVASTAVA; MAHESHWARI; OHIA, 1995).

Desde então várias outras aplicações e tecnologias de briquetagem foram implementadas em vários países do mundo. Bhattacharya, Sett e Shrestha (1989), após realizar um estudo sobre as prensas para compactação de biomassa, encontraram 152 produtores no mundo, sendo a maioria concentrada na Alemanha.

2.2 Mecanismos de compactação

Existem vários mecanismos que permitem a ligação entre as partículas da biomassa compactada, e geralmente todos eles colaboram para obter a resistência e a coesão final do briquete. Grover e Mishra (1996) identificaram os seguintes mecanismos:

- Ação de aglutinantes (já presentes na matéria-prima ou adicionados);
- Forças de Van Der Waals;
- Forças de valência;
- Emaranhamento (entrelaçamento) entre partículas;

Os compostos ligantes que já estão presentes na matéria-prima podem ser ativados pelas elevadas pressões e temperaturas alcançadas no processo de compactação. Pode ser o caso da lignina, presente nas células da biomassa, que amolece entre 100 e 190 °C e age como uma cola entre as partículas. Os mecanismos de emaranhamento e a ativação de forças de valência e de Van Der Waals acontecem pela forte aproximação e deformação das partículas provocada pelas pressões de compactação. Mesmo depois da compactação, as partículas da matéria-prima ainda são perceptíveis.

2.3 Vantagem da compactação

Bhattacharya, Sett e Shrestha (1989) apontaram as seguintes vantagens na compactação:

- O processo aumenta o poder calorífico do material por unidade de volume;
- O produto briquetado é mais fácil para ser manipulado, transportado e armazenado;
- O combustível produzido é uniforme em tamanho e qualidade;
- O processo ajuda a resolver problemas de disposição de resíduos;
- O processo ajuda a limitar o desmatamento ou a falta de combustível nas regiões rurais, enquanto disponibiliza um substituto para a lenha.

2.4 Resíduos compactáveis

Os resíduos podem ser agrupados em três categorias principais:

- Resíduos agrícolas, gerados diretamente no campo durante a colheita da safra (por exemplo: a palha dos cereais);
- Resíduos florestais (galhos, folhas, etc., gerados na exploração florestal);
- Resíduos agro-industriais, gerados no beneficiamento de grãos, gramíneas e madeira (casca de arroz, de café, de amendoim, de nozes, bagaço de cana, serragem, etc).

Em princípio, todos os resíduos vegetais são potencialmente compactáveis, desde que se encontrem nas condições apropriadas de umidade e tamanho de partícula. Todavia, os resíduos que realmente despertam interesse para compactação são aqueles que se encontram concentrados em um único lugar, pois – como comentado antes – os custos de coleta e de transporte afetam consideravelmente a viabilidade econômica da produção e venda de briquetes (ERIKSSON; PRIOR, 1990).

2.5 Tecnologias de compactação

Bhattacharya, Sett e Shrestha (1989) classificaram os processos de compactação de biomassa em duas categorias principais: compactação *quente em alta pressão* (CQ) e compactação *fria em baixa pressão* (CF).

O primeiro tipo (CQ) é o mais importante em relação à variedade de matérias que pode processar e às características dos produtos obtidos, tanto que se tornou o mais comum e o termo compactação usualmente se refere implicitamente a este tipo de técnica. A conveniência de praticar a compactação em condições de elevada pressão consiste na obtenção de um produto com maior densidade e maior durabilidade, especialmente em relação ao manuseio e transporte. Em relação à temperatura, a compactação em condições acima de 100 °C permite a fluidificação da lignina contida nas células da biomassa, a qual age como um aglutinante entre as partículas, dispensando, assim, o uso de ligantes adicionais na biomassa, como é comum nas técnicas CF. Além disso, temperaturas elevadas evaporam parte da umidade da biomassa, melhorando o poder calorífico do produto compactado.

Os equipamentos empregados na compactação podem ser classificados em quatro grupos:

- Prensas de pistão;
- Prensas de parafuso sem-fim;
- Prensas de rolo;
- Prensas peletizadoras.

2.5.1 Prensa de pistão mecânico

Na prensa de pistão mecânico, a matéria-prima é alimentada e compactada em uma matriz por meio de um pistão que se movimenta alternadamente (Figura 2.1). A matriz é geralmente constituída por um conduto afunilado de seção circular, que serve para compactar e extrudar na forma de briquetes. A fricção da matéria-prima contra a parede da matriz provoca um aquecimento que varia de 150 à 300 °C (BHATTACHARYA; SETT; SHRESTHA, 1989). O material extrusado prossegue o caminho por um conduto de diâmetro levemente maior do que a seção da matriz, para manter a forma dos briquetes enquanto se resfriam. O resfriamento é necessário para permitir a condensação do vapor, do contrário a pressão do vapor provocaria fissuras superficiais que fragilizariam os briquetes.

As prensas de pistão são normalmente movidas por energia elétrica e dotadas de volante, o qual transmite o movimento ao pistão por meio de uma biela (mecanismo de excêntrica). O volante serve para compensar as flutuações na demanda de energia, acumulando energia nos períodos de mínima demanda (retorno e alimentação) e descarregando-a nos períodos de máxima demanda (compactação/extrusão). Existem, também, prensas de pistão movidas por sistemas

hidráulicos, que em geral encontram aplicações na compactação *fria* e de baixa pressão, pois não conseguem alcançar as elevadas pressões e temperaturas das prensas de pistão mecânico (BHATTACHARYA; SETT; SHRESTHA, 1989).

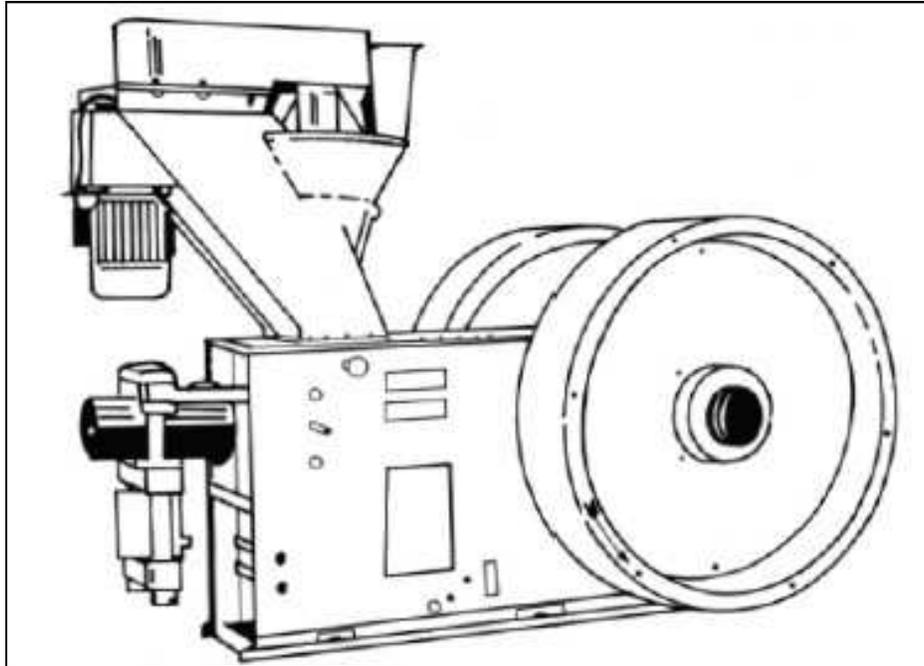


Figura 2.1. Prensa de pistão mecânico (ERIKSSON; PRIOR, 1990).

As prensas de pistão são comumente dimensionadas para capacidades superiores a 1000 kg/h, pois máquinas de capacidades menores não são economicamente viáveis (ERIKSSON; PRIOR, 1990). Os briquetes apresentam geralmente forma cilíndrica, com diâmetro entre 50 e 100 mm. O problema típico deste tipo de prensas é o desgaste da matriz e do pistão.

2.5.2 Prensa de parafuso sem-fim

Na prensa de parafuso sem-fim o trabalho de adensamento é realizado por um parafuso que transporta e empurra a matéria-prima através de uma matriz, onde sofre a extrusão que forma o briquete. A matriz pode apresentar várias formas. Tipicamente é cilíndrica ou levemente cônica. Em alguns modelos apresenta seção transversal poligonal. A matriz molda o briquete de acordo com a própria forma, sendo as mais convenientes as formas quadrada ou retangular para facilitar a estocagem dos briquetes. A forma poligonal também impede que a biomassa gire junto com a rosca, evitando assim atritos não desejados. Por esta razão, quando a seção da matriz é circular,

na sua parede interior são geralmente escavados pequenos canais paralelos ao eixo de extrusão, os quais guiam a biomassa em movimento retilíneo. Existem basicamente três tipos de prensas de parafuso:

- Prensa com parafuso cônico;
- Prensa com parafuso cilíndrico e com matriz aquecida;
- Prensa com parafusos gêmeos.

2.5.2.1 *Prensa com parafuso cônico*

Eriksson e Prior (1990) encontraram um único produtor deste tipo de briquetadeira. O parafuso cônico alimenta a matéria-prima e a pré-compacta em uma antecâmara, posteriormente um cabeçote de compressão (patenteado), compacta e extrusa a biomassa em uma matriz (Figura 2.2). A matriz pode ser formada por furos múltiplos de 28 mm de diâmetro ou por um único furo de 95 mm. O aquecimento elevado gerado pelo atrito requer um sistema de resfriamento ao redor da matriz. A capacidade produtiva varia entre 600 e 1000 kg/h, dependendo do tipo de material. Apesar da excelente qualidade dos briquetes, o defeito desta máquina é o rápido desgaste da cabeça e os custos das peças de reposição.

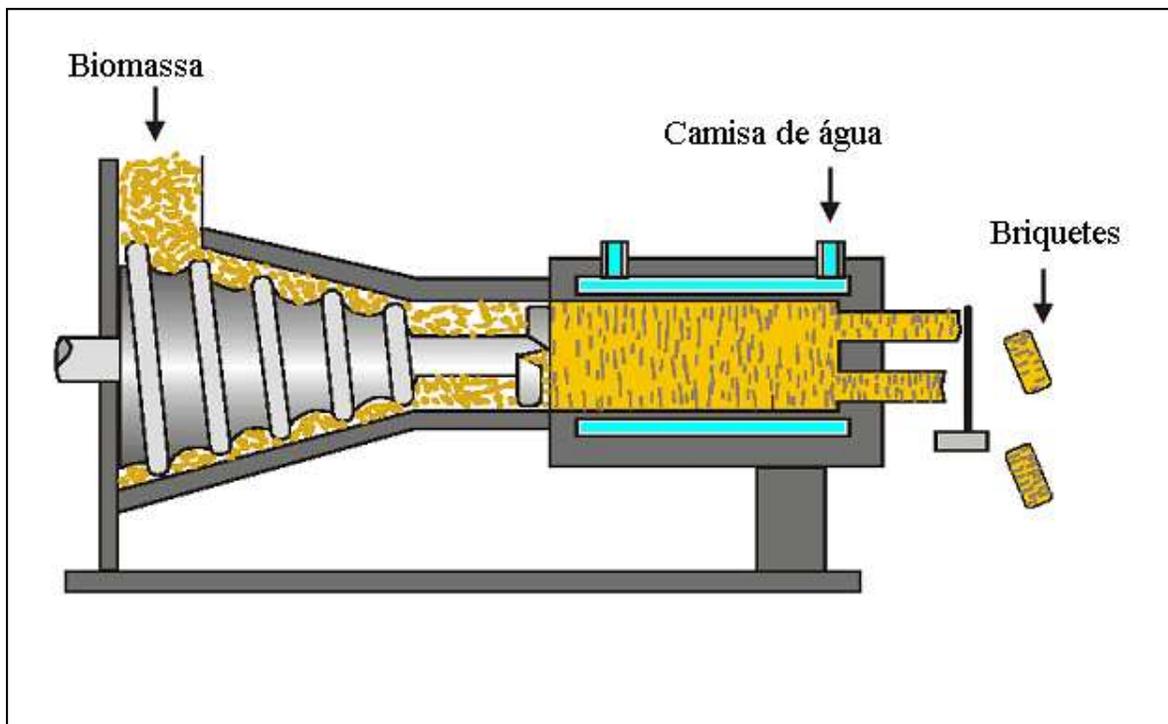


Figura 2.2. Detalhe da prensa de parafuso cônico (BHATTACHARYA; SETT; SHRESTHA, 1989).

2.5.2.2 Prensa com parafuso cilíndrico e matriz aquecida

É o tipo mais comum de briquetadeira de parafuso (Figura 2.3). O parafuso transporta e empurra a matéria-prima contra a matriz. A compactação é possível porque o material que se acumula na matriz realiza uma contrapressão que comprime o material fresco empurrado pelo parafuso. A contrapressão é tanto elevada quanto maior for o atrito entre o material extrudado e a matriz. Este sistema precisa de aquecimento na matriz para alcançar as temperaturas ideais de trabalho (a matriz é geralmente mantida entre 250 e 300 °C). O aquecimento da matriz pode ser realizado com uma resistência elétrica em torno da parede externa ou com uma pequena fornalha. Os briquetes saem levemente torrados na superfície, o que melhora a resistência à umidade, e com um furo central de 15-25 mm de diâmetro, devido ao eixo do parafuso (Figura 2.4). As elevadas temperaturas provocam formação de vapor e fumaça, que encontram um caminho de fuga preferencial no furo central dos briquetes em extrusão. Geralmente as prensas são equipadas com chaminé para a coleta da fumaça. A capacidade de produção varia tipicamente entre 50 e 500 kg/h (ERIKSSON; PRIOR, 1990).

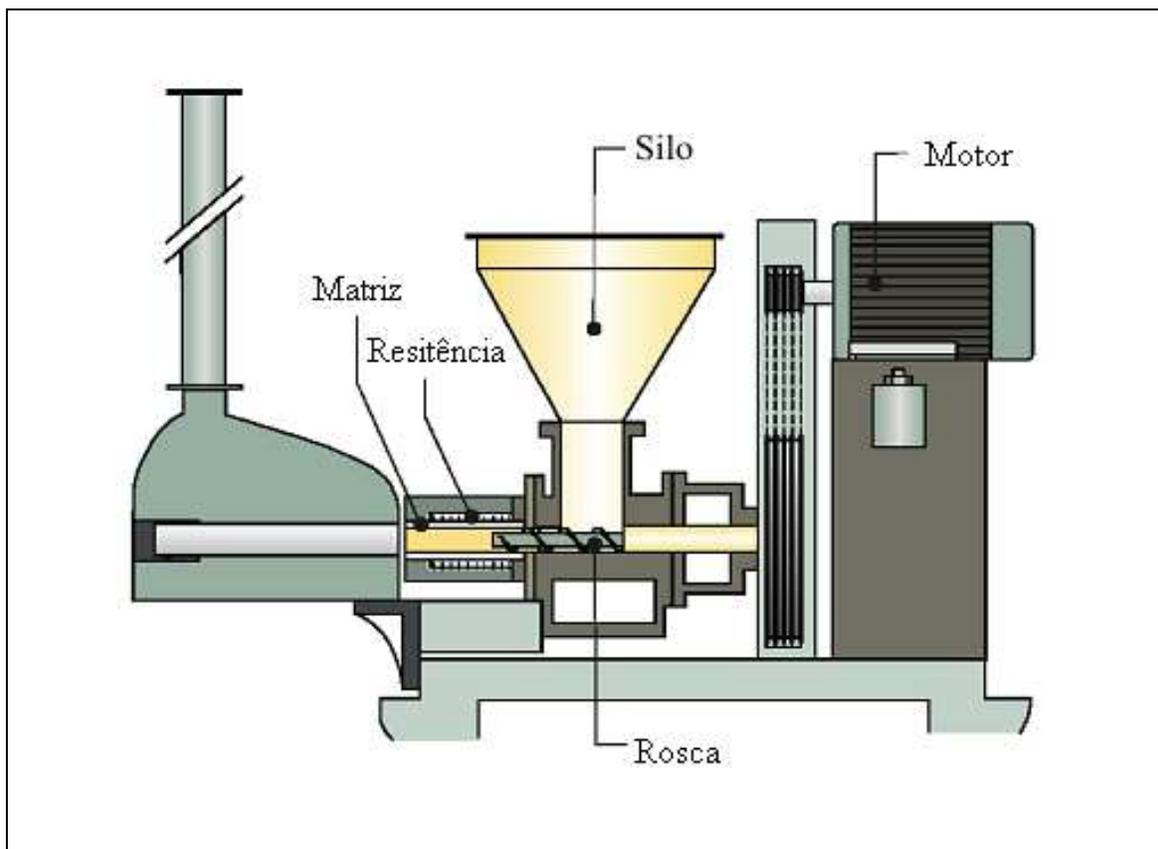


Figura 2.3. Prensa de parafuso com matriz aquecida (BHATTACHARYA; SETT; SHRESTHA, 1989).

