

JOSÉ SILVIO PESSOA FILHO

**ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA DE BRIQUETES
DE CAPIM BRAQUIÁRIA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2013

JOSÉ SILVIO PESSOA FILHO

**ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA DE BRIQUETES
DE CAPIM BRAQUIÁRIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de concentração: Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Solidônio R. de Carvalho
Co-orientador: Prof. Dr. Valério Luiz Borges

UBERLÂNDIA - MG
2013

Dedicatória

*À minha querida mãe
Ao meu pai in memoriam
Aos meus guerreiros irmãos*

*Feliz o homem que descobre a sabedoria
e adquire inteligência!
Pois adquiri-la vale mais do que a
prata,
e seu lucro mais que o ouro.*

Provérbios 3, 13s

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por dar-me saúde, sabedoria e iluminar o meu caminho.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

Ao orientador, Solidônio Rodrigues de Carvalho, pela motivação, confiança e valiosa orientação profissional e pessoal.

Ao co-orientador, Valério Luiz Borges, pelas preciosas contribuições e incentivos dados.

A equipe do Laboratório de Transferência de Calor e Massa pelo espírito de colaboração infinito e estímulo por meio das palavras sinceras e dos momentos de descontração.

Ao técnico, Hugnei dos Santos, pelo grande apoio e disposição em ajudar-me, independentemente do horário, com as análises na bomba calorimétrica.

Aos órgãos de fomento CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

À Empresa Briqfeno Indústria e Comércio de Feno Ltda pela oportunidade e parceria.

À minha maravilhosa família por sempre acreditar em mim e ensinar-me a sonhar e a persistir com os desafios da vida. Muito obrigado: Denis Douglas Pessoa, Paulo Daniel Pessoa e Marlene Fernandes da Silva.

À Mariane Riceto pelo companheirismo, apoio e paciência.

Agradecimentos especiais a todas as pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, conscientes ou não, para a realização deste trabalho. De fato, esta dissertação é o fruto do apoio e da ajuda de muitas pessoas.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas.....	x
Lista de Símbolos	xi
Resumo	xiv
Abstract	xv
CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 - Biomassa como Fonte de Energia.....	5
2.2 - Caracterização Energética da Biomassa.....	9
2.2.1 - Análise Elementar	9
2.2.2 - Análise Imediata.....	9
2.2.3 - Poder Calorífico.....	10
2.2.4 - Densidade Energética	13
2.3 - Tratamentos de Biomassa.....	14
2.3.1 - Secagem.....	15
2.3.2 - Compactação ou Briquetagem e Biomassa.....	16
2.3.3 - Torrefação.....	19
2.3.4 - Carbonização	22
2.4 – Objetivos e Contribuição Científica deste Trabalho.....	26
CAPITULO 3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	28
3.1 - Introdução	28
3.2 - O Briquete de Capim Braquiária.....	28
3.3 - Preparação das Amostras	29
3.4 - Análise Imediata.....	31
3.4.1 - Determinação do Teor de Umidade em Base Úmida.....	33
3.4.2 - Determinação do Teor de Materiais Voláteis	33
3.4.3 - Determinação do Teor de Cinzas	34
3.4.4 - Determinação do Teor de Carbono Fixo.....	34
3.5 - Determinação da Densidade à Granel e Densidade Aparente	35
3.6 - Determinação do Poder Calorífico.....	35

3.7 - Densidade Energética	36
3.8 - Influência do Teor de Umidade no Poder Calorífico Superior do Briquete	37
3.9 - Torrefação de Briquete.....	37
3.10 - Definição do Rendimento Gravimétrico	39
3.11 – Análise de Higroscopicidade do Briquete Torrificado.....	39
CAPITULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1 - Caracterização do Produto Padrão	41
4.2 - Influência da Umidade no Poder Calorífico do Produto Padrão.....	47
4.3 - Torrefação de Briquete.....	49
4.3.1 - Rendimento Gravimétrico.....	50
4.3.2- Análise de Higroscopicidade	52
4.3.3 - Comportamento do Capim na Combustão.....	55
CAPITULO 5 - ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA DO PROCESSO DE TORREFAÇÃO	60
5.1 - Introdução	60
5.2 - Problema Físico	60
5.3 - Problema Térmico	61
5.4 - Problema Matemático	63
5.5 - Medição de Temperaturas.....	64
5.6 - Medição da Vazão de Ar e Potência do Soprador Térmico	67
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	73
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	77
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Distribuição da biomassa numa árvore. (Fonte: <i>LIPPEL</i> , 2012a)	7
Figura 2.2 - Exemplos de biomassa-combustível. (Fonte: <i>LIPPEL</i> , 2012a)	8
Figura 2.3 - Cadeia da bioenergia. (Fonte: <i>MME</i> , 2007).....	15
Figura 2.4 - Equipamentos para compactação de biomassa. a) Prensa de pistão mecânico (Fonte: <i>LIPPEL</i> , 2012a), b) Prensa de parafuso cônicos, c) Prensa de rolo e d) Peletizadora (Fonte: <i>BHATTACHARYA et al</i> , 1989).....	19
Figura 2.5 - Produtos oriundos da carbonização (Fonte: Adaptado de <i>GOMES; OLIVEIRA</i> , 1980).	23
Figura 2.6 - Relação entre temperatura, percentual de carbono fixo e rendimento gravimétrico. (Fonte: <i>BRIANE; DOAT</i> , 1985).	24
Figura 2.7 - Fornos de alvenaria: meia laranja, retangular (Fonte: <i>AMODEI</i> , 2008) e RAC220, respectivamente.	25
Figura 2.8 - Fornos metálicos: cilíndricos verticais (Fonte: <i>COLOMBO et al</i> , 2006) e container (Fonte: <i>DPC BIOMASSA</i> , 2012), respectivamente.	25
Figura 3.1 - Preparação das amostras	30
Figura 3.2 - 1: briquete; 2: amostra triturada; 3: padronização dos grãos e 4: amostras em sacos plásticos para testes experimentais.....	30
Figura 3.3 - Materiais e equipamentos para análise imediata.....	32
Figura 3.4 - Bomba calorimétrica IKA-WERNE C2000	36
Figura 3.5 - Equipamentos para torrefação	38
Figura 4.1 - Poder calorífico em função do teor de umidade da amostra de briquete.....	48
Figura 4.2 - Comparativo do poder calorífico do capim e do eucalipto em função da umidade.....	49
Figura 4.3 - Amostra de briquete de capim braquiária triturado após torrefação.	50
Figura 4.4 - Rendimento gravimétrico em função da temperatura e tempo de aquecimento.....	51
Figura 4.5 - Poderes caloríficos superiores em função dos tratamentos térmicos.	53
Figura 4.6 - Absorção de umidade e redução no PCS em função do tratamento térmico.....	54
Figura 4.7 - Esquema da bancada de análise de combustão (Solidworks)	56
Figura 4.8 - Perda de massa em função do tempo de combustão. Matéria prima: briquete e para o capim braquiária padrão, ambos com teor de umidade de 8,8%.....	57
Figura 4.9 – Combustão do capim braquiária padrão com 8,8% de umidade.....	57

Figura 4.10 - Perda de massa transiente para alguns tipos de biomassas.....	58
Figura 4.11 - Combustão do capim braquiária padrão torrificado a 240°C/30min.....	58
Figura 5.1 - Projeto de forno de torrefação.....	61
Figura 5.2 - Momento 1: ausência de biomassa no interior do cilindro.	62
Figura 5.3 - Momento 2: presença de biomassa no interior do cilindro.....	62
Figura 5.4 - Localização dos termopares no forno.	65
Figura 5.5 - Temperaturas monitoradas no forno nos momentos 1 e 2.	65
Figura 5.6 - Fluxograma: algoritmo computacional.....	66
Figura 5.7 - Esquema de medição de pressão e temperatura na chaminé do forno. (Adaptado de FIGUEIRA JR, 2012).	67
Figura 5.8 - Diferencial de pressão no forno e potência do soprador nos momentos 1 e 2..	68
Figura 5.9- Entalpia e vazão mássica transiente nos momentos 1 e 2.	69
Figura 5.10 - Energia de torrefação acumulada no forno nos momentos 1 e 2.....	70
Figura 5.11 - Energia para torrefação da biomassa.....	71
Figura 5.12 - Consumo de capim braquiária em função da eficiência do forno. Valor de referência: torrefação de 1 ton de biomassa.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fases da degradação térmica da biomassa (Fonte: RODRIGUES, 2009).	21
Tabela 2.2 – Normas Internacionais e Nacionais.....	26
Tabela 3.1 – Quantidade de água adicionada e umidade desejada.....	37
Tabela 3.2 – Quadro ilustrativo dos experimentos.....	39
Tabela 4.1 - Análise imediata de amostras padrão.....	42
Tabela 4.2 - Análise imediata de amostras padrão e comparações com dados da literatura científica.	42
Tabela 4.3 - Poder calorífico de amostras padrão	43
Tabela 4.4 - Poder calorífico de amostras padrão e comparações com dados da literatura científica.	44
Tabela 4.5 - Densidade de amostras padrão.....	45
Tabela 4.6 - Densidade energética de amostras padrão e comparações com dados da literatura científica.....	46
Tabela 4.7 - Poder calorífico em função da umidade da amostra padrão.	47
Tabela 4.8 - Análise imediata do produto torrificado: 240°C e tempo de aquecimento de 30 min.....	55
Tabela 5.1 - Energia necessária para a torrefação do capim braquiária.	71