O maior problema de manutenção destas prensas é o desgaste da rosca, por causa do caráter abrasivo da biomassa e das elevadas velocidades relativas entre a rosca e as partículas. De modo especial são afetados os filetes mais próximos à matriz, pois são os que sofrem os maiores atritos com a matéria-prima compactada. Bhattacharya, Sett e Shrestha (1989) relataram que a duração dos parafusos de máquinas tailandesas é cerca de 100 horas, sendo que depois disso é preciso consertar os filetes com reposição de nova solda de espessamento, com os conseguintes custos e tempos de inatividade da máquina.



Figura 2.4. Briquetes de prensa de parafuso com matriz de seção circular.

2.5.2.3 *Prensa de parafusos gêmeos*

Esta máquina é constituída por um par de parafusos acoplados em eixos paralelos para empurrar o material conjuntamente. O sistema é projetado de forma a conseguir extrusar partículas de tamanho superior do que os outros tipos de prensas de parafuso (até 80 mm) e com elevada taxa de umidade (até 25%). A capacidade de produção varia de 2800 até 3600 kg/h dependendo da composição da matéria-prima. Foi encontrado um único fabricante deste tipo de prensa (BHATTACHARYA; SETT; SHRESTHA, 1989).

2.5.3 Prensa de rolo

Neste tipo de máquina a matéria-prima é direcionada contra um par de rolos que giram em sentidos opostos (Figura 2.5). O material é comprimido no espaço entre os rolos produzindo um briquete na forma de uma pequena almofada. Esta tecnologia demanda um insumo de partículas de tamanho menores do que os outros processos. O produto apresenta durabilidade inferior

porque o breve tempo de residência na prensa não permite alcançar as pressões e as temperaturas ideais para fluidificar a lignina (BHATTACHARYA; SETT; SHRESTHA, 1989).

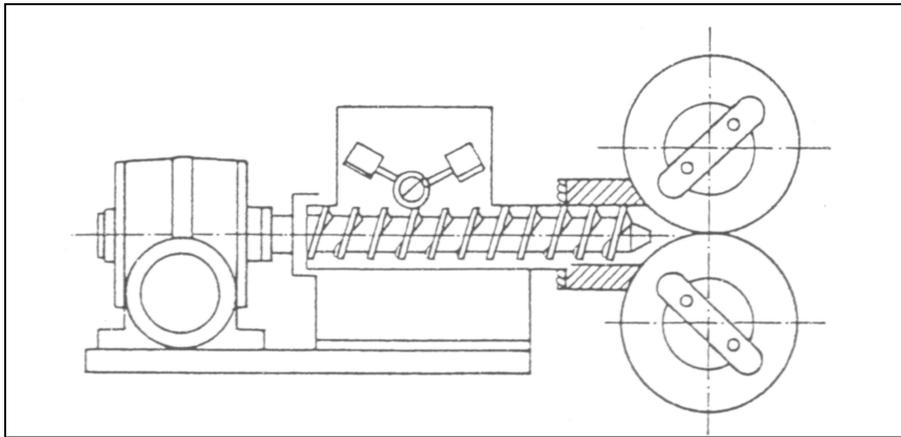


Figura 2.5. Prensa de rolo (BHATTACHARYA; SETT; SHRESTHA, 1989).

2.5.4 Prensa peletizadora

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 dos furos (Figura 2.6). 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 (BHATTACHARYA; SETT; SHRESTHA, 1989).

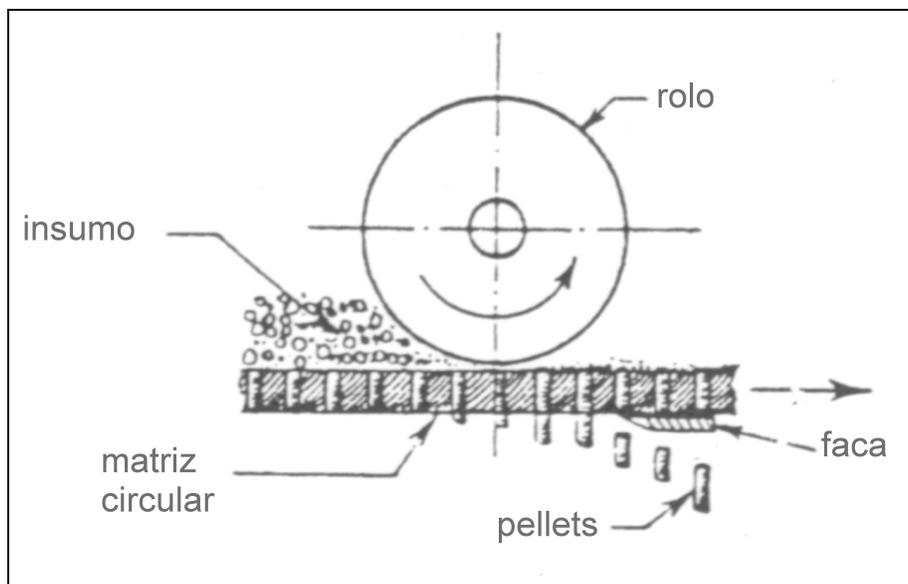


Figura 2.6. Detalhe de peletizadora (BHATTACHARYA; SETT; SHRESTHA, 1989).

2.6 Energia requerida para a compactação

É fundamental conhecer a demanda de energia para compactar a biomassa a fim de avaliar os benefícios da tecnologia em uso e para melhorar a eficiência no projeto de novas máquinas. A energia necessária na compactação depende do tipo de matéria-prima, do nível de compactação requerido e do tipo de sistema utilizado. Quanto maior a qualidade requerida do produto compactado, maior será a energia necessária. Em geral, pode se esperar um gasto energético de compactação entre 0,05 e 0,2 kWh/kg de material processado (BHATTACHARYA; SETT; SHRESTHA, 1989).

2.7 Fatores que influenciam a compactação

Certo número de variáveis pode influenciar as propriedades do produto compactado. Isto inclui as propriedades da matéria-prima, como por exemplo, o tamanho das partículas, o teor de umidade e a densidade aparente, assim como as variáveis do processo de compactação (pressão, temperatura, uso de ligantes, etc.).

2.7.1 Efeito da temperatura

A temperatura de compactação exerce uma função muito relevante nas propriedades finais do produto e no consumo energético durante a compactação. Reed, Trezek e Diaz (1980) demonstraram que o trabalho de compactação e a pressão podem ser reduzidos pela metade se a matéria-prima é pré-aquecida antes de ser compactada. Bhattacharya, Sett e Shrestha (1989) mostraram que a resistência do produto compactado depende da temperatura de compactação e a máxima resistência é obtida com temperaturas em torno de 220 °C.

2.7.2 Efeito da pressão

A densidade final do produto depende da pressão aplicada durante a compactação. Vários pesquisadores como Reed, Trezek e Diaz (1980) encontraram uma relação linear entre a pressão aplicada e a densidade final. Faborode e O'Callaghan (1986) propuseram uma relação entre a pressão aplicada na matéria-prima e a taxa de compactação (razão entre a densidade final e a densidade inicial):

$$P = \frac{K_0}{b} [e^{b(r-1)} - 1]$$

Onde K_0 representa o módulo de incompressibilidade da matéria-prima, b é um índice da porosidade inicial e r é a taxa de compactação.

As briquetadeiras que se encontram no mercado trabalham com pressões da ordem de 100 MPa (ERIKSSON; PRIOR, 1990).

2.7.3 Efeito do teor de umidade

Dependendo do tipo de matéria-prima e do processo de compactação existe uma faixa de teor de umidade na qual o material pode ser compactado adequadamente. Um excesso de umidade pode provocar explosões devido à formação de vapor. Por outro lado, uma matéria-prima muito seca dificulta os mecanismos de ligação entre as partículas. Bhattacharya, Sett e Shrestha (1989) recomendaram que o valor ótimo de umidade deve estar entre 8 e 12%.

2.7.4 Efeito do tamanho das partículas

A matéria-prima ideal deveria ser composta por uma mistura de partículas de vários tamanhos, sendo que a medida máxima depende do tipo de material e do diâmetro da matriz. Geralmente é aceitável uma dimensão entre 8 e 10 mm, enquanto grandes prensas com matrizes de 125 mm aceitam partículas de até 15 mm. O tamanho inicial das partículas influencia também a densidade final dos briquetes. Uma matéria-prima de baixa granulometria resulta em briquetes muito densos, mas requer pressões e temperaturas muito elevadas para aglomerar as partículas sem adição de ligantes (ERIKSSON; PRIOR, 1990).

2.8 Outros componentes de uma planta de briquetagem

A matéria-prima que vai ser compactada pode exigir um pré-tratamento antes de ser introduzida na prensa. Dependendo das condições iniciais do material pode ser necessária a trituração para diminuir o tamanho das partículas e/ou a secagem para reduzir o teor de umidade. Uma planta de briquetagem pode, portanto, estar equipada com trituradores e/ou com secadores. Existem vários tipos de técnicas de secagem, desde a simples e econômica secagem ao sol até sistemas mais sofisticados como o forno rotatório. A escolha por um dos sistemas depende fundamentalmente de avaliações econômicas (ERIKSSON; PRIOR, 1990; GROVER; MISHRA, 1996). Os sistemas mais sofisticados garantem secagens rápidas e controladas, mas influenciam consideravelmente nos custos de investimento e se justificam apenas para grandes volumes de

produção. Para melhorar o desempenho energético da briquetadeira pode ser instalado um sistema de pré-aquecimento da matéria-prima constituído por um trocador de calor tubular onde a matéria-prima passa por um tubo central, aquecido em torno por um fluxo de ar quente ou de óleo térmico (GROVER, 1996; BHATTACHARYA; LEON; RAHMAN, 2002).

Além dos sistemas de tratamento da matéria-prima, deve ser implementado um sistema de armazenamento para o montante de insumo coletado (resíduos soltos) e para os briquetes produzidos.

2.9 Comparação das briquetadeiras de pistão e de parafuso

Na produção de briquetes combustíveis as tecnologias de compactação mais empregadas são a prensa de pistão e a prensa de parafuso sem-fim (GROVER; MISHRA; CLANCY, 1994). É relevante apresentar uma comparação entre as vantagens e desvantagens das duas tecnologias.

O processo de compactação da matéria-prima e extrusão dos briquetes no sistema de parafuso é realizado de forma contínua e uniforme, enquanto no sistema de pistão os briquetes cilíndricos são formados a partir da compactação de material em forma de discos gerados pela alternância de um pistão, onde cada disco corresponde a um ciclo de carga do pistão. A geometria da rosca molda os briquetes com um furo central, correspondente ao eixo do parafuso. A briquetadeira de pistão apresenta um desgaste dos componentes em contato com a biomassa (pistão e matriz) que é inferior ao dos componentes da prensa de parafuso (rosca e matriz). A continuidade e homogeneidade do processo de extrusão na prensa de parafuso permitem a produção de briquetes de qualidade notavelmente superior. Estes briquetes apresentam maior resistência e menor friabilidade; o furo central aumenta a área superficial melhorando a estabilidade e homogeneidade da combustão. Estas características fazem com que os briquetes de prensa de parafuso sejam adequados para serem torreficados ou pirolizados, melhorando ainda mais as propriedades de combustão (GROVER; MISHRA; CLANCY, 1994; FELFLI, 2003). Na Tabela 2.1 Grover, Mishra e Clancy (1994) sintetizaram a comparação entre as duas tecnologias.

2.10 Melhoramentos das briquetadeiras de parafuso

As prensas de parafuso são reconhecidas como a mais promissora tecnologia de briquetagem, pois são capazes de produzir briquetes de excelente qualidade, adequados para

torrefação (GROVER; MISHRA; CLANCY, 1994). Entretanto é necessário resolver alguns problemas técnicos para tornar estas máquinas realmente competitivas. Fundamentalmente os dois inconvenientes importantes das briquetadeiras de parafuso são o rápido desgaste da rosca e a maior energia necessária para compactar a matéria-prima em comparação com a energia gasta nas prensas de pistão. Alguns estudos de otimização já foram conduzidos, os quais serão descritos a seguir.

Tabela 2.1. Prensa de pistão versus prensa de rosca sem-fim (GROVER; MISHRA; CLANCY, 1994)

	<i>Prensa de pistão</i>	<i>Prensa de parafuso</i>
<i>Taxa ótima de umidade na matéria-prima</i>	<i>10-15%</i>	<i>8-9%</i>
<i>Desgaste das partes em contato</i>	<i>baixo (pistão e matriz)</i>	<i>elevado (parafuso)</i>
<i>Produção da máquina</i>	<i>pulso</i>	<i>contínuo</i>
<i>Gasto energético</i>	<i>50 kWh/ton</i>	<i>60 kWh/ton</i>
<i>Densidade do briquete</i>	<i>1-1,2 g/cm³</i>	<i>1-1,4 g/cm³</i>
<i>Manutenção</i>	<i>elevada</i>	<i>baixa</i>
<i>Prestações dos briquetes na combustão</i>	<i>tendência de desmanchar na grelha, fumaça</i>	<i>queimam bem, fumaça mínima</i>
<i>Torrificação</i>	<i>não possível</i>	<i>possível</i>
<i>Uso em gaseificadores</i>	<i>não viável</i>	<i>viável</i>
<i>Homogeneidade dos briquetes</i>	<i>não-homogêneos</i>	<i>homogêneos</i>

2.10.1 Redução do desgaste da rosca

Mishra (1996) estudou diversos materiais para o corpo da rosca e combinou-os com várias ligas de revestimento aplicadas com solda. A combinação que ofereceu o melhor compromisso entre eficácia e economia foi constituída por uma base em aço EN19, temperado até 45-50 RC, com revestimento de carbureto de tungstênio, de dureza de 68-72 RC. Os experimentos foram conduzidos com uma briquetadeira da marca Shimada, de concepção japonesa, usando tanto a rosca original (de material desconhecido), quanto roscas construídas com outras combinações de materiais. A rosca original, após 4 horas compactando serragem sem pré-aquecimento, perdeu sua funcionalidade e teve que ser recondicionada, enquanto a rosca em aço EN19 e carbureto de tungstênio funcionou por 17 horas nas mesmas condições de trabalho. Em seguida, foram conduzidos experimentos com matéria-prima pré-aquecida e o parafuso em aço EN19 revestido chegou a durar até 44 horas. A drástica redução de desgaste com o pré-aquecimento da matéria-prima deve ser atribuído a uma mudança das propriedades da biomassa que se torna mais branda.

Vale ressaltar que a qualidade dos briquetes produzidos não muda com o pré-aquecimento da matéria-prima (GROVER, 1996).

2.10.2 Redução da energia de compactação

O pré-aquecimento da matéria-prima, além de diminuir o desgaste da rosca, permite também uma significativa redução da energia necessária para realizar a compactação e aumenta a capacidade produtiva da briquetadeira. Com serragem pré-aquecida até 90 °C e compactada na prensa de parafuso Mishra et al. (1996) observaram uma redução da energia elétrica entre 15 e 20%. Bhattacharya, Leon e Rahman (2002) realizaram o pré-aquecimento de casca de arroz entre 100 e 140 °C em um trocador de calor aquecido por gás de combustão, e nessas condições houve uma redução média do consumo de energia em 23,5% no aquecedor da matriz, e de 10,8% no motor elétrico, correspondendo a uma redução global de 10,2%. É evidente o benefício na resistência elétrica da matriz, pois a matéria-prima não precisa ser aquecida a partir da temperatura ambiente como seria no caso sem pré-aquecimento. O passo seguinte na redução de gasto energético é a substituição da resistência elétrica em torno da matriz por um sistema de aquecimento mais econômico. Bhattacharya, Leon e Rahman (2002) projetaram e testaram uma fornalha alimentada por briquetes para aquecer a matriz, mantendo a temperatura entre 300 e 320°C durante o funcionamento da briquetadeira. A economia de energia elétrica foi de 35%, sem mudar a qualidade dos briquetes produzidos.

2.11 Viabilidade econômica da briquetagem

Para avaliar a viabilidade econômica de uma planta de produção de briquetes devem ser considerados vários aspectos, como por exemplo, o preço do combustível que os briquetes vão substituir (lenha e carvão), custo de produção dos briquetes, custos e características da matéria-prima, distância de transporte. A complexidade da planta de briquetagem influencia significativamente nos custos de investimento e deve ser avaliada em função dos volumes de produção previstos.

Em muitos países os preços de lenha e carvão são suficientemente baixos a ponto de inviabilizar a comercialização de briquetes ou deixarem margens de lucro muito estreitas. (ERIKSSON; PRIOR, 1990). Porém, existem casos de sucesso onde a prática da briquetagem consegue se consolidar. O programa “Renewable Energy Technologies in Asia: A Regional

Research and Dissemination Programme” financiado pela Swedish International Development Cooperation Agency (SIDA), iniciado em 1997 e concluído em 2004, tinha como objetivo a difusão em alguns países da Ásia de tecnologias para a exploração de fontes renováveis de energia. Entre elas estava incluída a tecnologia de briquetagem. Durante o desenvolvimento do programa, coordenado pelo Instituto Asiático de Tecnologia (AIT), foram atentamente avaliadas as barreiras locais que dificultavam a implementação da briquetagem nas regiões rurais. A maioria dessas barreiras era de natureza tecnológica (necessidade de muita manutenção das máquinas) e econômica (custo elevado das máquinas e das peças de reposição, produzidas no exterior). Foram, portanto, desenvolvidas briquetadeiras de tecnologia mais simples e robusta, que pudessem ser construídas e consertadas localmente com preços bem mais acessíveis, diminuindo também os custos de manutenção. Um trabalho paralelo de treinamento de profissionais e de envolvimento de autoridades locais permitiu a implantação com sucesso da prática da briquetagem (KUMAR; BHATTACHARYA, 2005).

Eriksson e Prior (1990) afirmaram que o Brasil apresenta condições favoráveis para o mercado dos briquetes por uma fortuita combinação de fatores:

- Existem muitas concentrações localizadas de resíduos vegetais, especialmente na indústria de madeira, e na indústria agro-alimentar, o que reduz os custos de coleta e de transporte e permite a instalação de plantas de briquetagem diretamente nas proximidades destas indústrias;
- Existe uma forte demanda de combustíveis sólidos (lenha e carvão vegetal), como resultado de programas políticos de valorização dos recursos energéticos nacionais;
- Existem restrições ambientais para a exploração de madeira.

Capítulo 3

Levantamento sobre a briquetagem de resíduos vegetais no Brasil e proposta tecnológica

Para entender melhor a situação brasileira com relação à briquetagem de resíduos vegetais, foi conduzido um levantamento baseado na busca de empresas do setor, que foram, em seguida, entrevistadas telefonicamente.

3.1 Metodologia de pesquisa

As empresas de briquetagem foram procuradas por meio de busca na internet, através de pesquisas por palavras chave, utilizando sites de busca e sites de bases de dados comerciais. As firmas encontradas foram contatadas telefonicamente e entrevistadas. Para cada entrevista foram perguntados os seguintes dados:

- Tipo de matéria-prima briquetada;
- Tipo, marca e capacidade horária das briquetadeiras empregadas;
- Produção mensal de briquetes (toneladas);
- Extensão geográfica do mercado de venda;
- Preço de venda.

A pesquisa na internet e os telefonemas foram realizados no mês de maio de 2007. Nem todas as empresas quiseram ou souberam responder a todas as perguntas. Alguns contatos encontrados revelaram-se desatualizados, sendo que em alguns casos as empresas tinham encerrado a atividade de briquetagem. Isto sugere uma certa dinâmica do setor, podendo supor

que paralelamente a empresas encerradas, outras estejam sendo abertas. Foram também consultadas duas empresas brasileiras que fabricam briquetadeiras: a Biomax e a Lippel, instaladas no estado do Rio Grande do Sul e em Santa Catarina, respectivamente. Por questões comerciais, essas empresas não disponibilizaram os contatos dos clientes que compraram briquetadeiras. A Biomax declarou ter vendido no Brasil cerca de 180 briquetadeiras em vinte anos de atividade, e afirmou que quase todas estão ainda em operação. A Lippel não revelou o número de briquetadeiras vendidas. A longevidade e a presença ativa no mercado dessas empresas dão respaldo à hipótese de vivacidade do setor de briquetagem.

3.2 Resultados do levantamento

3.2.1 Empresas de briquetagem e tecnologias empregadas

Foram encontradas 15 empresas produtoras de briquetes em atividade, distribuídas entre os Estados de São Paulo (4 firmas), Santa Catarina (4 firmas), Mato Grosso (2 firmas), Espírito Santo (2 firmas), e uma firma em cada um dos estados de Goiás, Pará e Tocantins (Figura 3.1).

Todas as empresas utilizam briquetadeiras de pistão, a maioria do tipo volante-biela, enquanto apenas duas firmas declararam adotar máquinas de pistão hidráulico. Entre as marcas das briquetadeiras de pistão mecânico, utilizadas pelas indústrias pesquisadas, se destaca um produtor (Biomax), que forneceu máquinas de capacidade entre 0,5 e 2 t/h nominais. Uma firma declarou possuir uma briquetadeira de marca Lippel (brasileira) e duas firmas compraram briquetadeiras estrangeiras. A respeito das briquetadeiras de pistão hidráulico, uma foi construída pelo próprio produtor de briquetes, enquanto a outra foi importada.

A maioria das empresas nasceu especificamente para produzir e comercializar briquetes a partir de resíduos fornecidos por terceiros, mas em alguns casos trata-se de indústrias cuja atividade primária é algum processamento de madeira e que investiram na briquetagem como estratégia de agregar valor aos resíduos gerados internamente à empresa.

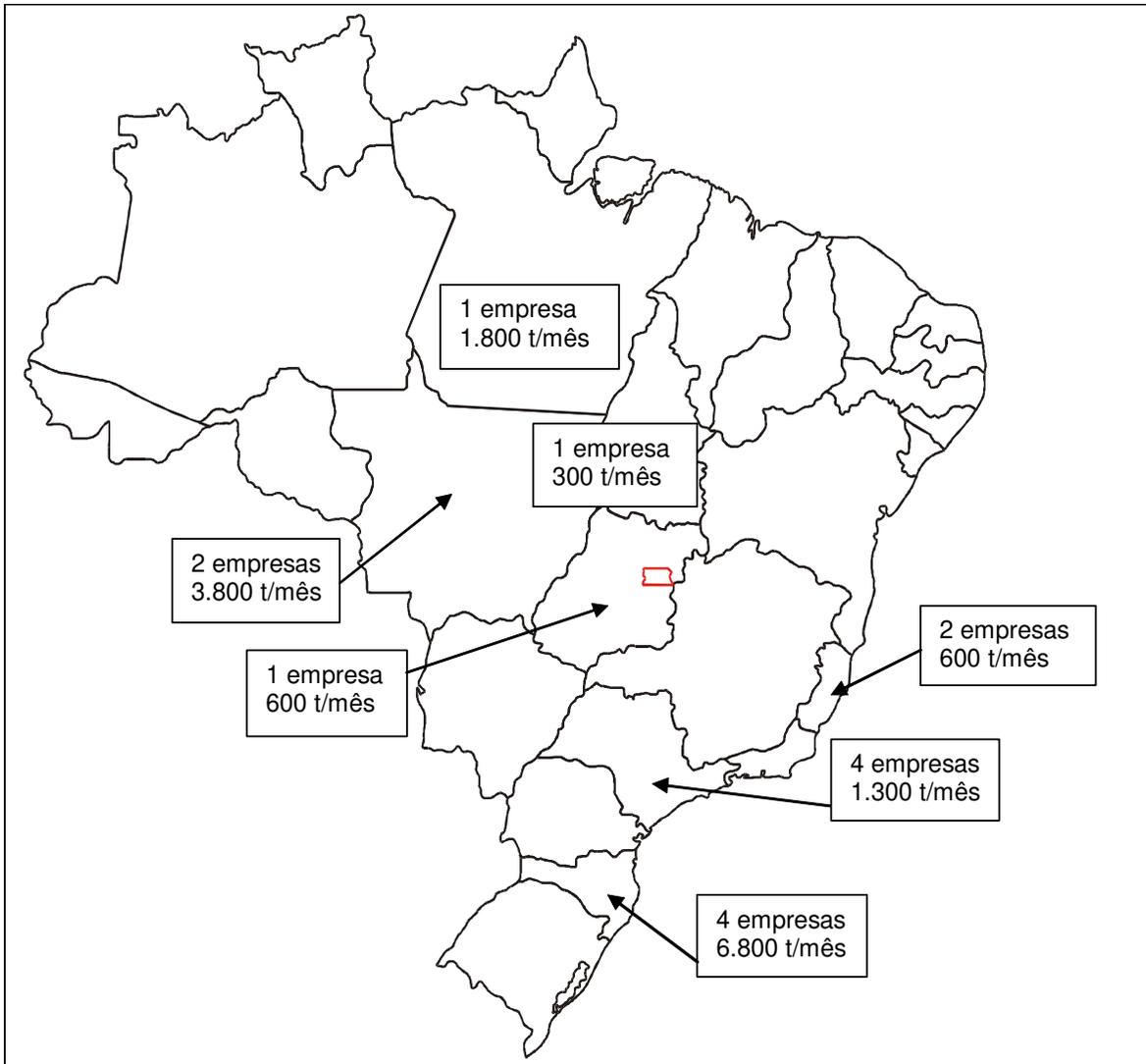


Figura 3.1. Distribuição das empresas de briquetagem no Brasil

3.2.2 Matéria-prima

Quase a totalidade das empresas declarou briquetar resíduos de madeira, discriminados entre: serragem, maravalha, resíduos florestais e casca de eucalipto. Foi encontrada uma empresa que, além de maravalha, compacta também casca de arroz (em Mato Grosso). Outra empresa de São Paulo compacta resíduos da produção de lápis.

A firma Biomax declarou ter vendido briquetadeiras para empresas que processam outros resíduos, tais como bagaço de cana, algodão, casca de café. Essas empresas, todavia, não foram encontradas nas bases de dados consultadas.

3.2.3 Produção mensal

A produção das empresas se revelou bastante variada, nem sempre proporcional à capacidade instalada. A menor produção levantada pertence a uma empresa do estado de São Paulo, que declarou produzir cerca de 200 t/mês (com uma capacidade instalada de 1,5 t/h), enquanto a produtividade máxima levantada foi de 5000 t/mês, que pertencia a uma firma de Santa Catarina, com uma capacidade instalada de 7 t/h. Nesse caso, a empresa declarou trabalhar em três turnos, inclusive nos feriados. Em geral, a produção da maioria das empresas se coloca entre 300 e 700 t/mês, sendo que apenas 4 indústrias produzem mais de 1.000 t/mês. Somando a produção de todas as empresas levantadas, se obtêm um valor próximo a 15.000 toneladas mensais de briquetes. Uma das indústrias entrevistadas (cuja atividade principal não é a briquetagem) destina uma parte da produção de briquetes para auto-consumo (alimentação das caldeiras) e vende o restante para um único comerciante varejista. As outras empresas revendem a produção inteira. O valor de 15.000 toneladas por mês deve ser considerado com cuidado, pois pode não refletir a real produção global de briquetes no Brasil. De fato, há possibilidade de existirem empresas que praticam briquetagem em pequena escala, com um mercado marcadamente pontual, que não almejam visibilidade por meio da internet ou de bases de dados comerciais.

3.2.4 Preço de venda

Quase todas as empresas entrevistadas frisaram o fato de o preço de venda dos briquetes variar muito em relação ao tipo de cliente, da quantidade encomendada, e eventualmente, da distância de entrega nos casos em que esse serviço seja oferecido pelo próprio fabricante. Algumas firmas se recusaram a declarar o preço, por considerá-lo uma informação estratégica da empresa. Em geral, os preços levantados variaram entre um mínimo de 100 R\$/t (preço FOB referido a uma empresa que tem outra atividade principal e que revende os briquetes para um comerciante) e um máximo de 420 R\$/t (referido a uma empresa que se especializou na venda varejista – incluindo entrega – direcionada para pizzarias, padarias e similares, na cidade de São Paulo). Excluindo os dois valores extremos mencionados, o restante dos preços levantados oscilou entre 200 e 305 R\$/t (FOB) no mercado interno, com prevalência de valores perto de 250

R\$/t (Figura 3.2). Entre as empresas que exportam briquetes para o exterior, uma declarou conseguir negócios com preços acima de 300 \$/t.

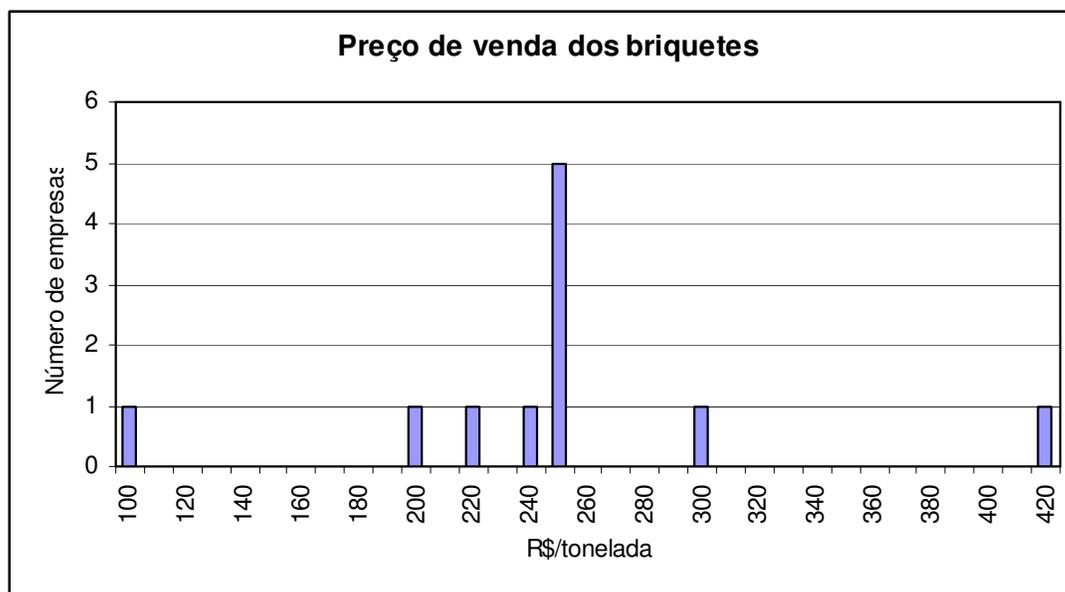


Figura 3.2. Preço dos briquetes praticado no mercado nacional pelas empresas produtoras

Algumas empresas produtoras de briquetes, assim como vários revendedores, montaram sistemas de venda pela Internet, direcionados a pequenos consumidores. Nesse caso os briquetes são entregues em sacos, com peso entre 25 e 40 kg, e preço que varia entre 450 e 560 R\$ por tonelada, geralmente incluindo o frete. Na maioria dos sites de venda, os briquetes são chamados de “lenha ecológica”, deixando entender que o alvo são consumidores sensíveis a assuntos ambientais, dispostos a gastar mais em relação à lenha tradicional a fim de preservar a natureza.