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

A	Área transversal	m^2
CF	Teor de carbono fixo	%
CZ	Teor de cinzas	%
D	Densidade	kg/m^3
DE	Densidade energética	kcal/m^3
dP, P	Diferencial de pressão	Pa
E	Energia	J
\dot{E}	Taxa de energia	W
H	Porcentagem em massa do hidrogênio	%
h	Entalpia	kcal/kg
M	Massa da caixa	kg
m	Massa, porcentagem em massa do vapor de água	g, %
\dot{m}	Fluxo mássico	kg/s
MV	Teor de materiais voláteis	%
P	Pressão local	Pa
PC	Poder calorífico	kcal/kg
PCI	Poder calorífico inferior	kcal/kg
PCS	Poder calorífico superior	kcal/kg
PCU	Poder calorífico útil	kcal/kg
R	Constante do ar	J/kgK
T	Temperatura	$^\circ\text{C}$
t	Tempo	s
TU	Teor de umidade	%
V	Sinal elétrico, volume interno da caixa.	v, m^3

Letras Gregas

\emptyset	Diâmetro interno	m
ρ	Massa específica	kg/m ³
η_m	Rendimento gravimétrico	%

Subscritos

0	Cadinho, massa inicial da amostra ou do cadinho somada aos resíduos.
1	Massa da caixa vazia ou final da amostra
2	Massa da caixa cheia ou inicial do cadinho somada à da amostra
3	Massa final do cadinho somada à amostra
acu	Acumulada
amb	Ambiente
ar	Ar
B.S.	Base seca
B.U.	Base úmida
carcaça	Carcaça
chaminé	Chaminé
Chicanas, chi	Chicanas
ent	Entrada
<i>F. Cil</i>	Forno cilíndrico
<i>gra</i>	Granel
<i>i</i>	1 (Momento 1), 2 (Momento 2)
<i>j</i>	e (entrada), s (saída)
<i>lv</i>	Vaporização
sai	Saída
<i>s, padrão</i>	Padrão seca
torr	Torrificada

Abreviações

CNH	Capim padrão com teor de umidade de 22,973%
CNS	Capim padrão seco
CT	Capim torrificado
CTH	Capim torrificado submetido à análise de higroscopidade
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
FUPEF	Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná
LEB	Laboratório de Energia de Biomassa
LTCM	Laboratório de Transferência de Calor e Massa
MDL	Mecanismos de Desenvolvimento Limpo
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

PESSOA FILHO, J.S. **ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA DE BRIQUETES DE CAPIM BRAQUIÁRIA.** 2013. 85p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

A biomassa é uma das principais fontes de energia renováveis e sustentáveis capazes de suprir a crescente demanda de energia mundial e diminuir a dependência dos combustíveis fósseis. Entretanto, o uso deste combustível requer um manuseio cuidadoso e consciente dos recursos naturais, para evitar desequilíbrios ambientais e destruição de ecossistemas. Dentre as alternativas existentes para o uso da biomassa com fins energéticos, destaca-se o reaproveitamento energético de resíduos florestais, agrícolas e urbanos. Todavia, os resíduos *in natura* apresentam-se com baixa eficiência energética, devido algumas características gerais que restringe o seu uso direto como combustível, tais como baixa densidade, alta umidade, granulometria irregular, baixo poder calorífico, entre outras. No intuito de corrigir algumas propriedades, melhorar e padronizar o produto faz-se necessária a utilização de processos industriais, como a briquetagem e a torrefação. Neste contexto, este trabalho consiste em analisar e definir o potencial energético de briquetes de capim braquiária (*Brachiaria ssp.*) produzidos pela empresa Briqfeno Indústria e Comércio de Feno Ltda sediada no município de Tupaciguara - Minas Gerais. Os experimentos foram conduzidos segundo normas nacionais e consistiram em realizar a análise imediata, determinar a densidade do briquete e definir a relação entre poder calorífico e umidade do produto padrão. Finalmente, aplicou-se o tratamento térmico denominado torrefação, o que proporcionou a valorização energética do produto e diminuiu sua característica higroscópica quando comparado ao briquete padrão.

PESSOA FILHO, J.S. **THERMAL AND ENERGY ANALYSIS OF BRIQUETTES OF BRACHIARIA GRASS.** 2013. 85p. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

Biomass is one of the main sources of renewable and sustainable energy able to meet the growing global energy demand and reduce dependence on fossil fuels. However, the use of this biofuel requires a conscious and careful handling of natural resources, to avoid environmental imbalances and destruction of ecosystems. Among the alternatives of biomass for energy purposes forestry, agricultural and urban wastes are highlights. However, raw biomass has low energy efficiency, low density, high humidity, irregular grain, low heating value that restricts their direct use as biofuel. In order to improve the thermal properties and standardize the product is necessary to treat the biomass from industrial processes such as torrefaction and briquetting. In this context, this work aims to analyze and define the potential energy of briquettes of brachiaria grass (*Brachiaria ssp.*) produced by Brifeno Industria e Comercio de Feno Ltda located in Tupaciguara - Minas Gerais. The experiments were conducted according to Brazilian rules and the standard product was submitted to density tests, moisture and immediate analysis. A relationship between heating value and moisture content was also defined. Finally, the product was submitted to the torrefaction process that improved its energy and decreased its hygroscopic character when compared to raw briquettes.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O conceito de sustentabilidade é um elemento chave no movimento global. A busca por combustíveis ecologicamente corretos que possam reduzir ou mesmo suprimir o consumo dos combustíveis fósseis é contínua. Assim, são cada vez maiores os investimentos em fontes de energia renováveis de forma a diversificar a matriz energética mundial.

Neste contexto, a biomassa exerce um papel bastante relevante, sendo uma das fontes de energia renovável mais explorada no planeta. Nos países em desenvolvimento a biomassa sempre foi crucial para a geração de energia. Nos países desenvolvidos, onde os combustíveis fósseis se constituem como a base energética, a biomassa também se faz presente, sendo comum o aproveitamento de resíduos florestais, urbanos e industriais como fonte de energia (RODRIGUES, 2009).

Segundo Filippetto (2008), na busca por fontes energéticas alternativas e sustentáveis, 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.

Para Gonçalves (2010), a produção de biomassa para fins energéticos renováveis, gera empregos e requer menor investimento por posto de trabalho criado do que os combustíveis fósseis. Além disso, tem o ciclo de carbono fechado (o que significa diminuição das emissões de poluentes) e economiza as fontes não renováveis. Essas são apenas

algumas vantagens, porém seu uso deve se dar de forma sustentável, de acordo com técnicas apropriadas de manejo e cultivo e de forma a não concorrer com a agricultura.

As indústrias do setor florestal geram um volume significativo de resíduos durante as diversas fases operacionais, que vão desde a exploração florestal até o produto final, podendo ser considerados como uma importante fonte de biomassa. Os resíduos gerados durante a colheita florestal são principalmente compostos de galhos, ponteiros, cascas e folhas (PINCELLI, 2011).

O reaproveitamento energético de resíduos vegetais gerados a partir de várias atividades agroindustriais pode ser uma forma de reduzir a pressão sobre recursos naturais diretamente explorados como fonte de combustíveis (FILIPPETTO, 2008). Assim, para Protássio et al (2011), os resíduos das mais variadas origens despontam-se como interessantes alternativas energéticas.

Entretanto, os resíduos *in natura* apresentam algumas características que podem restringir seu uso direto como combustível, tais como a baixa densidade, o alto teor de umidade, a granulometria irregular, o baixo teor de carbono fixo e o baixo poder calorífico. Portanto, no intuito de tornar o uso mais eficiente desse combustível heterogêneo para padronizar e aumentar a qualidade da biomassa, é necessário, na maioria dos casos, a utilização de processos industriais para tentar corrigir algumas propriedades. Dentre os diversos processos existentes, destacam-se a torrefação e a briquetagem. (RODRIGUES, 2009; GONÇALVES, 2010; VILAS BOAS, 2011).

No caso de resíduos florestais, a torrefação é conduzida a temperatura entre 150 e 300°C e consiste em concentrar a energia da biomassa em curto tempo, e obter altos rendimentos operando com baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas. Este tratamento térmico poderá conduzir à homogeneização das características químicas e físico-mecânicas do material e, sobretudo, concentrar a energia disponível em um novo produto, com uma perda de massa limitada variando em função da temperatura. Além da maior concentração de energia, o produto final poderá ser mais facilmente fragmentável devido à redução de suas resistências físico-mecânicas, além de apresentar menor higroscopичidade e um baixo teor de umidade final. Dentre outros, tais aspectos poderão garantir maior sucesso na aplicação da biomassa residual da colheita florestal para fins energéticos. Além do aumento da resistência ao ataque de organismos xilófagos (PINCELLI, 2011).