3.2.5 Extensão do mercado consumidor

A extensão geográfica do mercado de venda dos briquetes revelou-se muito variada. Cerca da metade das empresas que respondeu à pergunta, declarou focalizar-se num mercado regional, tipicamente de abrangência estadual ou interestadual. Uma empresa afirmou que trabalha num raio econômico de 300 km. Outra metade das empresas declarou vender para todo o Brasil e, além disso, quatro dessas firmas ainda exportam para os Estados Unidos e/ou para Europa.

A escolha da extensão do mercado não é estritamente relacionada com a quantidade de briquetes produzidos, pois, por exemplo, há uma indústria que vende todas as 3.500 toneladas de

produção mensal num mercado regional, enquanto alguns produtores de menor porte conseguem atingir mercados estrangeiros.

3.3 Proposta tecnológica da briquetadeira de parafuso sem-fim

Com base nos dados levantados, ficou clara a ausência de briquetadeiras de parafuso sem-fim no mercado brasileiro. De acordo com as informações encontradas na literatura, as briquetadeiras de parafuso sem-fim são tipicamente dimensionadas para produzir entre 50 e 500 kg/h, enquanto as briquetadeiras de pistão são geralmente viáveis economicamente com capacidades acima de 1000 kg/h. As briquetadeiras de parafuso sem-fim, portanto, poderiam encontrar um mercado favorável em indústrias de pequeno e médio porte, cuja produção de resíduos não ultrapasse a quantidade de 1000 kg/h, pois para tais indústrias seria inviável a introdução de briquetadeiras de pistão, que no caso se tornariam sub-utilizadas.

Além disso, com as briquetadeiras de parafuso sem-fim, seria possível produzir briquetes de melhor qualidade, principalmente devida a maior resistência mecânica e menor friabilidade. Essa característica torna os briquetes mais versáteis e mais competitivos no mercado. Uma possibilidade de aumentar o valor tanto qualitativo quanto econômico dos briquetes é a torrefação. Os briquetes torreficados apresentam melhores propriedades de combustão (maior poder calorífico, baixa produção de fumaça), e podem ser utilizados em outros processos como gaseificação, redução de metais, uso doméstico, competindo diretamente com o carvão vegetal. Segundo Felfli (2003) o preço de venda dos briquetes torreficados pode ser em torno de 450 R\$/ton.

Capítulo 4

Testes de compactação

4.1 Descrição da briquetadeira BIOTOR-R100

A prensa BIOTOR-R100 é um protótipo de briquetadeira de parafuso sem-fim desenvolvido pela Bioware Ltda em colaboração com a Unicamp. Foi dimensionada para uma produção nominal teórica de 110 kg/h de briquetes. As figuras 4.1, 4.2 e 4.3 mostram os principais componentes da briquetadeira:

1. Motor elétrico de 15 kW;
2. Transmissão por correias;
3. Mancal de rolamentos;
4. Silo de alimentação;
5. Sede do parafuso sem-fim;
6. Matriz de extrusão;
7. Estrutura;
8. Resistência elétrica de aquecimento da matriz e isolamento térmico (Figura 4.1);
9. Termopar de controle da temperatura (Figura 4.2);
10. Parafuso sem-fim (Figura 4.3).



Figura 4.1. Briquetadeira BIOTOR-R100

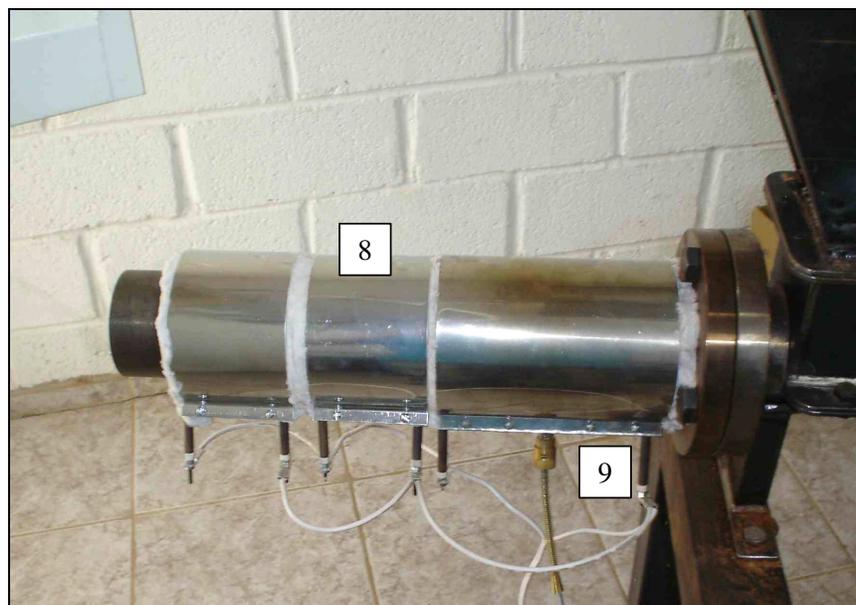


Figura 4.2. Detalhe do aquecimento da matriz

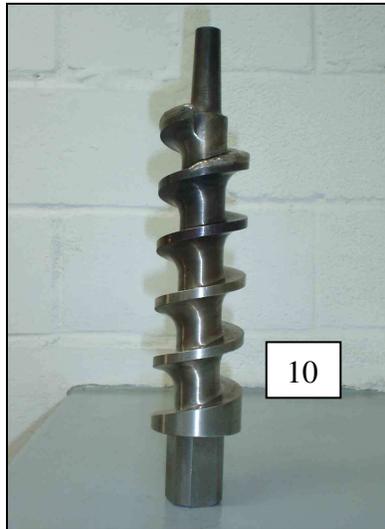


Figura 4.3. Parafuso sem-fim

A Figura 4.4 mostra a briquetadeira com o seu acabamento final.



Figura 4.4. Briquetadeira BIOTOR-R100 com acabamento final

4.1.1 Acionamento e controle da briquetadeira

O motor da briquetadeira está acoplado a um inversor de frequência (marca WEG, modelo CFW-09) que permite regular a sua velocidade de rotação e monitorar vários parâmetros de funcionamento. Para a aquisição de dados em tempo real foi usado um computador, conectado ao inversor de frequência através de um super-drive modelo WEG CFW-09.

Um regulador programável de temperatura comanda o acionamento (*liga/desliga*) da resistência elétrica que aquece a matriz. O regulador monitora a temperatura da matriz por meio de um termopar em contato com a sua superfície externa. Por causa da inércia térmica da matriz, acontece, na prática, um ciclo de histerese que faz com que a temperatura na matriz oscile de algumas dezenas de graus Celsius em relação à temperatura programada no regulador.

4.1.2 Geometria das matrizes

O interior da matriz é caracterizado por duas partes funcionais: o primeiro trecho apresenta perfil cônico para compactar a biomassa e realizar a extrusão; o segundo trecho é reto e permite estabilizar o briquete recém-formado e criar – por fricção contra as paredes – a contra-pressão necessária à compactação dos resíduos no trecho cônico.

O acoplamento da matriz com o corpo da briquetadeira é realizado através de uma flange. Isto facilita a remoção e a substituição por outras matrizes de geometria diferente. Durante os ensaios de briquetagem foram testadas diversas matrizes. As variáveis geométricas que mudaram foram:

- Comprimento total da matriz;
- Forma da seção transversal (redonda com ranhuras, octogonal, quadrada com cantos arredondados);
- Grau do cone de extrusão.

Todas as três geometrias das seções transversais permitiram moldar briquetes que reproduzissem fielmente a forma da matriz, demonstrando que a biomassa apresenta grande plasticidade durante a extrusão. As Figura 4.5 e Figura 4.6 mostram alguns briquetes produzidos com matriz de seção redonda e a Figura 4.7 mostra em detalhe dois pedaços de briquetes de seção quadrada.



Figura 4.5. Briquetes de seção redonda



Figura 4.6. Briquetes de seção redonda



Figura 4.7. Pedacos de briquetes de seção quadrada

4.2 Caracterização da biomassa

A matéria-prima utilizada nos testes de briquetagem foi casca de arroz, fornecida pela empresa beneficiadora *Biguá Alimentos* de Campinas. A biomassa foi caracterizada laboratorialmente através das seguintes análises:

- Análise imediata;
- Análise granulométrica;
- Determinação da densidade aparente.

4.2.1 Análise imediata

Foi realizada seguindo as normas ASTM D 1102-84 e ASTM E 872-82. As amostras de biomassa, contidas em cadinhos, foram pesadas e secadas em estufa a 110°C. A diferença de peso após secagem permitiu determinar a porcentagem de umidade. Em seguida foram aquecidas em mufla até 950°C por três minutos para permitir a liberação de voláteis e depois foram pesadas. A última etapa foi deixar as amostras na mufla por 6 horas a 750°C para queimar o restante do carbono ainda presente (carbono fixo). A massa remanescente das amostras ficou constituída apenas por cinzas.

A Tabela 4.1 resume os resultados da análise imediata. O valor de umidade (9,71% em base seca) está dentro dos valores recomendados na literatura para consentir a briquetagem dos resíduos. O alto teor de cinzas (15,56%) é característica típica da casca de arroz.

Tabela 4.1. Análise imediata da casca de arroz (base seca)

Umidade	Teor de Voláteis	Carbono Fixo	Teor de Cinzas
9,71%	68,42%	16,02%	15,56%

4.2.2 Distribuição granulométrica

Foi realizada através de peneiramento mecânico, seguindo a norma NBR 7217 (ABNT, 2002). Foram usadas 8 peneiras com abertura de malha progressiva, sendo a abertura menor de 0,15 mm e a abertura maior de 6,35 mm. As peneiras, previamente taradas, foram empilhadas com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo. O conjunto de peneiras foi instalado num agitador mecânico de marca Quimis. Foi colocada uma amostra de 100 g de material na peneira superior. O conjunto de peneiras foi fechado com uma tampa no topo e um

fundo na base para não haver dispersão de material. Foi realizada a agitação mecânica por 5 minutos. O conjunto de peneiras foi desmontado e cada peneira pesada para determinar a fração de material retida.

A Figura 4.8 apresenta os resultados da determinação da distribuição granulométrica.

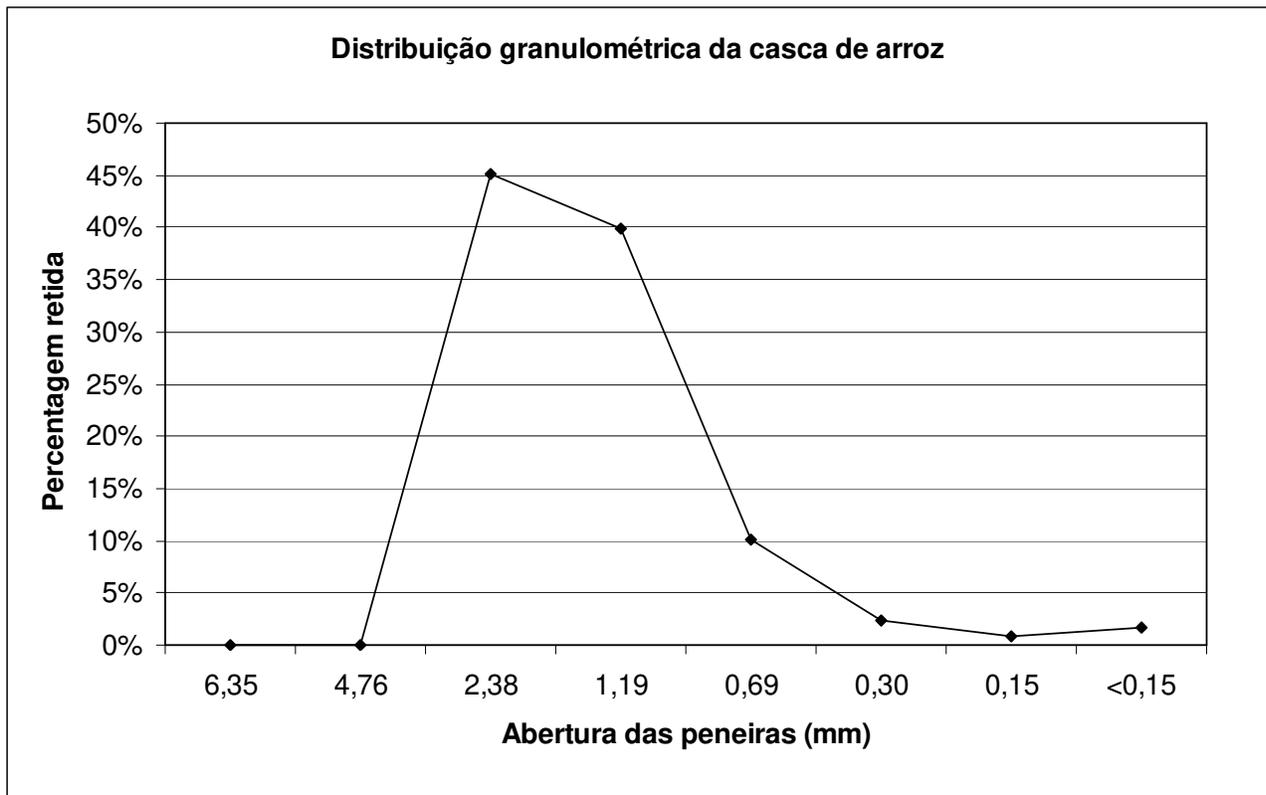


Figura 4.8 Gráfico da distribuição granulométrica da casca de arroz

4.2.3 Densidade aparente

Foi determinada usando um béquer de 2 litros de capacidade e de peso conhecido. No béquer foi colocada casca de arroz não compactada até o nível correspondente aos 2 litros e foi pesado o conjunto, descontando o peso do próprio béquer. A densidade é calculada dividindo-se o peso da casca pelo volume do béquer. Trata-se de uma densidade “aparente”, pois o volume considerado engloba uma porção de ar. Essa é a densidade que deve ser considerada para comparação com aquela da biomassa compactada após briquetagem, pois é a densidade na qual se encontram os resíduos *in natura*. A densidade aparente da casca de arroz resultou em 130 kg/m^3 .

4.3 Resultados dos testes de briquetagem

Os testes realizados permitiram estudar a produtividade horária da briquetadeira (kg/h de briquetes) e a potência absorvida pelo motor elétrico em função de diferentes velocidades de rotação do motor e de diferentes comprimentos da matriz. Em todos os testes foi programada uma temperatura de aquecimento da matriz de 350 °C, considerada – após vários testes exploratórios – como a temperatura ótima para proporcionar um bom desempenho da briquetadeira e uma boa qualidade dos briquetes. Temperaturas inferiores a 320 °C demonstraram-se insuficientes para o aquecimento da matéria-prima, podendo ocasionar o travamento da rosca sem-fim; temperaturas superiores a 400 °C levaram a produzir briquetes muito queimados superficialmente.

4.3.1 Curvas de potência e produtividade *versus* rotação do motor

Foi estudada a influência da velocidade de rotação do motor na demanda média de potência elétrica e na produtividade horária de briquetes. Foi utilizada uma matriz de seção redonda e de comprimento de 300 mm. Foram testadas cinco velocidades, de 200 rpm até 1000 rpm, com intervalos de 200 rpm. Para cada velocidade foram realizados 3 ensaios. Os resultados obtidos (valores médios e desvios) estão resumidos na Tabela 4.2 e representados graficamente na Figura 4.9.

Tabela 4.2. Produtividade e potência em função da velocidade do motor

Velocidade do motor (rpm)	Potência média (kW)	Produtividade (kg/h)
200	2,90 ±0,20	36,6 ±1,20
400	5,11 ±0,40	53,6 ±4,05
600	10 ±0,10	76,4 ±6,10
800	11,5 ±0,12	129,7 ±9,00
1000	17,2 ±0,15	167,7 ±1,35

É possível observar que as curvas características de potência média e produtividade *versus* velocidade de rotação do motor apresentam um traçado que pouco se afasta da linearidade. Todavia nas proximidades das 800 rpm há um leve aplanamento da curva de potência e um ligeiro aumento da produtividade em relação aos pontos próximos. Isso sugere que perto da velocidade nominal de rotação do motor (870 rpm) existe uma região de ótimo, onde as perdas de potência na transmissão do motor são mínimas e a eficiência da rosca de alimentação é máxima.

Essa apuração comprova a validade do dimensionamento dos elementos da briquetadeira na fase de projeto e confirma a vantagem de operar a máquina na sua velocidade nominal.

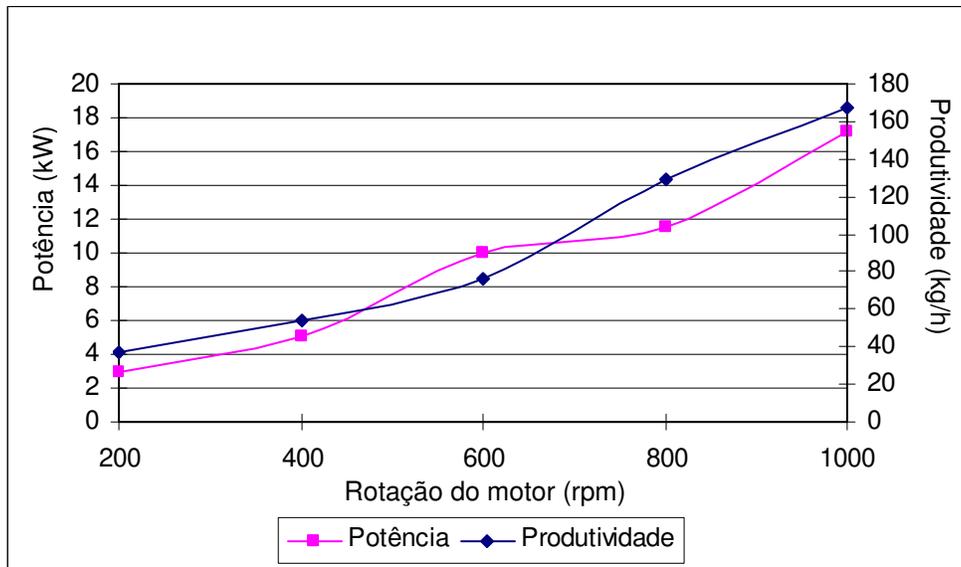


Figura 4.9. Curvas características de produtividade e potência

Por extrapolação linear, na velocidade nominal do motor se infere uma produtividade teórica de 137 kg/h de briquetes com uma demanda de potência média de 13,8 kW. Esses dados revelam que a BIOTOR-R100 ultrapassou as expectativas de projeto no que se refere à produtividade (calculada em 110 kg/h nas condições nominais).

O cálculo da energia específica (kWh/kg), obtida através da razão entre a potência média absorvida pelo motor e a produtividade horária de briquetes proporcionou valores entre 0,08 e 0,13 kWh/kg, que estão plenamente de acordo com os valores encontrado em literatura. A Figura 4.10, que apresenta a curva de energia específica em função da velocidade de rotação do motor, permite visualizar a região de mínimo nas proximidades de 800 rpm, confirmando as observações sobre o funcionamento ótimo da briquetadeira na velocidade nominal do motor. A energia consumida pela resistência elétrica de aquecimento da matriz é de cerca 0,02 kWh/kg de briquetes, não contabilizada nos valores acima.

Todos os briquetes produzidos nas diversas velocidades de rotação apresentaram características parecidas no que se refere à consistência e qualidade, mudando apenas o grau de torrefação superficial, devido ao diferente tempo de permanência na matriz aquecida. Essa possibilidade de produzir bons briquetes nas diversas velocidades, junto com a quase linearidade

da demanda de potência e da produtividade horária, torna a briquetadeira uma máquina flexível que pode ser operada em vários regimes de serviço.

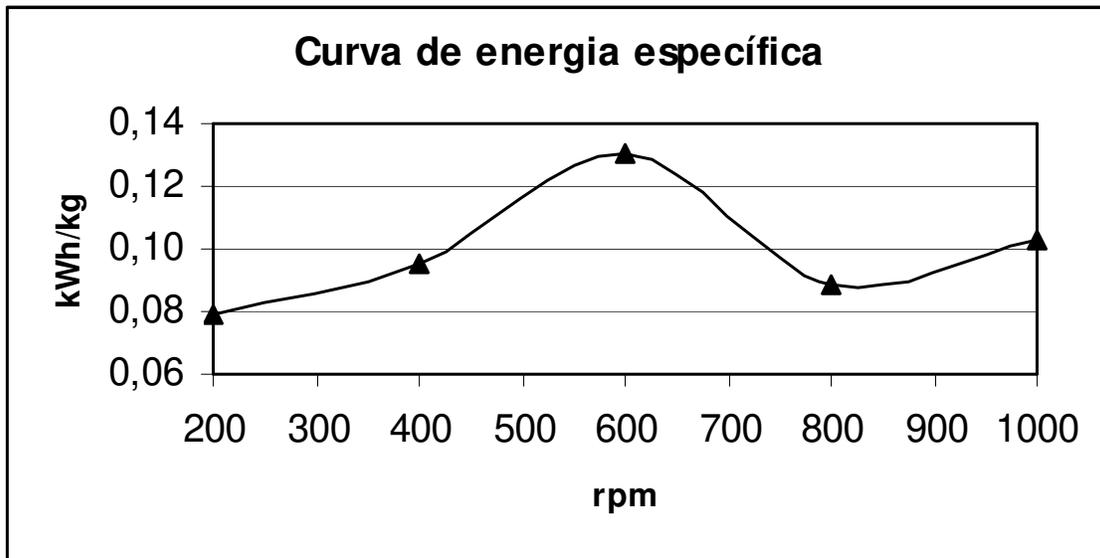


Figura 4.10. Energia específica na produção de briquetes

4.3.1.1 *Efeito do preenchimento do silo*

A seqüência de testes apresentada foi realizada mantendo o silo de alimentação da briquetadeira quase vazio e despejando a biomassa aos poucos. Em testes realizados sucessivamente o silo foi mantido completamente preenchido. Esta mudança na maneira de alimentar a biomassa levou a variações nos valores de produtividades e potência. Mais detalhadamente foi constatado que nas mesmas condições nominais de operação, os testes com o silo preenchido proporcionaram maior produtividade horária e – proporcionalmente – maior demanda de potência elétrica. Ambos os parâmetros apresentaram um aumento de cerca de 16% em relação ao desempenho com o silo mantido no nível mínimo. Isto pode ser explicado assumindo que o a biomassa estocada no silo tenha comportamento parecido com um fluido, gerando uma pressão “hidrostática” na base do silo proporcional ao nível de preenchimento. Essa pressão ajudaria a melhorar a eficiência de transporte da rosca.

Esse fenômeno foi observado com a casca de arroz. É possível que outros materiais se comportem de forma diferente. No caso de resíduos com tendência a aglomerar com a pressão, por exemplo, pode ocorrer entupimento de material no silo quando excessivamente preenchido.

Nesse caso deveriam ser tomadas outras providências como, por exemplo, a instalação de um misturador que evite o adensamento dos resíduos.

4.3.1.2 Oscilações de potência

O levantamento da potência evidenciou que a briquetagem não acontece de forma homogênea, pois foi detectado que o motor trabalha com uma demanda de energia oscilante. Através da aquisição de dados com intervalos de 1 segundo, foi possível descobrir que existem períodos de briquetagem relativamente estáveis intercalados por fases bastante instáveis, evidenciadas pelas fortes oscilações de potência. As Figura 4.11 e Figura 4.12 mostram graficamente um exemplo de fase estável e um exemplo de fase instável.

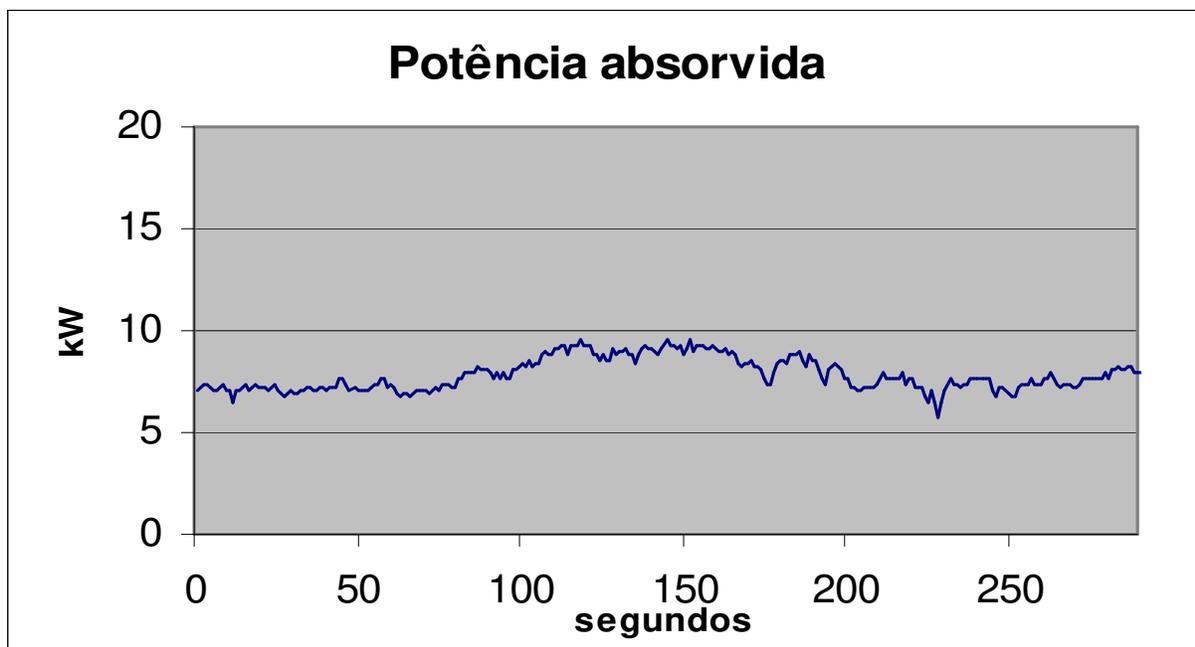


Figura 4.11. Exemplo de fase regular na absorção de potência

Foi constatado que as fases instáveis são causadas por um acúmulo ocasional de umidade na biomassa. Esse acúmulo verifica-se em consequência ao fato de uma parte do vapor liberado na matriz voltar no silo de alimentação e condensar em contato com a biomassa fria que está sendo despejada. Se há biomassa aderida nas paredes do silo, o condensado acumula-se nela. As instabilidades começam quando essa biomassa aderida desce e entra na matriz. Nos casos piores, esse excesso de umidade pode interromper a briquetagem, travar a máquina e gerar explosões na

matriz com expulsão violenta do briquete. Foi observado que o silo mantido completamente cheio durante os testes reduz notavelmente as ocasiões de instabilidade da potência.

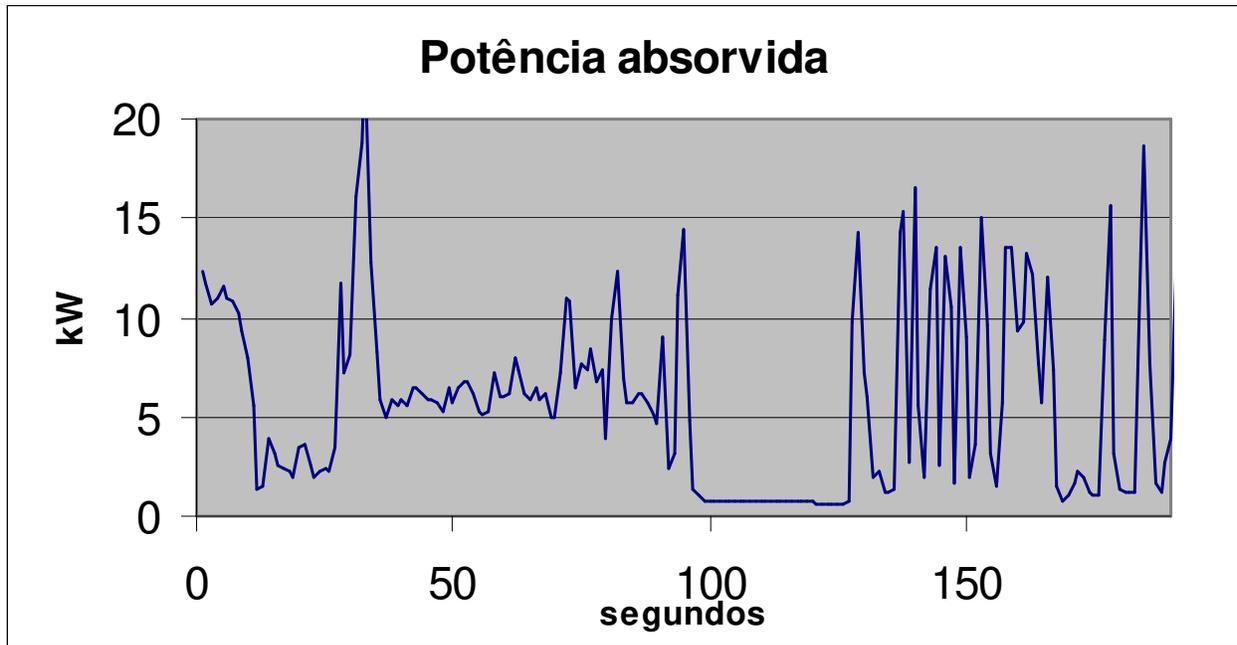


Figura 4.12. Exemplo de fase instável na absorção de potência

4.3.2 Influência do comprimento da matriz

Foram testados três comprimentos de matriz (350 mm, 300 mm e 250 mm) combinados com duas velocidades do motor (500 rpm e 700 rpm). Cada condição foi testada com dois ensaios. Foram adotadas velocidades inferiores à nominal para não correr riscos de sobrecarregar o motor. O desempenho da briquetadeira na velocidade nominal do motor (870 rpm) pode ser extrapolado a partir dos testes realizados, assumindo a linearidade dos parâmetros em função do regime de rotação. A Tabela 4.3 e a Figura 4.13 resumem os resultados de produtividade em função do comprimento da matriz e da velocidade de rotação do motor. Os briquetes produzidos durante os diversos testes não apresentaram variações significativas na aparência e na consistência. Os testes confirmaram que há relação praticamente linear na produtividade em função da velocidade do motor. Por extrapolação, é possível inferir que na velocidade nominal do motor (870 rpm) a produtividade seria de até 166 kg/h. O comprimento da matriz também influencia a produtividade, por causa da ação da fricção do briquete contra as paredes metálicas. Foi apurado um aumento na produtividade de 4-5 kg/h a cada redução de 5 cm no comprimento da matriz. Todavia, vale sinalizar o fato de que testes executados com o mesmo tamanho de

matriz em dias diferentes apresentaram uma variação de produtividade de alguns quilogramas por hora, sugerindo que o comprimento da matriz – na faixa de medidas testadas – tem um efeito relativamente modesto na produtividade, comparável com as variações “naturais” da briquetagem, que podem ser devidas a fatores de difícil controle, como, por exemplo, a temperatura ambiente, a umidade da biomassa e a maneira de despejar a biomassa na briquetadeira.