A briquetagem, por sua vez, é um processo de densificação energética, eficiente em concentrar a energia disponível na biomassa. A briquetagem ou compactação de resíduos providencia um produto sólido denominado de briquete diretamente competitivo com lenha e carvão vegetal, podendo, em alguns casos, ser um ótimo substituto. A briquetagem é um tratamento mecânico de alternativa não somente para aproveitar resíduos como para

facilitar o transporte destes para aplicações em lugares distantes da fonte (FILIPPETTO, 2008).

Portanto, sendo o Brasil um grande produtor de biomassa residual, considera-se que o tratamento térmico aliado à posterior briquetagem, uma alternativa promissora para melhorar a qualidade da biomassa e torná-la competitiva no mercado de combustíveis e geração de energia. Destacam-se ainda a geração de novos empregos, renda e os benefícios para o meio ambiente (VILAS BOAS, 2011).

Neste sentido, este estudo teve como objetivo analisar e definir o potencial energético de briquetes de capim braquiária triturados a partir do poder calorífico e da chamada “análise imediata” que determina o teor de umidade, teor de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo. Propôs-se ainda a determinação da influência da umidade no poder calorífico do produto padrão e um estudo sobre a torrefação de briquetes de braquiária como alternativa para a valorização energética do produto. Buscaram-se também informações, por meio de um balanço energético, para quantificar o gasto energético para realizar a torrefação. Com esse estudo, foi possível analisar a viabilidade energética e sustentável do briquete de capim braquiária em uso industrial e residencial. Por meio da torrefação do briquete desintegrado, obteve-se um produto com baixa característica higroscópica, com maior potencial energético e econômico quando comparado ao briquete padrão, ao bagaço de cana, à lenha e a outros combustíveis.

No Capítulo II deste trabalho apresenta-se uma revisão bibliográfica com abordagem na biomassa como fonte de energia e nos ensaios iniciais e determinantes para a caracterização energética da biomassa. Além disso, dispõe-se sobre alguns tratamentos termomecânicos tais como a secagem, a briquetagem, a torrefação e a carbonização da biomassa.

No Capítulo III constam os procedimentos experimentais empregados conforme normas nacionais. São apresentados detalhes sobre cada metodologia, preparação de amostras, determinação da análise imediata, densidade aparente, densidade à granel, poder calorífico, entre outros. Ainda neste capítulo, abordam-se os procedimentos para determinar a influência da umidade no poder calorífico da amostra padrão, a valorização energética do produto por meio da torrefação e a análise higroscópica dos produtos pós-tratamento térmico. Para que ocorra a torrefação adequada foram definidos os parâmetros tempo e temperatura do processo, de modo a obter um produto otimizado, ou seja, menos higroscópico e com maior poder calorífico.

No Capítulo IV são apresentados os resultados obtidos a partir da caracterização do produto padrão e dos produtos após tratamento térmico. Aborda os resultados da relação da

umidade no poder calorífico do produto padrão, da análise da higroscopicidade dos produtos torrificados e do comportamento do capim na combustão.

Posteriormente, no Capítulo V realiza-se uma análise térmica e energética do processo de torrefação, com definição de temperatura e tempo de residência, capaz de fornecer o produto menos higroscópico e com maior poder calorífico superior em relação à amostra padrão. Também é apresentada a abordagem do problema físico, térmico e matemático deste balanço energético. Por fim, é mostrado o desenvolvimento de um forno para torrefação, a mensuração de temperaturas e de vazão para entrada de dados no algoritmo de cálculo do gasto energético desse processo.

Por fim, o Capítulo VI apresenta as conclusões e as propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Biomassa como Fonte de Energia

Estudos e pesquisas estão voltados a aumentar a diversidade da matriz energética para garantir a demanda mundial de energia e minimizar a dependência dos combustíveis fósseis. Assim, a diminuição das reservas destes combustíveis e a preocupação com o meio ambiente no que diz respeito aos impactos ambientais têm valorizado o uso de fontes renováveis de energia tais como a biomassa.

Nos últimos anos, a biomassa tem sido reconhecida como recurso energético alternativo aos combustíveis fósseis, devido ao seu caráter renovável e por apresentar um ciclo de CO₂ neutro (FONSECA FELFI, 1999; RENDEIRO, 2008). Rodrigues (2009) ressalta que na atual conjuntura energética mundial a biomassa apresenta-se como uma das poucas fontes capazes de suprir a crescente demanda frente à polêmica diminuição na oferta dos combustíveis fósseis, além das explícitas vantagens ambientais diante das alarmantes mudanças climáticas em curso no planeta.

Segundo Walker (2009), tanto no mercado internacional quanto no interno, a biomassa é hoje considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis. Ela é potencialmente uma rica fonte de geração de energia elétrica e de biocombustíveis - como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição aos derivados de petróleo como o óleo diesel e a gasolina. Definitivamente, a biomassa constitui-se em uma das fontes de produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos.

Para o MME (2007) e Walker (2009), o termo biomassa compreende a matéria vegetal gerada de forma natural, ou seja, produzida pela natureza sem a intervenção do homem, resultado do processo da fotossíntese (ciclo do carbono) e seus diversos produtos e subprodutos derivados, tais como florestas, culturas e resíduos agrícolas, dejetos animais e matéria orgânica, contida nos rejeitos industrial e urbano.

Ciampi (1992) diz que a biomassa é uma das fontes energéticas mais importantes com que o país pode contar e a define como toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal que pode ser convertida em energia.

A expectativa de maior participação da biomassa no suprimento de energia no futuro pode ser explicada por vários motivos. Primeiramente, os combustíveis obtidos a partir da biomassa podem substituir os combustíveis fósseis na atual infraestrutura de suprimento de energia a partir de pequenas adaptações. As energias renováveis intermitentes, como a eólica e a solar, representam um desafio à maneira como a energia é distribuída e consumida. Em segundo lugar, a disponibilidade de terras faz com que os recursos em potencial sejam abundantes. Em terceiro lugar, o crescimento da população, a urbanização e a melhoria dos padrões de vida nos países em desenvolvimento, fazem aumentar em ritmo acelerado a demanda por energia (WALKER, 2009).

O Brasil particularmente possui amplas e totais condições para o uso de madeira para fins energéticos bastando para isso estudos específicos para a implantação de um sistema racional e sustentável de florestas para energia (BRITO; BARRICHELO, 1979). As condições naturais e geográficas favoráveis do Brasil justificam o entendimento de que o país reúne vantagens comparativas expressivas para assumir posição de destaque, no plano mundial, na produção e uso da biomassa como recurso energético. Entre elas destacam-se a grande quantidade de terra agricultável com características adequadas do solo e condições climáticas, a perspectiva de incorporação de novas áreas onde os impactos ambientais estão circunscritos ao socialmente aceito, além da possibilidade de múltiplos cultivos dentro do ano calendário. Ademais, o Brasil recebe intensa radiação solar ao longo de todo o ano, a fonte de energia fundamental da produção de biomassa, seja sua finalidade a produção agrícola e pecuária para alimentação humana ou a produção de culturas com fins agroindustriais (MME, 2007).

Dentre as alternativas existentes para o uso da biomassa com fins energéticos, atualmente, destaca-se a utilização dos resíduos florestais, agrícolas e urbanos. Os resíduos podem ser classificados em: resíduos municipais – são resíduos domésticos, comerciais, das atividades municipais e outros; resíduos agroindustriais – são resíduos agrícolas, agropecuários, florestais e industriais e resíduos especiais – são resíduos hospitalares, radioativos, perigosos e outros (CIAMPI, 1992).

Na Figura 2.1 se tem a distribuição da biomassa numa árvore e a sua respectiva importância comercial.

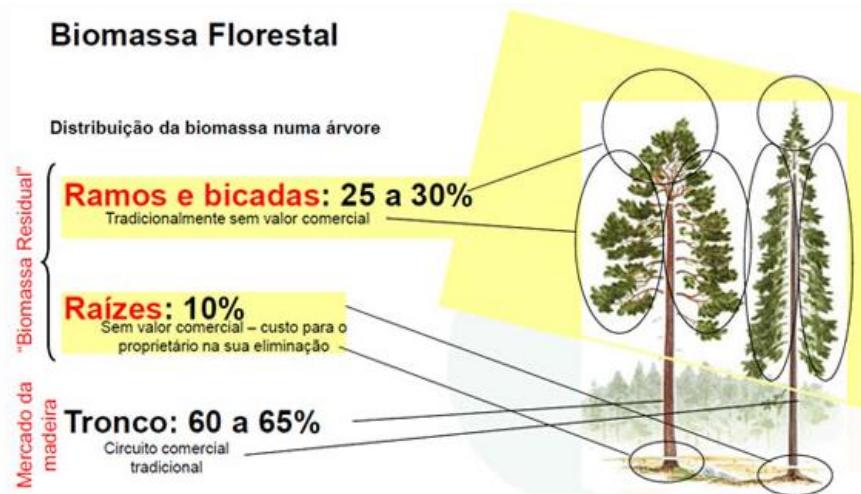


Figura 2.1 - Distribuição da biomassa numa árvore (Fonte: LIPPEL, 2012a).

Segundo a empresa Lippel (2012a), a renovação da biomassa ocorre através do ciclo do carbono. Basicamente, a combustão de biomassa ou de seus derivados provoca a liberação de CO₂ na atmosfera. As plantas, através da fotossíntese, transformam esse CO₂ nos hidratos de carbono, liberando oxigênio. Assim, teoricamente, a utilização da biomassa, desde que não seja de forma predatória, não altera a composição da atmosfera.

Sabe-se que na prática a combustão de biomassa libera outros gases, tais como o CO e o H₂, além de outros, com alto poder de aquecimento global (GWP), tal como o CH₄. Portanto, mesmo a combustão de biomassa, pode interferir na atmosfera.

Diversas são as vantagens do uso da biomassa na produção de energia, tais como: o baixo custo, o fato de ser renovável, permitir o reaproveitamento de resíduos, a geração de empregos e ser bem menos poluente que outras fontes de energia, tais como o petróleo e o carvão mineral (LIPPEL, 2012a).

A biomassa se destaca pelas facilidades de armazenamento, conversão, transporte e pela possibilidade de aumentar a sua densidade energética. Embora a utilização de biomassa como fonte de energia traga vantagens fantásticas, é importante ressaltar que se deve ter um amplo controle sobre as áreas desmatadas. Um exemplo disso foi à expansão da indústria de álcool no Brasil, onde várias florestas foram desmatadas para dar lugar a plantações de cana-de-açúcar. Por isso a preocupação ambiental, mais do que nunca, deve ser prioridade na utilização da biomassa. (LIPPEL, 2012a).

Alguns exemplos de biomassa com seu uso destinado a combustível são mostrados na Fig. 2.2: maravalha, cavacos de madeira, briquete de biomassa, pellets de biomassa, dentre outros tipos de biomassa.



(a) Maravalha



(b) Cavacos de madeira



(c) Briquete de biomassa



(d) Pellets de biomassa



(e) Caroço de açaí



(f) Casca de café



(g) Castanha de caju



(h) Babaçu



(i) Bagaço de cana



(j) Pallets triturados

Figura 2.2 - Exemplos de biomassa-combustível. (Fonte: LIPPEL, 2012a).

2.2. Caracterização Energética da Biomassa

Segundo Ciampi (1992), na caracterização de um combustível, diversos testes estão disponíveis, mas na investigação de um novo material os iniciais e determinantes ensaios a serem realizados são: análise imediata, análise elementar e poder calorífico. Ensaios esses de suma importância para comprovação da viabilidade econômica e energética de determinado combustível. Rodrigues (2009) complementa esses com a densidade energética.

2.2.1. Análise Elementar

A análise elementar consiste na determinação dos percentuais mássicos dos elementos carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre contidos em uma amostra da biomassa combustível conforme as normas ASTM E775, ASTM E777, ASTM E778 e ASTM E870.

Segundo Ciampi (1992), as técnicas utilizadas para essas determinações são ensaios que promovem a destruição oxidativa da amostra e posterior absorção dos produtos em absorventes adequados. O enxofre é determinado separadamente através de métodos gravimétricos e/ou de combustão a alta temperatura.

O conhecimento da composição química do combustível permite quantificar a relação ar-combustível e prever a composição dos gases na saída do processo de combustão ou gaseificação (FONSECA FELFI, 2003; RENDEIRO, 2008;).

O percentual de hidrogênio obtido por essa análise permite o cálculo do poder calorífico inferior (PCI) a partir do poder calorífico superior (PCS) conforme descrito no item 2.2.3.

2.2.2. Análise Imediata

A análise imediata é realizada de acordo com a norma ABNT NBR 8112/1986, esta consta da determinação dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

Teor de Umidade: caracteriza a proporção de água na forma livre presente no mesmo. Em combustíveis entende-se como impureza que reduz a energia térmica (CIAMPI, 1992).

Brito e Barrichelo (1979) já mencionavam a importância desse valor por duas razões básicas: a primeira é que ele varia dentro de faixa ampla de valores em função de espécies, clima, armazenamento, etc., tornando o controle do processo de combustão mais difícil; e a segunda razão é que a água tem um poder calorífico negativo, isto é, necessita de calor para evaporá-la.

Souza et al (2012) comenta que o teor de umidade pode ser considerado uma das características mais relevantes ao se utilizar matérias lignocelulósicos para a geração de energia, tanto em processos termoquímicos, como a combustão e a pirólise, quanto em processos físicos, como a densificação para produção de pellets e briquetes, e biológicos, como a fermentação. Além desse fato, é necessário considerar que o poder calorífico dos materiais lignocelulósicos segue tendências inversamente proporcionais ao conteúdo de água presente nos mesmos.

Farinhaque (1981), Lima et al (2008) e Souza et al (2012) concluíram que o poder calorífico é inversamente proporcional ao teor de umidade, ou seja a umidade influencia negativamente na quantidade de calor liberado durante a queima devido ao gasto de energia para aquecimento e vaporização da água livre.

Teor de Materiais Voláteis: é a fração do material sob a forma de gases e vapores, quando o material é aquecido em condições específicas. Utilizada com outros fatores para encontrar dados da temperatura de ignição do combustível e para o cálculo das quantidades de ar teoricamente necessárias para a combustão do mesmo (CIAMPI, 1992; FONSECA FELFI, 2003). Segundo Brito e Barrichelo (1979), aproximadamente 50 a 60% do calor aproveitável da queima da madeira está nos gases voláteis.

Teor de Cinzas: é o teste primário para determinar o potencial de uso e o valor econômico de um combustível. Cinzas é o resíduo inorgânico restante depois de o combustível ter sido queimado em condições específicas (CIAMPI, 1992). Segundo Fonseca Felfi (2003), o teor de cinzas proporciona uma ideia da quantidade de escórias e/ou resíduo a ser retirada do forno.

Teor de Carbono Fixo: é obtido de forma indireta, pois é um valor calculado pela subtração (de 100%) do somatório dos teores de materiais voláteis e cinzas. Segundo Ciampi (1992) pode-se pensar no carbono fixo como o material sólido, deixado após a liberação dos materiais voláteis, que é queimado como combustível. Segundo Assis (2008), o carbono fixo depende das condições do tratamento térmico sofrido e do teor de lignina presente na biomassa. Fonseca Felfi (2003) e Assis (2008) comentam que este teor é de influência direta no poder calorífico, pois quanto maior a quantidade de carbono fixo maior será o poder calorífico do combustível.

2.2.3. Poder Calorífico

Na avaliação de um combustível, mediante caracterização, o poder calorífico é a propriedade mais importante por fornecer o potencial energético do combustível.

O poder calorífico é separado em dois valores, superior e inferior. O poder calorífico superior (PCS) é a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão

completa de uma unidade de massa de combustível seco, sendo a água proveniente da combustão do hidrogênio de composição condensada ao estado líquido e o calor que é derivado desta condensação recuperado. Já o poder calorífico inferior (PCI) é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água, ou ainda, o valor obtido quando se considera a água no estado de vapor ao final da combustão. (CIAMPI, 1992; QUIRINO et al, 2004).

O PCS estabelece o potencial energético teórico contido no combustível e é obtido experimentalmente por meio de um equipamento chamado bomba calorimétrica ou calorímetro. Instrumento destinado a medir transformações energéticas onde há alterações de temperatura e/ou transferência de calor com o ambiente. Um calorímetro típico, contudo, pode ser dividido em duas partes: o vaso calorimétrico (local onde o processo se realiza) e o ambiente ou vizinhança. Embora, existem vários critérios para a classificação de um calorímetro, a classificação mais geral leva em conta as trocas de calor entre o vaso calorimétrico e o ambiente, assim, conduz a três tipos principais de calorímetros: adiabático, isoperibólico ou jaqueta isolante e o de condução de calor (CIAMPI, 1992).

Segundo Ciampi (1992), no calorímetro adiabático não há troca de calor entre o vaso calorimétrico e o ambiente, equipamentos estes de complexa operação e utilizados para determinação de calores específicos em temperaturas bem diferentes da ambiente. Em um calorímetro de condução de calor, o calor é transferido do vaso calorimétrico para o ambiente, que funciona como reservatório de calor, utilizados principalmente, como microcalorímetros para processos lentos geralmente em sistemas bioquímicos. Já o calorímetro isoperibólicos, encontra-se entre os outros dois tipos de calorímetro, o vaso calorimétrico não está totalmente isolado do ambiente, de modo que um pequeno fluxo de calor ocorre entre ambos.

Geralmente em publicações o valor de poder calorífico superior (PCS) é citado como poder calorífico (PC), a menos que seja declarado, especificamente, que está sendo referido o PCI. Entretanto, o processo de determinação do PCS não pode ser comparado a um processo real de combustão onde a água permanece no estado de vapor e é liberada junto com os gases de combustão. Na prática adota-se o PCI, pois ele fornece uma ideia mais exata do calor liberado pelo combustível. Como não existe um equipamento que determine o PCI ele tem que ser calculado a partir do PCS. O PCI é obtido deduzindo do PCS à quantidade de energia em forma de calor necessária para vaporizar a água presente na amostra, mais a água formada da combustão do hidrogênio contido na amostra (CIAMPI, 1992).