Tabela 4.3. Produtividade de briquetes em função do comprimento da matriz e da velocidade do motor

Produtividade (kg/h)			
Velocidade do motor (rpm)	350 mm	300 mm	250 mm
500	86 ±1,30	90 ±2,45	95 ±2,60
700	127 ±2,15	131 ±1,90	134 ±2,55

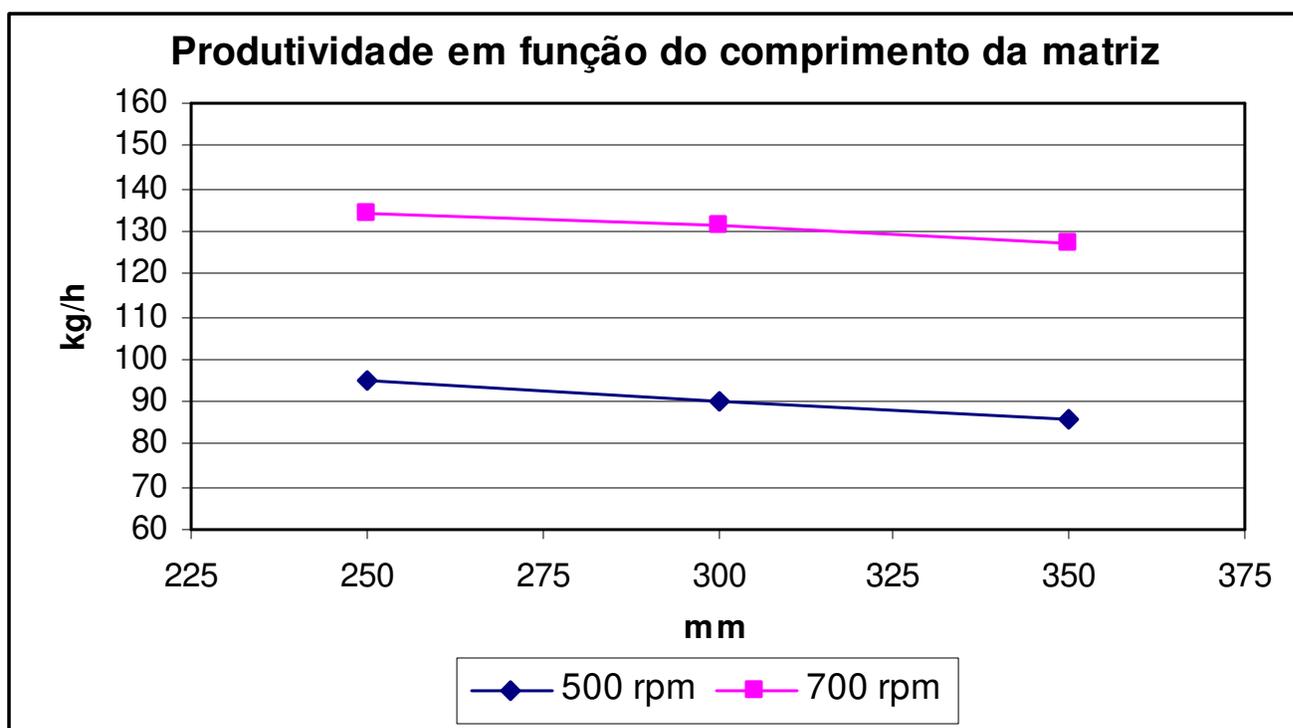


Figura 4.13. Produtividade em função do comprimento da matriz e da rotação do motor

Testes realizados com comprimentos menores da matriz revelaram instabilidade na formação do briquete.

Os valores da potência média estão resumidos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Potência média absorvida pelo motor

Potência do motor (kW)			
Velocidade do motor (rpm)	350 mm	300 mm	250 mm
500	9,8 ±0,62	9,2 ±0,65	9,8 ±0,57
700	11,5 ±0,52	13,4 ±0,58	12 ±0,66

Diferentemente dos dados de produtividade, não foi possível evidenciar tendências claras da absorção de potência em função do comprimento da matriz. Intuitivamente é razoável supor que comprimentos menores reduzam a demanda de potência por causa do reduzido efeito da fricção na matriz. Todavia, esse efeito pode ser pouco relevante em relação a outros fatores que influenciam as variações de potência.

4.3.3 Matriz de dois estágios

Foi testada uma configuração de matriz que permitisse pré-aquecer a biomassa antes da extrusão. Para conseguir isso foi utilizada uma rosca mais comprida, de modo que avançasse com dois passos adicionais no interior da matriz. A matriz, por sua vez, foi adaptada para receber a rosca, deslocando o trecho cônico mais adiante. Essa adaptação permitiria à biomassa receber o calor da resistência elétrica ainda na fase de alimentação. A matriz configurada nessa forma é composta por dois estágios: o primeiro estágio (reto) de pré-aquecimento e o segundo estágio (cônico-reto) de extrusão. As dimensões totais da matriz foram escolhidas de modo que o segundo estágio mantivesse comprimento de 250 mm, para permitir comparações com a matriz de 250 mm e um só estágio. Foi adicionado mais um módulo de resistência elétrica para cobrir toda a superfície externa da matriz. Os testes foram realizados com 500 rpm do motor. A produtividade foi de 83 kg/h, e a potência média do motor foi de 7,1 kW, comparados com 95 kg/h e 9,8 kW, respectivamente, no caso da matriz de um só estágio. Esses dados revelam uma

importante redução na produtividade da briquetadeira, acompanhada por uma correspondente redução na demanda de potência do motor. A redução de produtividade na configuração testada poderia ser atribuída a uma redução de eficiência na alimentação da rosca, devida ao aumento do seu comprimento. A energia específica foi de 0,085 kWh/kg no caso do pré-aquecimento, contra 0,10 kWh/kg do caso sem o pré-aquecimento, confirmando os dados da literatura técnica, que apontam reduções de energia na compactação de biomassa pré-aquecida. A significativa economia de energia obtida no motor, todavia, foi – nesse caso – neutralizada pela energia adicional gasta nas resistências elétricas (0,02 kWh/kg sem pré-aquecimento, contra cerca de 0,04 kWh/kg com pré-aquecimento). O pré-aquecimento da biomassa seria justificado se fosse realizado de outras maneiras, por exemplo, reaproveitando gases quentes gerados em outros processos.

Com base nos dados levantados, a configuração testada não apresentou vantagens operacionais que justifiquem a sua adoção.

4.3.4 Matriz de conicidade reduzida

Foi testada uma matriz com conicidade mais suave, com semi-abertura do cone de 1,5° ao invés dos 2,67° testados até então. O comprimento da matriz foi de 250 mm e a velocidade do motor foi de 500 rpm. O teste resultou em uma produtividade de 97 kg/h com uma demanda de potência do motor de 9,5 kW médios, comparados com 95 kg/h e 9,8 kW, respectivamente, no emprego da matriz de conicidade mais acentuada. Os briquetes produzidos foram de boa qualidade e não apresentaram diferenças perceptíveis em comparação com os briquetes obtidos com as matrizes de conicidade mais acentuada. A energia específica foi de 0,10 kWh/kg. Esses resultados sugeriram que é mais vantajoso utilizar matrizes de conicidade mais suave, pois – a frente da invariância na qualidade dos briquetes – há uma leve melhoria na produtividade e na demanda de potência. Esse melhor desempenho pode ser devido à menor fricção sofrida pela biomassa no atravessamento do cone de extrusão.

4.4 Caracterização dos briquetes

4.4.1 Densidade

Foi determinada a densidade média dos briquetes para calcular a razão de compactação da briquetadeira. A densidade foi calculada pesando algumas amostras de briquete e dividindo o

peso pelo volume dos briquetes, descontando o volume vazio do furo central (densidade aparente do briquete). Foi também determinada uma densidade de empacotamento considerando o volume praticamente ocupado pelos briquetes em caso de empacotamento e estocagem. Nesse caso foi adotado o volume de um paralelepípedo de base quadrada, com aresta igual ao diâmetro externo médio dos briquetes e altura igual ao comprimento total dos briquetes pesados. Na Tabela 4.5 são resumidos os resultados.

Tabela 4.5. Densidade dos briquetes

Densidade aparente (kg/m ³)	Densidade de empacotamento (kg/m ³)
1236	898

A razão de compactação da casca de arroz é de 9,5 considerando a densidade aparente dos briquetes. Isso significa que a briquetadeira aumenta de 9,5 vezes a densidade inicial dos resíduos.

4.4.2 Análise imediata

A Tabela 4.6 reporta os valores da análise imediata e o valor do Poder Calorífico Superior.

Tabela 4.6. Caracterização química dos briquetes

Umidade	Teor de Voláteis	Carbono Fixo	Teor de Cinzas	PCS (MJ/kg)
9,2%	66,2%	17,2%	16,6%	14,0

É interessante observar que a briquetagem quase não mudou a composição da biomassa, apenas houve uma pequena redução do teor de voláteis devido ao aquecimento sofrido durante a extrusão. Conseqüentemente essa redução fez aumentar percentualmente o teor de carbono fixo e de cinzas.

4.4.3 Resistência mecânica dos briquetes

Foi avaliada a resistência mecânica dos briquetes através da compressão por uma prensa de laboratório. A prensa utilizada foi de marca MTS, modelo 810-TestStar II, com capacidade de carga máxima de 9 toneladas (Figura 4.14), e controlada por um sistema computadorizado.



Figura 4.14. Prensa preparada para teste de resistência radial

Os briquetes foram testados a compressão em direção axial e radial. As amostras utilizadas para compressão axial foram cortadas com serra de fita e faceadas no torno de modo a apresentar faces planas e paralelas. Os testes foram executados programando um deslocamento do êmbolo da prensa de 3 mm por minuto e registrando-se no computador a curva de força de compressão *versus* deslocamento. A amostra foi considerada quebrada quando a força, após alcançar o seu máximo, começava a diminuir. A pressão de ruptura foi calculada dividindo a força máxima por uma superfície de referência das amostras. No caso da compressão axial, a superfície considerada é a própria superfície transversal dos briquetes; já no caso da compressão radial, foi considerada a superfície da seção longitudinal que contém o eixo da amostra, ortogonal à direção de compressão.

Nos testes de compressão axial os briquetes de casca de arroz não chegaram a quebrar aplicando a carga máxima da prensa, apenas descascaram em alguns pontos da superfície lateral. Isso implica uma resistência a compressão maior que 23,9 MPa.

Os testes de compressão radial apresentaram valores de resistência bem menores, devido ao fato que há concentração de tensão na região de contato entre a amostra e o êmbolo e gera-se um estado poliaxial de sollicitação devido à geometria cilíndrica da amostra. As amostras quebraram

com uma pressão média de 3,08 MPa. A **Figura 4.15** mostra um briquete quebrado por compressão radial.

Para efeito de comparação, foi testado também um briquete de serragem obtido com uma briquetadeira de pistão (Figura 4.16). No ensaio de compressão axial as amostras também não quebraram. Já nos ensaios de compressão radial os briquetes desmancharam com uma pressão média de 0,63 MPa, cerca de um quinto da pressão necessária para quebrar os briquetes da prensa de rosca sem-fim. Apesar de se tratar de briquetes de matéria-prima diferente, a grande diferença na resistência a compressão radial sugere que a aglomeração das partículas nos briquetes de prensa de pistão seja mais branda, de acordo com os relatos encontrados na literatura.



Figura 4.15. Amostra de briquete de casca de arroz quebrada após o ensaio mecânico



Figura 4.16. Briquete de prensa de pistão

Capítulo 5

Estudo de viabilidade econômica

É analisada a hipótese de introduzir um sistema de briquetagem em uma empresa que processa madeira e produz cerca de 60 toneladas de serragem ao mês (aproximadamente 700 toneladas por ano). Supõe-se que a empresa já disponha de uma área coberta para alojar a briquetadeira e estocar os briquetes.

Serão analisadas e comparadas 3 configurações:

- A. Instalação de uma briquetadeira BIOTOR-R100 de capacidade nominal de 120 kg/h de briquetes;
- B. Instalação de uma briquetadeira BIOTOR-R250 de capacidade nominal de 250 kg/h;
- C. Instalação de uma briquetadeira de pistão de capacidade nominal de 250 kg/h.

Em todos os casos a briquetadeira será acoplada a um silo de alimentação da serragem. A planta poderá ser operada em até 3 turnos diários, de segunda a sexta-feira, com possibilidade de estender a operação aos fins de semana em caso de necessidade.

5.1 Investimento

O investimento inicial consiste da briquetadeira e do silo de alimentação, cujos valores totais são sintetizados na Tabela 5.1. Ressalta-se o maior custo de investimento relacionado com a briquetadeira de pistão, por se tratar de uma máquina mais complexa. É assumido que a empresa disponha de capital próprio para arcar com o investimento.

Tabela 5.1. Discriminação dos custos de investimento

	Briquetadeira		Silo	Total
A	BIOTOR-R100	R\$ 26.400,00	R\$ 12.000,00	R\$ 38.400,00
B	BIOTOR-R250	R\$ 38.200,00	R\$ 12.000,00	R\$ 50.200,00
C	De pistão	R\$ 62.000,00	R\$ 12.000,00	R\$ 74.000,00

5.2 Mão-de-obra

Para operar a planta de briquetagem serão contratados funcionários não especializados, com salário de R\$ 500,00 ao mês, mais 80% de encargos sociais. No caso A é suficiente uma pessoa por turno de trabalho. Nos casos B e C serão necessários dois funcionários por turno.

5.3 Insumos

Os insumos considerados são a matéria-prima (serragem), a eletricidade necessária para a operação da planta e a reposição de metal de revestimento da rosca. A serragem, apesar de ser gerada pela própria empresa e estar gratuitamente disponível, é contabilizada por um custo de oportunidade de R\$ 60,00 por tonelada, pois esse é o valor pelo qual seria vendida em ausência da briquetagem. É importante considerar esse custo, porque o estudo de viabilidade pode revelar que seria mais rentável continuar vendendo o resíduo *in natura* do que realizar o investimento em um sistema de briquetagem. Na transformação em briquete é considerada uma perda de 5% da serragem de insumo, devida principalmente a briquetes mal formados.

A eletricidade é calculada a um custo de R\$ 170,00 por MWh. Considera-se que os briquetes produzidos com as briquetadeiras de rosca sem-fim requeiram 0,12 MWh/t de energia elétrica, enquanto aqueles de briquetadeira de pistão demandem 0,08 MWh/t. Essa diferença é devida a maior compactação proporcionada pela rosca e à energia necessária para aquecer a matriz.

Os filetes terminais da rosca sem-fim são revestidos por liga de tungstênio para retardar a ação abrasiva da biomassa. Considera-se que esse revestimento precise ser repostado a cada 4,8 toneladas produzidas, por um custo de R\$50,00, já incluindo a mão-de-obra. No caso da briquetadeira de pistão esse custo não se aplica. Em contra partida, na briquetadeira de pistão há

custos de recuperação da matriz e de reposição do óleo lubrificante. Esses custos, por ser de difícil quantificação, serão considerados embutidos nos custos de manutenção anuais.

5.4 Custos de manutenção, depreciação e seguro.

Nos casos A e B é considerado um custo anual de manutenção de 3% do custo de investimento. No caso C o custo anual de manutenção é de 5% sobre o custo do investimento, devido à maior complexidade da briquetadeira. A depreciação dos equipamentos é fixada em 10% do valor do investimento, considerando uma vida útil de 10 anos. O seguro é fixado em 1% do investimento.

5.5 Impostos

Os valores das alíquotas dos impostos foram determinados de acordo com as tabelas do Ministério da Fazenda.

Para os impostos que incidem no faturamento bruto (ICMS-18%, PIS-0,65%, Cofins-3%) é considerada uma alíquota de 21,65%. Para o Imposto de Renda (IRPJ) é considerada a alíquota de 25%. Para a Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL) é aplicada a alíquota de 8%. O IPI é zero para briquetes.