Em um combustível seco, deduzindo do PCS, a quantidade de energia necessária para evaporar a água proveniente da combustão do hidrogênio contido no combustível,

obtém-se o PCI em base seca conforme mostra a Eq. (2.1) (CIAMPI, 1992; Gonçalves et al, 2009; Rendeiro, 2008).

$$PCI_{B.S.} = PCS_{B.S.} - h_{lv} \cdot m \quad (2.1)$$

onde, $PCI_{B.S.}$ é o poder calorífico inferior em base seca [kcal/kg], $PCS_{B.S.}$ é o poder calorífico superior em base seca [kcal/kg], h_{lv} é a entalpia de vaporização da água a 20°C [kcal/kg] e m é a porcentagem de massa do vapor de água presente nos gases de combustão [%].

A combustão do hidrogênio efetua-se de acordo com a reação química descrita na Eq.(2.2).



Observa-se na Equação (2.2) que a massa de água formada é igual a 9 vezes a massa do hidrogênio. Portanto, para um combustível seco, obtém-se: $m = 9H$. Onde, H é a porcentagem em massa do hidrogênio contida no combustível. Substituindo, na Eq. (2.1), temos:

$$PCI_{B.S.} = PCS_{B.S.} - h_{lv} \left(9 \cdot \frac{H}{100} \right) \quad (2.3)$$

A Equação (2.3) aplica-se apenas a um combustível seco (teor de umidade igual a 0%). Entretanto, para a determinação do PCI de um combustível úmido, ou seja, o PCI em base úmida chamado de poder calorífico útil (PCU) deve-se deduzir a quantidade de energia necessária para evaporar a umidade.

$$PCI_{B.U.} = PCU = PCI_{B.S.} \left(1 - \frac{TU}{100} \right) - h_{lv} \left(\frac{TU}{100} \right) \quad (2.4)$$

onde, $PCI_{B.U.}$ é o poder calorífico inferior em base úmida [kcal/kg], PCU é o poder calorífico útil [kcal/kg] e TU é a porcentagem em massa de umidade na amostra [%].

Neste trabalho, o poder calorífico superior foi determinado conforme a norma ABNT NBR 8633/1984 com a utilização de um calorímetro isoperibólico 25°C IKA-WERNE C2000. Sendo necessária a transformação dos valores de poder calorífico superior para poder calorífico inferior por meio das Eq.(2.3) e Eq.(2.4). Devido à ausência de equipamentos

adequados para a realização da análise elementar do briquete de capim braquiária no LTCM-UFU, considerou-se neste trabalho o percentual médio de hidrogênio presente no material padrão como 5%. Este valor foi obtido a partir do trabalho de Gomes et al (2013), no qual apresenta um estudo referente a caracterização de biomassa de diversas fontes (Capim Elefante cv Napier, Capim Mombaça, *Brachiaria brizantha* cv Marandú, Sorgo e Bagaço de Cana-de-Açúcar) visando obtenção futura de etanol de segunda geração. No que se refere à entalpia de vaporização da água a 20°C, adotou-se o valor disponível em tabelas de propriedades da água: 586,16 kcal/kg (2454,14 kJ/kg) (BORGNAKKE; SONNTAG, 2009).

2.2.4. Densidade Energética

A densidade energética é a quantidade de energia por unidade de volume de biomassa (RENDEIRO, 2008; RODRIGUES, 2009; PINHEIRO et al, 2012;). Essa informação é importante por permitir a avaliação e comparação do potencial energético de fontes energéticas distintas (RODRIGUES, 2009).

Esse conceito é calculado multiplicando-se a massa específica ou densidade à granel obtido segundo a norma ABNT NBR 6922/1981 com o poder calorífico do combustível. Embora Pinheiro et al (2012) considere o poder calorífico inferior, neste trabalho, de acordo com Protássio et al (2011), será adotado o poder calorífico superior da amostra obtido a partir de um calorímetro.

$$DE_n = PCS_{B.S.} \cdot D_{gra} \quad (2.5)$$

onde, DE_n é a densidade energética [kcal/m³] e D_{gra} é a densidade à granel [kg/m³].

A densidade à granel, por sua vez, é calculada de acordo com a norma ABNT NBR 6922/1981 e pela fórmula apresentada na Eq.(2.6). Utiliza-se uma caixa de volume interno conhecido. Com uma balança define-se a massa da caixa vazia. Posteriormente, coloca-se amostra suficiente para ocupar todo o volume interno da caixa e mensura-se a massa da caixa cheia de amostra.

$$D_{gra} = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (2.6)$$

onde, D_{gra} é a densidade à granel [kg/m³], M_1 é a massa da caixa vazia [kg], M_2 é a massa da caixa cheia de amostra [kg] e V é o volume interno da caixa [m³].

2.3. Tratamentos de Biomassa

A biomassa *in natura* como combustível possui baixa eficiência energética, pois se trata de um combustível heterogêneo de baixa qualidade, devido algumas características gerais que dificultam o seu uso direto, como por exemplo: o alto teor de umidade, o baixo poder calorífico, a granulometria irregular e o baixo teor de carbono fixo associado ao alto teor de matérias voláteis. Assim, na maioria dos casos, é necessária a utilização de processos industriais com o intuito de melhorar e padronizar essas propriedades energéticas (RODRIGUES, 2009; GONÇALVES, 2010; VILAS BOAS, 2011; SOBRINHO et al, 2012).

Fonseca Felfi (2003) comenta que embora a maior parte da lenha consumida provenha de florestas plantadas, o seu aproveitamento como combustível ainda não é eficiente, pois são desperdiçados muitos resíduos florestais, e quando a lenha chega ao consumidor ainda possui alto teor de umidade e nenhum padrão energético estabelecido, causando perdas econômicas tanto para o produtor quanto para o consumidor. Por outro lado, a transformação da lenha em outros combustíveis mais “nobres” limita-se praticamente à produção de carvão vegetal, provando que o mercado se encontre praticamente “monopolizado” por apenas dois produtos: lenha e carvão. A eventual disponibilidade de outros biocombustíveis tornaria o mercado mais competitivo e dinâmico, promovendo melhorias na qualidade das ofertas e consequentemente obrigando o segmento produtivo a modernizar-se para aproveitar de forma mais racional as fontes energéticas disponíveis.

Existe uma grande quantidade de tecnologias para os processos de conversão da biomassa em energia, que incluem desde a simples combustão para obtenção da energia térmica até processos físico-químicos e bioquímicos complexos para a obtenção de combustíveis líquidos e gasosos e outros produtos (MME, 2007). Alguns dos processos de conversão de biomassa estão listados na Fig. 2.3.

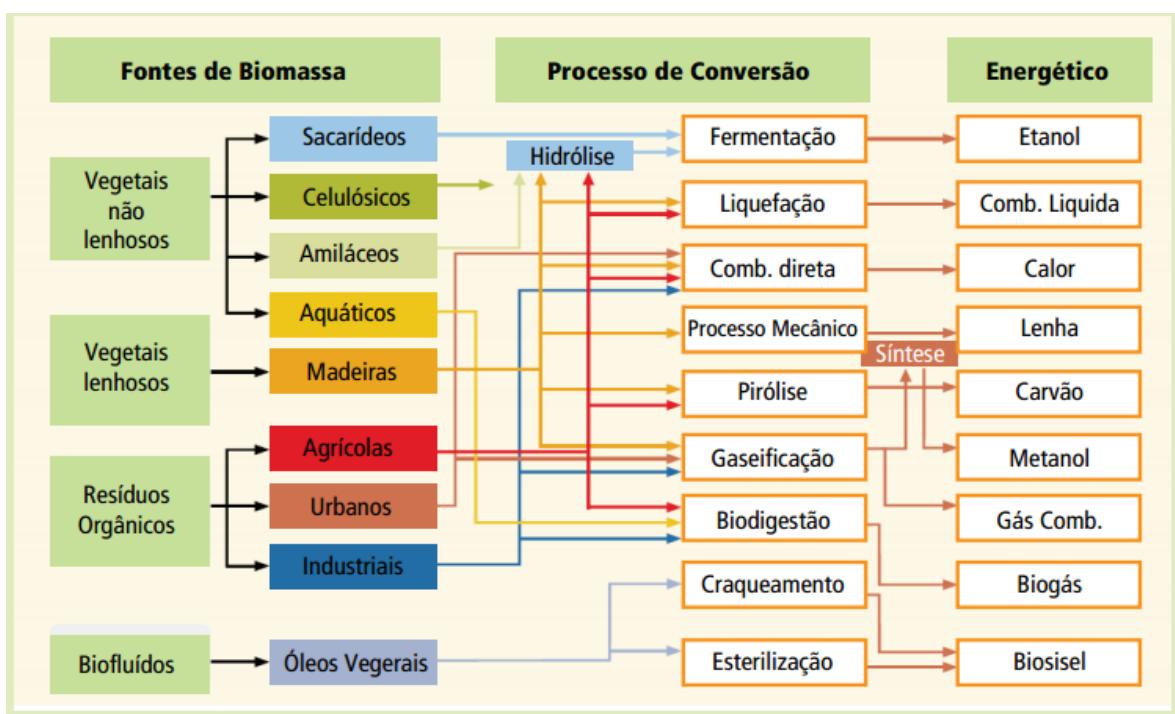


Figura 2.3 - Cadeia da bioenergia. (Fonte: MME, 2007).

Como fonte energética, a biomassa pode ser utilizada tanto na combustão direta como na gasificação. Para que seu uso seja eficaz, exige-se algum processo de limpeza, para remoção de resíduos, terra, areia, entre outros, e, posteriormente, por um tratamento termomecânico tal como: secagem, torrefação, carbonização, trituração ou compactação (briquetes ou péletes) (RENDEIRO, 2008).

Na sequência são apresentados alguns procedimentos para tratamento de biomassa.

2.3.1. Secagem

A proposta deste tratamento térmico é a remoção da água contida na biomassa ou a redução da impureza denominada umidade e como consequência o aumento do poder calorífico do combustível.

Durante a secagem é necessário fornecer calor para evaporar a umidade do material e também deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor d'água, formado a partir da superfície do material a ser seco. Em consequência da quantidade e variedade de produtos a serem secos, existem diversos equipamentos comerciais disponíveis para tal prática (PARK et al, 2007).

Segundo Lippel (2012b), a secagem de biomassa (bagaço de cana, casca de madeira, cavacos, serragem, maravalha e outros tipos) serve como um estágio preliminar da briquetagem, gaseificação. Ressalta-se ainda que este processo reduz os custos de transporte e estocagem e cria condições ideais para queima direta ou para obter

briquetes (biomassa compactada) de alta qualidade. A secagem também garante a redução de emissões durante a combustão e minimiza o consumo de biomassa nas fornalhas.

Quando a biomassa é utilizada para geração de energia, a umidade influencia negativamente na quantidade de calor liberado durante a queima, diminuindo a eficiência energética. Durante a queima da biomassa, parte da energia liberada é utilizada para evaporar a água relativa ao teor de umidade, diminuindo o poder calorífico superior (FARINHAQUE, 1981; LIMA et al, 2008; RODRIGUES, 2009; SOUZA et al, 2012).

Lima et al (2008) avaliaram a variação do poder calorífico superior em função da umidade na madeira (*Eucalyptus benthamii* de sete anos) utilizando-se um calorímetro (IKA, modelo 5000), conforme a norma ABNT NBR 8633/1984. E concluíram que o poder calorífico da madeira é inversamente proporcional ao seu teor de umidade no momento da queima. Quando se utiliza a secagem da madeira no campo, o poder calorífico do eucalipto *Benthamii* varia de 3358,889 kcal/kg a 3713,819 kcal/kg (14063 kJ/kg a 15549 kJ/kg). Sendo que a partir de 60% de umidade, não ocorre combustão da madeira devido à elevada quantidade de água presente.

2.3.2. Compactação ou Briquetagem de Biomassa

A briquetagem consiste em um processo mecânico de compactação ou densificação de pequenas partículas de material sólido, no qual, a pressão de compactação adotada e as temperaturas geradas têm influência direta nas propriedades do briquete produzido.

Filippetto (2008) define esse processo como a aplicação de certa pressão, com ou sem a presença de um agente aglutinante, em uma massa de partículas dispersas com objetivo de torná-las um sólido geométrico compacto de alta densidade. O aumento de temperatura durante a briquetagem ocorre devido ao atrito e pressões envolvidas.

Alguns fatores podem afetar este processo, como, por exemplo, o tamanho das partículas, a pressão e temperatura de briquetagem e umidade das partículas (FILIPPETTO, 2008; VILAS BOAS, 2011).

É notável que o reaproveitamento energético de resíduos vegetais gerados a partir de várias atividades agroindustriais 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 (FILIPPETTO, 2008).

Segundo Rendeiro (2008) a briquetagem é a forma eficiente de concentrar energia disponível na biomassa, levando-se em consideração a densidade a granel e o poder

calorífico obtido após o processo de briquetagem, ou seja, a densidade energética. Da compactação de resíduos de base lignocelulósicas, obtém-se briquetes com qualidade superior a qualquer espécie de lenha, com 2 a 5 vezes mais densidade energética. Também conhecida como densificação, esta é realizada a elevadas pressões e temperatura, e provoca a plastificação da lignina que atua como elemento aglomerante das partículas.

Como combustível, o briquete pode ser usado diretamente em caldeiras e queimadores industriais e fornos, com uma variedade de aplicações tanto industrial como doméstico. Ainda, segundo Rendeiro (2008), as características termofísicas típicas dos briquetes de biomassa são em média: poder calorífico superior em torno de 19,2MJ/kg, umidade de 12%, carbono fixo de 14%, materiais voláteis de 84%, cinzas de 2% e densidade de 1200 kg/m³.

Rendeiro (2008) e Vilas Boas (2011) comentam sobre as vantagens da utilização de briquetes, que podem ser aplicados diretamente em cadeiras, lareiras, padarias, pizzarias, cerâmicas, entre outros, sem que seja necessária nenhuma adaptação na fornalha. Estes são produzidos em tamanhos padrões, no formato de cilindros ou bolachas. São fornecidos em embalagens padronizadas com alta densidade energética. Trata-se de um produto higiênico, de espaço de armazenagem reduzido o que permite a manutenção de estoques reguladores e de emergência. Ressalta-se a maior facilidade de manipulação, transporte e armazenamento, quando comparado, por exemplo, a madeira. No processo de combustão, um produto de densidade energética padronizada propicia uma regularidade térmica na fornalha.

As desvantagens associadas a este processo se referem ao investimento em equipamentos e energia despendida na briquetagem. Quanto ao briquete, deve-se minimizar a tendência dos mesmos se desmancharem quando expostos à agua ou submetidos à alta umidade. A briquetagem com mesclas de componentes com granulometria desigual resulta em diferenças no poder calorífico, assim o ideal é o uso de granulometrias e matérias-primas semelhantes. Outra desvantagem se refere à separação de partículas e limpeza de impurezas (por exemplo: terra e areia). Estas impurezas quando presentes nos briquetes podem danificar e diminuir a eficiência de fornos e caldeiras. Por fim, pode-se citar a carga tributária incidente na venda do produto e nos equipamentos utilizados (BHATTACHARYA, 2004; SILVA, 2007; VILAS BOAS, 2011).

Características como a massa específica e o teor de umidade são importantes para a qualidade de briquetes. A massa específica tem influencia na combustibilidade do briquete, quanto maior a massa específica, maior será tal propriedade. O teor de umidade tem influencia no poder calorífico dos briquetes, pois quanto mais úmido, mais energia da combustão será gasta para o aquecimento e evaporação da água presente no material.

Portanto, a origem da biomassa tem forte influência nas propriedades físicas e mecânicas dos briquetes (LIMA et al, 2008; BRAND et al, 2009), enquanto que a pressão de compactação somente influencia na densidade dos mesmos.

A compactação de resíduos lignocelulósicos se apresenta como uma alternativa de otimização para o uso destes, pois, por meio do processo de briquetagem, o armazenamento e transporte deste tipo de material ficam facilitados, além de ser uma nova alternativa de renda (VALIN et al, 2010).

Silva et al (2012) avaliaram a influência da granulometria de briquetes produzidos a partir de dois rejeitos de arborização urbana, *Ceasalpinea pluviosa* (Sibipiruna) e *Handroanthus impetiginosus* (Ipê Roxo), por meio de ensaios de expansão e tensão máxima suportada, sendo também realizadas descrições da estrutura físico química dos materiais. Concluindo que a granulometria do material tem forte influencia na expansão dos briquetes, fato esse de importância na armazenagem e no transporte destes devido ao menor volume de material estocado. Nenhuma influencia foi notada no que diz respeito à tensão das duas espécies analisadas. Já em relação à densidade a granel, conclui-se que quanto menor a granulometria da biomassa maior densidade do produto compactado. Os teores de voláteis (Sibipiruna: 93,3% e Ipê Roxo: 94,3%) e cinzas (Sibipiruna: 2,4% e Ipê Roxo: 2,9%) se apresentaram na faixa de algumas espécies arbóreas, entretanto o teor de carbono fixo (Sibipiruna: 4,3% e Ipê Roxo: 2,8%) apresentou se menor que o esperado.

Em relação às tecnologias de compactação, Silva (2007) e Filippetto (2008) e Gonçalves (2010) citam os equipamentos referenciados por Bhattacharya et al (1989) empregados na compactação de biomassa:

Prensas de pistão mecânico: a matéria-prima é alimentada e compactada em uma matriz por meio de um pistão que se movimenta alternadamente (Fig. 2.4a).

Prensas 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 (Fig. 2.4b).

Prensas de rolo: a matéria-prima é direcionada contra um par de rolos que giram em sentidos opostos. O material é comprimido no espaço entre os rolos produzindo um briquete na forma de uma pequena almofada (Fig. 2.4c).