5.6 Projeção de vendas

Supõe-se que a empresa consiga entrar gradualmente no mercado de briquetes, até saturar a sua capacidade de produção. No primeiro ano é considerada a venda de 350 toneladas de briquetes, por um preço de 240,00 R\$/t. O preço estabelecido é levemente inferior ao preço tipicamente praticado pela concorrência (250,00 R\$/t) para atrair clientes. Nessa hipótese a produção de briquetes pode ser atingida, no caso A, operando a briquetadeira por 2 turnos e, nos casos B e C, operando por um só turno. O preço de venda será mantido igual no segundo ano e sofrerá um aumento de 10,00 R\$/t a cada dois anos, assumindo que haverá aumento similar nos preços praticados pela concorrência. Nas Tabela 5.2 e Tabela 5.3 é resumida a projeção de vendas nos primeiros 10 anos de atividade, junto com os preços praticados e o regime de operação das briquetadeiras. O caso A é discriminado dos casos B e C, pois muda a capacidade máxima de produção. No caso A é considerado que a planta seja praticamente saturada com uma

produção de 640 t/ano. Já nos casos B e C o limite é estabelecido pela disponibilidade de serragem, permitindo no máximo a produção de 680 t/ano de briquetes, atingida com dois turnos de trabalho.

Tabela 5.2. Projeção de vendas para o caso A

Ano (Caso A)	Projeção de vendas (t/ano)	Preço de venda (R\$/t)	N. de Turnos	N. de funcionários contratados
1	350	240	2	2
2	500	240	3	3
3	580	250	3	3
4	640	250	3	3
5	640	260	3	3
6	640	260	3	3
7	640	270	3	3
8	640	270	3	3
9	640	280	3	3
10	640	280	3	3

Tabela 5.3. Projeção de vendas para os casos B e C

Ano (Casos B e C)	Projeção de vendas (t/ano)	Preço de venda (R\$/t)	Nº de Turnos	Nº de funcionários contratados
1	350	240	1	2
2	500	240	1	2
3	580	250	2	4
4	640	250	2	4
5	680	260	2	4
6	680	260	2	4
7	680	270	2	4
8	680	270	2	4
9	680	280	2	4
10	680	280	2	4

5.7 Desempenho econômico da planta

Nas Tabela 5.4, Tabela 5.5 e Tabela 5.6 são relatadas as estruturas de custos operacionais anuais dos três casos.

Tabela 5.4. Estrutura de custos operacionais anuais do caso A

CASO A	ano 01	ano 02	ano 03	ano 04	ano 05	ano 06	ano 07	ano 08	ano 09	ano 10
CUSTOS FIXOS	28.325	39.665	39.665	39.665	39.665	39.665	39.665	39.665	39.665	39.665
Mão-de-obra fixa	12.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000	18.000
Encargos sociais	9.600	14.400	14.400	14.400	14.400	14.400	14.400	14.400	14.400	14.400
Manutenção	1.152	1.152	1.152	1.152	1.152	1.152	1.152	1.152	1.152	1.152
Seguros	384	384	384	384	384	384	384	384	384	384
Depreciação	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840
Diversos (5%)	1.349	1.889	1.889	1.889	1.889	1.889	1.889	1.889	1.889	1.889
CUSTOS VARIÁVEIS	34.669	49.527	57.452	63.395	63.395	63.395	63.395	63.395	63.395	63.395
Serragem	22.050	31.500	36.540	40.320	40.320	40.320	40.320	40.320	40.320	40.320
Energia elétrica	7.140	10.200	11.832	13.056	13.056	13.056	13.056	13.056	13.056	13.056
Recuper. rosca	3.828	5.469	6.344	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
Diversos (5%)	1.651	2.358	2.736	3.019	3.019	3.019	3.019	3.019	3.019	3.019
CUSTO TOTAL	62.994	89.192	97.116	103.060	103.060	103.060	103.060	103.060	103.060	103.060

Tabela 5.5. Estrutura de custos operacionais anuais do caso B

CASO B	ano 01	ano 02	ano 03	ano 04	ano 05	ano 06	ano 07	ano 08	ano 09	ano 10
CUSTOS FIXOS	30.059	30.059	52.739	52.739	52.739	52.739	52.739	52.739	52.739	52.739
Mão-de-obra fixa	12.000	12.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000
Encargos sociais	9.600	9.600	19.200	19.200	19.200	19.200	19.200	19.200	19.200	19.200
Manutenção	1.506	1.506	1.506	1.506	1.506	1.506	1.506	1.506	1.506	1.506
Seguros	502	502	502	502	502	502	502	502	502	502
Depreciação	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020
Diversos (5%)	1.431	1.431	2.511	2.511	2.511	2.511	2.511	2.511	2.511	2.511
CUSTOS VARIÁVEIS	34.669	49.527	57.452	63.395	67.357	67.357	67.357	67.357	67.357	67.357
Serragem	22.050	31.500	36.540	40.320	42.840	42.840	42.840	42.840	42.840	42.840
Energia elétrica	7.140	10.200	11.832	13.056	13.872	13.872	13.872	13.872	13.872	13.872
Recuper. rosca	3.828	5.469	6.344	7.000	7.438	7.438	7.438	7.438	7.438	7.438
Diversos (5%)	1.651	2.358	2.736	3.019	3.207	3.207	3.207	3.207	3.207	3.207
CUSTO TOTAL	64.728	79.587	110.191	116.134	120.096	120.096	120.096	120.096	120.096	120.096

Tabela 5.6. Estrutura de custos operacionais anuais do caso C

CASO C	ano 01	ano 02	ano 03	ano 04	ano 05	ano 06	ano 07	ano 08	ano 09	ano 10
CUSTOS FIXOS	35.112	35.112	57.792	57.792	57.792	57.792	57.792	57.792	57.792	57.792
Mão-de-obra fixa	12.000	12.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000	24.000
Encargos sociais	9.600	9.600	19.200	19.200	19.200	19.200	19.200	19.200	19.200	19.200
Manutenção	3.700	3.700	3.700	3.700	3.700	3.700	3.700	3.700	3.700	3.700
Seguros	740	740	740	740	740	740	740	740	740	740
Depreciação	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400
Diversos (5%)	1.672	1.672	2.752	2.752	2.752	2.752	2.752	2.752	2.752	2.752
CUSTOS VARIÁVEIS	28.151	40.215	48.593	53.620	59.250	59.250	61.529	61.529	63.808	63.808
Serragem	22.050	31.500	36.540	40.320	42.840	42.840	42.840	42.840	42.840	42.840
Energia elétrica	4.760	6.800	8.217	9.067	10.019	10.019	10.404	10.404	10.789	10.789
Diversos (5%)	1.341	1.915	2.221	2.451	2.604	2.604	2.604	2.604	2.604	2.604
CUSTO TOTAL	63.263	75.327	104.441	109.267	112.484	112.484	112.484	112.484	112.484	112.484

Na Tabela 5.7 são reportados os custos para produzir uma tonelada de briquetes que variam conforme a quantidade produzida anualmente e o tipo de briquetadeira utilizada.

Tabela 5.7. Custos para produzir uma tonelada de briquetes

Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
produção anual (t)	350	500	580	640	640	640	640	640	640	640
A R\$/t	179,98	178,38	167,44	161,03	161,03	161,03	161,03	161,03	161,03	161,03
produção anual (t)	350	500	580	640	680	680	680	680	680	680
B R\$/t	184,94	159,17	189,98	181,46	176,61	176,61	176,61	176,61	176,61	176,61
C R\$/t	180,75	150,65	180,07	170,73	175,76	175,76	175,76	175,76	175,76	175,76

As Tabela 5.8, Tabela 5.9 e Tabela 5.10 apresentam o resultado de exercício de cada ano. Na última linha de cada tabela é indicado o ponto de equilíbrio operacional, que representa a percentagem mínima de briquetes, em relação à capacidade nominal da planta que precisa ser produzida para cobrir os custos fixos.

Tabela 5.8. Resultado de exercício - Caso A

CASO A	ano 01	ano 02	ano 03	ano 04	ano 05	ano 06	ano 07	ano 08	ano 09	ano 10
Faturamento Bruto (RB)	84.000	120.000	145.001	160.001	166.399	166.399	172.800	172.800	179.201	179.201
(-) IPI Faturado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(=) Receita Operacional Bruta (ROB)	84.000	120.000	145.001	160.001	166.399	166.399	172.800	172.800	179.201	179.201
(-) Deduções, perdas, devoluções	-840	-1.200	-1.450	-1.600	-1.664	-1.664	-1.728	-1.728	-1.792	-1.792
(-) Impostos (ICMS, PIS, Cofins)	-18.186	-25.980	-31.393	-34.640	-36.025	-36.025	-37.411	-37.411	-38.797	-38.797
(=) Receita Operacional Líquida (ROL)	64.974	92.820	112.158	123.761	128.710	128.710	133.661	133.661	138.612	138.612
(-) Custo dos Produtos Vendidos (CPV)	-38.010	-52.161	-59.708	-65.368	-65.368	-65.368	-65.368	-65.368	-65.368	-65.368
(=) Lucro Bruto (LB)	26.964	40.659	52.450	58.393	63.342	63.342	68.293	68.293	73.244	73.244
(-) Despesas Operacionais (DOP)	-24.984	-37.031	-37.409	-37.692	-37.692	-37.692	-37.692	-37.692	-37.692	-37.692
(=) Lucro Operacional (LO)	1.980	3.628	15.042	20.701	25.650	25.650	30.601	30.601	35.552	35.552
(-) Contribuição Social (CSLL)	-158	-290	-1.203	-1.656	-2.052	-2.052	-2.448	-2.448	-2.844	-2.844
(-) Imposto de Renda (IRPJ)	-495	-907	-3.760	-5.175	-6.413	-6.413	-7.650	-7.650	-8.888	-8.888
(=) Lucro Líquido (LL)	1.327	2.431	10.078	13.870	17.186	17.186	20.503	20.503	23.820	23.820
(+) Depreciação	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840
(=) Capacidade de Pagamento (CP)	5.167	6.271	13.918	17.710	21.026	21.026	24.343	24.343	27.660	27.660
<i>Ponto de equilíbrio operacional</i>	<i>57,4%</i>	<i>56,3%</i>	<i>45,3%</i>	<i>41,1%</i>	<i>38,5%</i>	<i>38,5%</i>	<i>36,3%</i>	<i>36,3%</i>	<i>34,3%</i>	<i>34,3%</i>

Tabela 5.9. Resultado de exercício - Caso B

CASO B	ano 01	ano 02	ano 03	ano 04	ano 05	ano 06	ano 07	ano 08	ano 09	ano 10
Faturamento Bruto (RB)	84.000	120.000	145.001	160.001	176.801	176.801	183.600	183.600	190.399	190.399
(-) IPI Faturado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(=) Receita Operacional Bruta (ROB)	84.000	120.000	145.001	160.001	176.801	176.801	183.600	183.600	190.399	190.399
(-) Deduções, perdas, devoluções	-840	-1.200	-1.450	-1.600	-1.768	-1.768	-1.836	-1.836	-1.904	-1.904
(-) Impostos (ICMS, PIS, Cofins)	-18.186	-25.980	-31.393	-34.640	-38.277	-38.277	-39.749	-39.749	-41.221	-41.221
(=) Receita Operacional Líquida (ROL)	64.974	92.820	112.158	123.761	136.755	136.755	142.015	142.015	147.274	147.274
(-) Custo dos Produtos Vendidos (CPV)	-39.544	-53.695	-61.242	-66.902	-70.676	-70.676	-70.676	-70.676	-70.676	-70.676
(=) Lucro Bruto (LB)	25.430	39.125	50.916	56.859	66.080	66.080	71.339	71.339	76.598	76.598
(-) Despesas Operacionais (DOP)	-25.184	-25.892	-48.949	-49.232	-49.421	-49.421	-49.421	-49.421	-49.421	-49.421
(=) Lucro Operacional (LO)	246	13.233	1.967	7.626	16.659	16.659	21.918	21.918	27.177	27.177
(-) Contribuição Social (CSLL)	-20	-1.059	-157	-610	-1.333	-1.333	-1.753	-1.753	-2.174	-2.174
(-) Imposto de Renda (IRPJ)	-61	-3.308	-492	-1.907	-4.165	-4.165	-5.480	-5.480	-6.794	-6.794
(=) Lucro Líquido (LL)	165	8.866	1.318	5.110	11.162	11.162	14.685	14.685	18.209	18.209
(+) Depreciação	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020
(=) Capacidade de Pagamento (CP)	5.185	13.886	6.338	10.130	16.182	16.182	19.705	19.705	23.229	23.229
<i>Ponto de equilíbrio operacional</i>	60,9%	42,7%	60,2%	54,6%	48,2%	48,2%	45,4%	45,4%	42,9%	42,9%

Tabela 5.10. Resultado de exercício - Caso C

CASO C	ano 01	ano 02	ano 03	ano 04	ano 05	ano 06	ano 07	ano 08	ano 09	ano 10
Faturamento Bruto (RB)	84.000	120.000	145.001	160.001	176.801	176.801	183.600	183.600	190.399	190.399
(-) IPI Faturado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(=) Receita Operacional Bruta (ROB)	84.000	120.000	145.001	160.001	176.801	176.801	183.600	183.600	190.399	190.399
(-) Deduções, perdas, devoluções	-840	-1.200	-1.450	-1.600	-1.768	-1.768	-1.836	-1.836	-1.904	-1.904
(-) Impostos (ICMS, PIS, Cofins, SIMPLE)	-18.186	-25.980	-31.393	-34.640	-38.277	-38.277	-39.749	-39.749	-41.221	-41.221
(=) Receita Operacional Líquida (ROL)	64.974	92.820	112.158	123.761	136.755	136.755	142.015	142.015	147.274	147.274
(-) Custo dos Produtos Vendidos (CPV)	-37.910	-49.400	-55.528	-60.124	-63.188	-63.188	-63.188	-63.188	-63.188	-63.188
(=) Lucro Bruto (LB)	27.064	43.420	56.630	63.637	73.567	73.567	78.827	78.827	84.086	84.086
(-) Despesas Operacionais (DOP)	-25.353	-25.927	-48.913	-49.143	-49.296	-49.296	-49.296	-49.296	-49.296	-49.296
(=) Lucro Operacional (LO)	1.712	17.493	7.717	14.493	24.271	24.271	29.530	29.530	34.789	34.789
(-) Contribuição Social (CSLL)	-137	-1.399	-617	-1.159	-1.942	-1.942	-2.362	-2.362	-2.783	-2.783
(-) Imposto de Renda (IRPJ)	-428	-4.373	-1.929	-3.623	-6.068	-6.068	-7.383	-7.383	-8.697	-8.697
(=) Lucro Líquido (LL)	1.147	11.720	5.170	9.711	16.262	16.262	19.785	19.785	23.309	23.309
(+) Depreciação	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400
(=) Capacidade de Pagamento (CP)	8.547	19.120	12.570	17.111	23.662	23.662	27.185	27.185	30.709	30.709
<i>Ponto de equilíbrio operacional</i>	<i>62,9%</i>	<i>44,0%</i>	<i>58,8%</i>	<i>53,3%</i>	<i>47,3%</i>	<i>47,3%</i>	<i>44,8%</i>	<i>44,8%</i>	<i>42,6%</i>	<i>42,6%</i>

Nas Tabela 5.11, Tabela 5.12 e Tabela 5.13 é apresentado o Fluxo de Caixa, que resume as entradas e saídas de cada ano.