Prensas peletizadoras: consiste em um rolo que gira contra uma matriz dotada de vários furos de pequeno diâmetro. A matéria prima é colocada entre o rolo e a matriz e a passagem do rolo provoca a extrusão do material através dos furos. O produto extrudado é denominado de pellet (e não briquete) devido ao pequeno diâmetro (Fig. 2.4d).

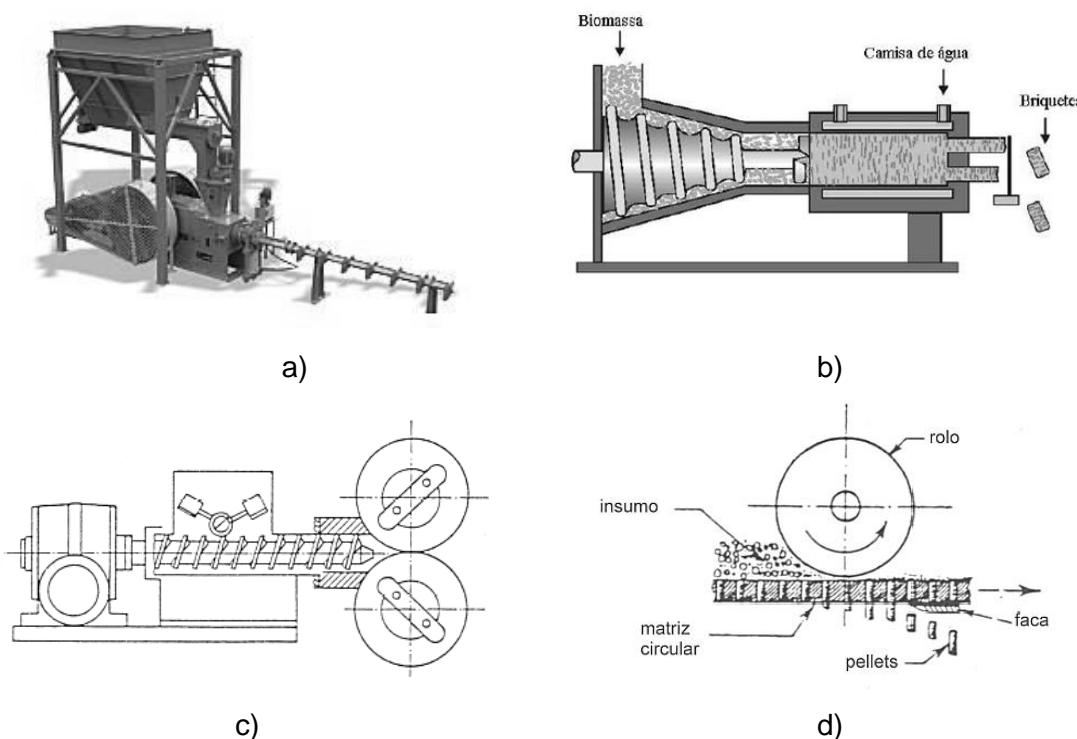


Figura 2.4 - Equipamentos para compactação de biomassa. a) Prensa de pistão mecânico (Fonte: LIPPEL, 2012a), b) Prensa de parafuso cônicos, c) Prensa de rolo e d) Peletizadora (Fonte: BHATTACHARYA et al, 1989)

2.3.3. Torrefação

Uma opção para expandir o uso de briquetes como fonte energética consiste na sua “valorização energética” através de um processo chamado Torrefação. Este processo não necessita de grandes investimentos e pode ser viável para pequenos produtores. Tal prática agrupa novas propriedades ao briquete, motivando ainda mais seu uso doméstico, comercial e industrial (FONSECA FELFI, 2003).

A torrefação é um processo de conversão termoquímico ou um processo de pré-carbonização que se caracteriza pelas temperaturas relativamente baixas (de 200°C a 300°C) e pelas reações ocorridas essencialmente na fase endotérmica da pirólise (BERGMAN et al, 2004; RENDEIRO, 2008; RODRIGUES, 2009; VILAS BOAS, 2011). Nestas condições, a hemicelulose é degradada, sendo removida a umidade, o ácido acético, frações de fenol e outros compostos de baixo poder calorífico (RENDEIRO, 2008). Este tratamento térmico caracteriza-se pela ausência parcial ou completa de agentes oxidantes (ar) e garante a padronização e o aumento das qualidades energéticas da biomassa, mantendo em média, 90% do conteúdo energético e 70% da massa iniciais (RODRIGUES, 2009). O processo de torrefação resulta em um material que apresenta características

intermediárias entre o carvão vegetal e a biomassa seca (FONSECA FELFI, 2003; RENDEIRO, 2008; RODRIGUES, 2009).

Já para o autor Fonseca Felfi (2003), a retificação ou a torrefação é uma alternativa para aproveitar eficientemente a lenha. Este processo consiste em tratá-la termicamente, entre 230 e 300°C, para diminuir o teor de umidade e voláteis, e aumentar o poder calorífico.

Além de melhorar as características energéticas da biomassa, a torrefação, bem como a carbonização são capazes de produzir vários tipos diferentes de combustíveis em função dos parâmetros de operação, ou seja, para cada combinação de temperatura e tempo de residência, podem-se obter produtos de diferentes propriedades (FONSECA FELFI, 2003; RENDEIRO, 2008).

O rendimento de conversão em um processo de torrefação, também chamado de rendimento em massa ou gravimétrico, varia entre 60 e 80% em função das condições de tempo e temperatura em que se realiza o processo (FONSECA FELFI, 2003).

O objetivo principal da torrefação é concentrar a energia da biomassa em um produto formado em curto tempo, baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas, permitindo reter os materiais voláteis de maior poder calorífico no próprio produto. As propriedades físicas e químicas da biomassa torrada variam com o incremento da temperatura. Por exemplo, ao aumentar a temperatura do processo, a biomassa se torna mais friável e menos higroscópica. A densidade energética e os teores de carbono fixo aumentam com o aumento da temperatura e do tempo do processo de torrefação. O rendimento energético do processo decresce com o aumento da temperatura e o poder calorífico inferior aumenta (RENDEIRO, 2008).

A madeira torrada, por exemplo, possui propriedades que não são identificadas na madeira comum, tais como: impermeabilidade e resistência a pragas.

Resultados da torrefação de várias espécies de madeira demonstram que o poder calorífico inferior da madeira torrada depende do teor final de voláteis e cinzas, variando entre 22 e 23 MJ/ kg. A torrefação também pode ser aplicada a briquetes de resíduos de madeira ou agroindustriais como casca de arroz, café, bagaço e outros. Experimentos de torrefação realizados com briquetes de resíduos de madeira demonstram a factibilidade deste procedimento para melhorar as características dos briquetes de biomassa. Entre as características dos briquetes torrados, citam-se: a baixa umidade (de 2% a 6%) e a pouca diminuição da resistência mecânica, fatores importantes na conservação dos briquetes durante a armazenagem. A torrefação, em termos de rendimento energético, apresenta vantagens com relação à carbonização, pois a biomassa torrada possui em torno de 80% da energia inicial, enquanto que o carvão possui apenas 50% (RENDEIRO, 2008). O fator que diferencia a torrefação da carbonização é o caráter endotérmico das reações globais que

ocorrem na biomassa. Na carbonização a reações atingem fases exotérmicas, dando origem ao carvão vegetal (RODRIGUES, 2009).

Rodrigues (2009) argumenta que todas as propriedades da madeira sofrem alterações graduais de acordo com o aumento da temperatura. As principais alterações ocorridas pela torrefação são o aumento da estabilidade dimensional, aumento da resistência a ataques de organismos xilófagos (bactérias e fungos), diminuição da higroscopicidade (absorção de umidade do ar) e a diminuição das propriedades mecânicas. O aumento da estabilidade dimensional, da durabilidade biológica e da diminuição da higroscopicidade é interessante para a construção civil, embora a diminuição das propriedades mecânicas impeça o uso da madeira torrificada em funções estruturais. Já para uso energético a diminuição da higroscopicidade, garante melhores desempenhos na geração de energia térmica, pois não há gasto energético para evaporação da água, além da desprezível absorção de umidade do ar, o que permite o armazenamento do combustível por períodos longos e transporte do mesmo em condições climáticas adversas.

De forma global, a degradação térmica da biomassa é endotérmica até o fim da torrefação e conforme o tempo de residência e temperatura o processo passa a ser exotérmico. Em cada etapa da degradação há a formação de subprodutos conforme demonstrado na Tab.2.1 (RODRIGUES, 2009).

Tabela 2.1 - Fases da degradação térmica da biomassa (Fonte: RODRIGUES, 2009).