Tabela 5.11. Fluxo de Caixa - Caso A

CASO A	ano 00	ano 01	ano 02	ano 03	ano 04	ano 05	ano 06	ano 07	ano 08	ano 09	ano 10
I. INVESTIMENTOS	-38.400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II. ENTRADAS	0	5.820	7.468	18.882	24.541	29.490	29.490	34.441	34.441	39.392	39.392
Lucro Operacional	0	1.980	3.628	15.042	20.701	25.650	25.650	30.601	30.601	35.552	35.552
Depreciação	0	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840	3.840
III. SAÍDAS	0	-653	-1.197	-4.964	-6.831	-8.465	-8.465	-10.098	-10.098	-11.732	-11.732
Contribuição Social	0	-158	-290	-1.203	-1.656	-2.052	-2.052	-2.448	-2.448	-2.844	-2.844
Imposto de Renda	0	-495	-907	-3.760	-5.175	-6.413	-6.413	-7.650	-7.650	-8.888	-8.888
IV. SALDO DE CAIXA	-38.400	5.167	6.271	13.918	17.710	21.026	21.026	24.343	24.343	27.660	27.660

Tabela 5.12. Fluxo de Caixa - Caso B

CASO B	ano 00	ano 01	ano 02	ano 03	ano 04	ano 05	ano 06	ano 07	ano 08	ano 09	ano 10
I. INVESTIMENTOS	-50.200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II. ENTRADAS	0	5.266	18.253	6.987	12.646	21.679	21.679	26.938	26.938	32.197	32.197
Lucro Operacional	0	246	13.233	1.967	7.626	16.659	16.659	21.918	21.918	27.177	27.177
Depreciação	0	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020	5.020
III. SAIDAS	0	-81	-4.367	-649	-2.517	-5.497	-5.497	-7.233	-7.233	-8.969	-8.969
Contribuição Social	0	-20	-1.059	-157	-610	-1.333	-1.333	-1.753	-1.753	-2.174	-2.174
Imposto de Renda	0	-61	-3.308	-492	-1.907	-4.165	-4.165	-5.480	-5.480	-6.794	-6.794
IV. SALDO DE CAIXA	-50.200	5.185	13.886	6.338	10.130	16.182	16.182	19.705	19.705	23.229	23.229

Tabela 5.13. Fluxo de Caixa - Caso C

CASO C	ano 00	ano 01	ano 02	ano 03	ano 04	ano 05	ano 06	ano 07	ano 08	ano 09	ano 10
I. INVESTIMENTOS	-74.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II. ENTRADAS	0	9.112	24.893	15.117	21.893	31.671	31.671	36.930	36.930	42.189	42.189
Lucro Operacional	0	1.712	17.493	7.717	14.493	24.271	24.271	29.530	29.530	34.789	34.789
Depreciação	0	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400	7.400
III. SAIDAS	0	-565	-5.773	-2.547	-4.783	-8.009	-8.009	-9.745	-9.745	-11.480	-11.480
Contribuição Social	0	-137	-1.399	-617	-1.159	-1.942	-1.942	-2.362	-2.362	-2.783	-2.783
Imposto de Renda	0	-428	-4.373	-1.929	-3.623	-6.068	-6.068	-7.383	-7.383	-8.697	-8.697
IV. SALDO DE CAIXA	-74.000	8.547	19.120	12.570	17.111	23.662	23.662	27.185	27.185	30.709	30.709

5.8 Indicadores de Rentabilidade

A partir do Saldo de Caixa de cada ano, é possível calcular os Indicadores de Rentabilidade, ou seja, o Valor Presente Líquido (VPL), o Retorno do Investimento (*Pay Back*) e a Taxa Interna de Retorno (TIR). Esses indicadores são resumidos na Tabela 5.14. Para o VPL foi considerada uma Taxa de Desconto de 12%.

O Valor Presente Líquido é a soma algébrica das receitas e das despesas de um fluxo de caixa, devidamente atualizadas para o presente momento por uma taxa de desconto pré-estabelecida pelo investidor:

$$VPL = \sum_{j=1}^n (FC_j) \cdot (1+i)^{-j}$$

sendo FC_j o valor do fluxo de caixa (saldo) em um dado ano j e i o valor da taxa de desconto.

O *Pay Back* expressa o tempo necessário para o empreendedor recuperar o dinheiro investido.

A TIR corresponde à taxa de desconto que anula o VPL; quanto maior for a TIR, mais rentável será o investimento.

Tabela 5.14. Indicadores de rentabilidade

	VPL (R\$)	<i>Pay Back</i> (anos)	TIR
A	48.821	3,74	32,2%
B	23.711	4,91	21,2%
C	34.238	4,70	21,3%

5.9 Comparação e discussão dos resultados

Analisando as tabelas apresentadas e os indicadores de rentabilidade, é possível concluir que – nas hipóteses formuladas – as três configurações de investimento são economicamente viáveis, pois pela taxa de desconto estabelecida (12%), todas as análises proporcionam um VPL positivo no prazo de 10 anos. O tempo de retorno do investimento varia de um mínimo de 3,74 anos no caso A, até 3,91 anos no caso B. A TIR calculada apresenta valores praticamente iguais nos casos B e C (21,2% e 21,3% respectivamente), enquanto se destaca no caso A com o valor de 32,2%.

A comparação dos resultados leva a duas observações principais:

1. A configuração A se apresenta como a mais rentável, devido ao melhor aproveitamento da capacidade produtiva da planta, pois a briquetadeira é operada por três turnos diários a partir do segundo ano (Tabela 5.2). Como consequência disso, o investimento inicial (inferior aos outros dois casos por ser a briquetadeira de menor capacidade) é recuperado mais rapidamente, pois os custos fixos incidem menos na unidade de mercadoria produzida;
2. O estudo das configurações B e C (de igual capacidade produtiva) evidenciou que a briquetadeira de parafuso sem-fim, apesar de requerer um investimento inicial inferior, apresenta custos de operação mais altos, especialmente no que se refere à recuperação do revestimento da rosca e na demanda de energia elétrica. Todavia, os indicadores econômicos (especialmente a TIR e o *pay back*) apresentam valores muito próximos entre os dois casos, portanto, devido à incerteza na estimativa dos reais custos de operação e manutenção, não é possível afirmar com segurança qual

seria a configuração mais rentável. Essa análise, em todo caso, baseou-se na hipótese de igual preço de venda dos briquetes produzidos por ambas as tecnologias. Na eventualidade que os briquetes produzidos por extrusão (caso B) fossem direcionados para um nicho de mercado sensível à melhor qualidade (em comparação com os briquetes de prensa de pistão), poderiam ser vendidos a um preço maior suficiente para justificar o investimento na briquetadeira de rosca sem-fim.

5.10 Análise de sensibilidade

Para fortalecer o estudo de viabilidade econômica dos três casos apresentados foi analisada a sensibilidade dos investimentos à luz da variação no custo da matéria-prima, no custo da energia elétrica e no preço de venda dos briquetes. Para o preço de venda, foram consideradas três projeções apresentadas na Tabela 5.15. Nas Tabela 5.16, Tabela 5.17 e Tabela 5.18 são resumidos os valores da TIR em função dos parâmetros mencionados. Em negrito são evidenciados os valores utilizados na análise apresentada anteriormente, e em itálico são evidenciados os valores da TIR abaixo da Taxa de Desconto estabelecida (<12% investimento inviável).

Tabela 5.15. Projeções do preço de venda dos briquetes

Ano	1 ^a R\$/t	2 ^a R\$/t	3 ^a R\$/t
1	240	240	240
2	240	240	240
3	250	250	250
4	250	250	245
5	260	250	245
6	260	250	240
7	270	260	240
8	270	260	240
9	280	260	235
10	280	260	235

Tabela 5.16. Sensibilidade ao custo da energia elétrica

Custo Eletricidade (R\$/MWh)	TIR (%)		
	A	B	C
165,00	32,7	21,6	21,6
170,00	32,2	21,2	21,3
175,00	31,8	20,7	21,1
180,00	31,3	20,3	20,9
185,00	30,8	19,8	20,7

Tabela 5.17. Sensibilidade ao custo da serragem

Custo Serragem (R\$/t)	TIR (%)		
	A	B	C
60,00	32,2	21,2	21,3
63,00	29,8	18,8	19,7
66,00	27,3	16,3	17,9
69,00	24,7	13,7	16,1
72,00	22,1	11,0	14,3
75,00	19,5	8,2	12,4
78,00	16,8	5,2	10,5

Tabela 5.18. Sensibilidade à variação do preço de venda

	TIR (%)		
	A	B	C
1ª projeção	32,2	21,2	21,3
2ª projeção	29,8	17,8	19,1
3ª projeção	25,7	11,5	15,3

Os resultados demonstram que o preço da eletricidade tem pequena influência na economia do investimento, não afetando significativamente a TIR.

Já o custo da matéria-prima tem papel importante na viabilidade do investimento. O caso B se apresenta como o mais sensível, tornando-se inviável já com um custo de 72 R\$/t da serragem. O caso C permite um encarecimento da matéria-prima até o valor de 75 R\$/t, enquanto o caso A

continua viável até 83 R\$/t. Esses resultados comprovam a importância de considerar atentamente o custo de oportunidade da matéria-prima na avaliação de um projeto de investimento.

O preço de venda dos briquetes não afetou sensivelmente a TIR, mesmo nas condições mais desfavoráveis, nas quais foi assumido que o preço reduzisse a partir do quarto ano de vendas (3ª projeção). Nessa condição, apenas o caso B apresentou uma TIR de 11,5% (um pouco abaixo da taxa de atratividade). A baixa sensibilidade da TIR ao preço de venda se deve ao fato que as mudanças de preço (com relação à 1ª projeção, de referência) se verificam vários anos depois do investimento: dessa forma o valor do fluxo de caixa tem incidência menor por causa da atualização monetária.

Capítulo 6

Conclusões

Nesse trabalho foi proposta e argumentada a briquetagem de resíduos vegetais através da tecnologia de extrusão, ainda inédita no Brasil.

Foi conduzido um estudo preliminar sobre o mercado de briquetes, que apontou a existência de algumas dezenas de empresas de briquetagem espalhadas em vários estados do País. Foi apurado que todas elas fazem uso de briquetadeiras de pistão. Os briquetes são vendidos prevalentemente por um preço de 250,00 R\$/t, com uma extensão do mercado que varia de regional a nacional, havendo em alguns casos até exportação para os Estados Unidos e a Europa.

A proposta de introduzir a tecnologia da briquetadeira de parafuso sem-fim (já consolidada em alguns países, especialmente asiáticos) baseou-se na literatura técnica, que aponta numerosas vantagens, entre elas a capacidade de produzir briquetes mais coesos e resistentes, que possibilitam outros usos além da simples combustão direta (torrefação, carbonização), e a viabilidade econômica para instalação em pequenas e médias empresas, caracterizadas pela modesta geração de resíduos vegetais.

Foi estudado o desempenho de um protótipo de briquetadeira de rosca sem-fim, desenvolvido pela empresa Bioware Ltda em parceria com a UNICAMP. Esse protótipo foi projetado para uma capacidade nominal de 120 kg/h de briquetes. Foi testado com casca de arroz e foram avaliados a produtividade efetiva e o consumo de energia em função de algumas variáveis. Foram testadas matrizes de diversas geometrias. A produtividade, nas condições nominais de rotação do motor, ultrapassou as expectativas, chegando a 166 kg/h. A energia gasta no processo de briquetagem variou entre 0,10 e 0,15 kWh/kg, incluindo a contribuição da

resistência elétrica de aquecimento da matriz. Esses valores estão de acordo com os dados encontrados na literatura. Durante os ensaios de briquetagem foram observados os efeitos do acúmulo de umidade na matéria-prima e descobriu-se que é possível evitar condensação de vapor mantendo o silo da briquetadeira inteiramente preenchido.

Os briquetes obtidos apresentaram uma densidade de cerca 1200 kg/m^3 , um Poder Calorífico Superior de 14 MJ/kg e uma resistência mecânica por compressão radial acima de 3 MPa , confirmando a boa qualidade esperada.

Foi conduzido um estudo de viabilidade econômica considerando a instalação de uma planta de briquetagem em uma madeireira com disponibilidade de 700 toneladas de serragem por ano. Foram consideradas e comparadas três configurações: uma briquetadeira de parafuso sem-fim de 120 kg/h , uma outra de 250 kg/h e uma briquetadeira de pistão de 250 kg/h . A briquetadeira menor demonstrou-se a mais rentável devido ao melhor aproveitamento da sua capacidade produtiva, junto com o baixo custo de investimento. As duas briquetadeiras de 250 kg/h apresentaram equivalência econômica, mas a briquetadeira de parafuso sem-fim oferece um potencial mais promissor, graças à melhor qualidade dos briquetes.

A tecnologia da briquetadeira de rosca sem-fim estudada nesse trabalho se apresentou tecnicamente e economicamente viável no Brasil. O mercado poderá beneficiar-se dessa tecnologia, pois permitirá alcançar nichos mais amplos de consumidores, devido à maior versatilidade dos briquetes produzidos por extrusão e será possível aproveitar pequenos volumes de resíduos vegetais que atualmente têm destinos pouco valorizados.

6.1 Sugestões para futuros trabalhos.

Recomenda-se testar o desempenho da briquetadeira com outros resíduos (serragem, casca de café, etc.) para encontrar as condições de funcionamento ótimo para cada matéria-prima.

Recomenda-se, também, testar os efeitos do pré-aquecimento da biomassa, aproveitando, preferivelmente, calor gerado por processos colaterais, e, portanto, gratuitamente disponível. Na hipótese de torrefação ou carbonização dos briquetes, por exemplo, poderá ser aproveitado o calor de processo gerado no forno. De acordo com a literatura, o pré-aquecimento poderá proporcionar economia na energia necessária à briquetagem.

Enfim, recomenda-se estudar protótipos de briquetadeiras de capacidade maior, para disponibilizar no mercado uma oferta tecnológica mais ampla. No projeto de outras máquinas, sugere-se a adoção de um volante para lidar melhor com as oscilações na demanda de potência da briquetadeira.

Referências bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7217**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1983

ASTM – American Society for Testing and Materials. **D 1102**: Standard Test Method for Ash in Wood. 1982

ASTM – American Society for Testing and Materials. **E 872**: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. 1982

BHATTACHARYA, S. C.; LEON, M. A.; RAHMAN, M. M. A study on improved biomass briquetting. **Energy for Sustainable Development**, Bangalore; v. VI, n. 2, p. 67-71, June 2002.

BHATTACHARYA, S. C.; SETT, S.; SHRESTHA, R. M. State of the art for biomass densification. **Energy Sources**, New York, v. 11, n. 3, p. 161-182, 1989.

ERIKSSON, S.; PRIOR, M. **The briquetting of agricultural wastes for fuel**, Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1990.

FABORODE, M. O.; O'CALLAGHAN, J. R. Theoretical analysis of the compression of fibrous agricultural material. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v 35, n 3, p. 175-191, 1986.

FELFLI, F. F. **Torrefação de biomassa, viabilidade técnica e potencial de mercado**. 2003. 137 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – Campinas.

GROVER, P. D. Biomass Briquetting: Technical and Feasibility analysis under biomass densification research project (Phase II). In: International Workshop on Biomass Briquetting, 1. 1995, New Delhi. **Proceedings...** Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996. p. 13-23.

GROVER, P. D.; MISHRA, S. K. **Biomass Briquetting: technology and practices**, Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996.

GROVER, P. D.; MISHRA, S. K.; CLANCY, J. S. Development of an appropriate biomass briquetting technology suitable for production and use in developing countries. **Energy for Sustainable Development**, Bangalore; v. I, n. 1, p. 45-48, May 1994.

KUMAR, S.; BHATTACHARYA, S. C. **Renewable energy development in South and Southeast Asia through a Regional Research and Dissemination Programme**. (Trabalho apresentado em: World Renewable Energy Regional Conference, Jakarta, Indonesia, 18-21 April 2005). Disponível em: <<http://www.retsasia.ait.ac.th/conference%20publications.htm>>. Acesso em: 15 out. 2005

MISHRA, S. K. et al. Effect of feed preheating on briquetting of different biomass. In: International Workshop on Biomass Briquetting, 1. 1995, New Delhi. **Proceedings**...Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996. p. 31-37.

MISHRA, S. K. Hardfacing of screw for wear resistance. In: International Workshop on Biomass Briquetting, 1. 1995, New Delhi. **Proceedings**...Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996. p. 141-147.

REED, T. B.; TREZEK, G.; DIAZ, L. Biomass densification energy requirements. In: **Thermal conversion of solid waste and biomass**. Washington D. C.: American Chemical Society, 1980. p 177-189

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

STAUBER, E. **Machine for Disintegrating and Compresing Peat**. US Patent. 537909, 1895