FASE	TEMPERATURA (°C)	PRODUTOS
I (endotérmica)	Até 200	Água (Secagem)
II (endotérmica)	200 a 270-280	Água e ácido acético
III (exotérmica)	280 a 350-380	Carvão, ácido acético, metanol e alcatrão leve.
IV (exotérmica)	380 a 500	Carvão e alcatrão
V (exotérmica)	Acima de 500	Degradação do carvão

Experimentos realizados com madeira de *Eucalyptus grandis* demonstraram que a torrefação é um tratamento eficaz para o condicionamento energético da madeira (RODRIGUES, 2009). A madeira após seca em estufa com circulação e renovação de ar foi submetida termicamente a três tratamentos, T2(220°C), T3(250°C) e T4(280°C), com taxa de aquecimento de 3º C/min comum a todos os ensaios, e comparada à testemunha (*in natura*). Os corpos-de-prova, com aproximadamente 54 gramas cada, passaram por aquecimento constante até a temperatura final pré-estabelecida, permanecendo neste patamar por 60 minutos. A biomassa tratada termicamente foi analisada em termos de

densidade energética, poder calorífico, densidade aparente, análise imediata e resistência mecânica à compressão paralela às fibras. Após o tratamento térmico, verificou-se que T2 não causou mudanças expressivas na madeira. T3, por sua vez, produziu modificações importantes nas propriedades analisadas. A densidade energética, o rendimento energético e o poder calorífico superior aumentaram quando comparado ao produto *in natura*. Houve uma melhor relação entre a diminuição da densidade aparente (ocasionada principalmente pela perda de massa) e o aumento do poder calorífico superior. T4 causou mudanças mais significativas nos parâmetros analisados, proporcionando ao poder calorífico um aumento percentual de 15,74%. No entanto, considerando que T3 produziu um combustível lignocelulósico com melhores propriedades energéticas, em menos tempo e com menor dispêndio energético, o autor afirma que T3 seria o tratamento térmico mais eficaz dentre os analisados. Ainda em relação ao poder calorífico, o autor comenta que obteve aumentos percentuais de 3,93% e 9,56% para os tratamentos T2 e T3, respectivamente.

Fonseca Felfli (1999) estudou a torrefação como tratamento alternativo para o aproveitamento eficiente da lenha e dos resíduos de biomassa. Para tanto, desenvolveu-se uma unidade de torrefação em nível de bancada, onde foram realizados testes de torrefação com briquetes de resíduos de madeira de cedrinho. Os ensaios de torrefação foram realizados com temperaturas de 220°C, 250°C e 270°C e tempos de residência de 0,5; 1,0 e 1,5 horas. Após o tratamento térmico, as amostras foram submetidas à análise imediata, análise elementar e a testes no calorímetro para definição do poder calorífico superior. O autor verificou que, conforme o aumento da temperatura e o tempo de residência, o rendimento gravimétrico diminuiu de 94% a 43%. Por outro lado, o rendimento energético dos briquetes aumentou, variando de 50% a 96%. De uma forma geral, os briquetes apresentaram características favoráveis para aplicações energéticas, destacando-se os altos rendimentos energéticos, a baixa umidade de equilíbrio, o caráter hidrofóbico e um aumento no poder calorífico em aproximadamente 15%.

2.3.4. Carbonização

Carvão vegetal é o termo genérico do produto sólido obtido a partir da carbonização da biomassa, este possui basicamente duas funções na siderurgia, reduzir óxidos agregados ao minério de ferro e fornecer energia ao alto-forno; tais características fazem com que o carvão vegetal seja conhecido como um termo-redutor.

A carbonização de biomassa é o processo de pirólise lenta de maior aplicação para a produção de carvão vegetal com o intuito de gerar energia. Para Pinheiro et al (2006) é um processo de aquecimento entre 450°C e 550°C em ambiente fechado, com pequena quantidade ou exclusão total de ar e durante o qual são liberados gases, vapores de água e

líquidos orgânicos, permanecendo como resíduos sólidos, principalmente o alcatrão e o carvão vegetal.

A carbonização é explicada por Sampaio e Mello (2001), como processo de transformação da biomassa em uma fração sólida rica em carbono – o carvão vegetal - é uma fração gasosa composta por vapores e gases. Parte da fração gasosa, por sua vez, pode ser condensada, permitindo a obtenção do chamado líquido pirolenhoso, constituído por água e compostos químicos como os ácidos acético e fórmico, o éter, o álcool metílico e etílico, a acetona, o alcatrão dentre outros e a outra parte resulta em gases não condensáveis e inflamáveis como CO, H₂, CH₄ e C₂H₆.

Desta forma, Sampaio e Mello (2001) identifica os elementos apresentados na Fig. 2.5 como os produtos oriundos da carbonização em base seca. No entanto, na grande maioria dos ciclos de produção reais há ainda a formação de tijó, ou seja, madeira carbonizada que não se transformou em carvão.

Produtos da Carbonização	% Base Seca
Carvão (80% Carbono Fixo)	33,0
Ácido Pirolenhoso (Ácido Acético)	35,5 (5,0)
(Metanol)	(2,0)
(Alcatrão Solúvel)	(5,0)
(Água e outros)	(23,5)
Alcatrão Insolúvel	6,5
Gases Não-Condensáveis (GNC)	25,0
(Hidrogênio – 0,63%)	(0,16)
(CO – 34%)	(8,5)
(CO ₂ – 62%)	(15,5)
(Metano – 2,43%)	(0,61)
(Etano – 0,13%)	(0,03)
(Outros – 0,81%)	(0,20)
Total	100,0

Figura 2.5 - Produtos oriundos da carbonização (Fonte: Adaptado de GOMES ; OLIVEIRA, 1980).

De acordo com Figueroa (2009) a degradação térmica da biomassa acontece em intervalos de temperatura: até 200°C ocorre o processo denominado de pirólise lenta, com liberação de vapor d'água e gases, a madeira não se igniza ocorrem reações exotérmicas de oxidação e mudança de cor. Nas temperaturas entre 200 e 280°C tem-se o aumento das reações químicas e eliminação de gases, reações exotérmicas porem sem inflamação, esta fase pode ser denominada a fase de pirólise rápida. Por fim a fase de 280 a 380°C é caracterizada por grandes quantidades de destilados (ácidos acéticos e metanol), nesta fase o resíduo final é o carvão vegetal. Briane e Doat (1985) apresentam em seu trabalho a

influência da temperatura de carbonização na quantidade e qualidade de carvão produzido. Conforme a Fig. 2.6, verifica-se que na faixa de 300°C a 400°C, tem-se carvão com rendimento gravimétrico superior a 40% e carbono fixo superior a 70%, o que é desejável tanto para as empresas produtoras de carvão quanto para o mercado consumidor.

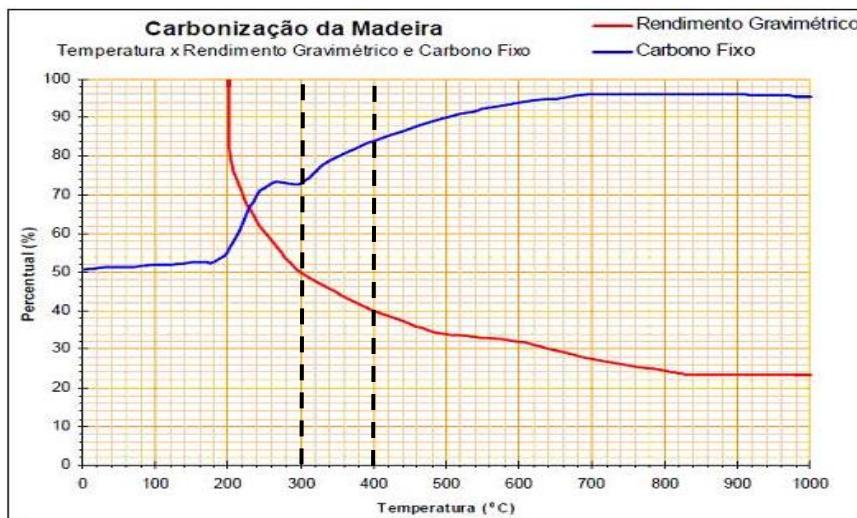


Figura 2.6 - Relação entre temperatura, percentual de carbono fixo e rendimento gravimétrico. (Fonte: *BRIANE; DOAT, 1985*)

A fumaça gerada no processo de carbonização contém vários poluentes que são nocivos ao ser humano e que também contribuem para o efeito estufa (CARDOSO et al, 2010).

Na produção de carvão vegetal existem duas empresas que aproveitam os gases de carbonização: A primeira queima os gases de carbonização de um forno em uma fornalha e direcionam o calor para a carbonização de outro forno (DPC BIOMASSA, 2012). A outra empresa (BRICARBRAS, 2013), queima os gases de carbonização e direcionam o calor para a secagem da madeira. A queima dos gases de carbonização mitigam a emissão de metano para a atmosfera podendo assim serem incluídos nos projetos de mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL).

A carbonização de lenha é praticada de forma tradicional em fornos de alvenaria com ciclos de aquecimento e resfriamento que duram vários dias. Tal método de produção data de três mil anos atrás, sendo que o processo consome parte da madeira como combustível a fim de fornecer a energia necessária para o início da carbonização no interior do forno. Dentre as diversas configurações de fornos, os retangulares, equipados com sistemas de condensação de vapores e recuperadores de alcatrão, são os de maior uso atualmente no país.

Na prática, a produção de carvão vegetal envolve o uso de diferentes fornos, alguns totalmente rústicos (fornos meia laranja) e outros mecanizados (fornos retangulares de alvenaria). Citam-se ainda os fornos metálicos (cilíndricos verticais e container), nos quais os gases de carbonização são queimados e reutilizados para a secagem da madeira.

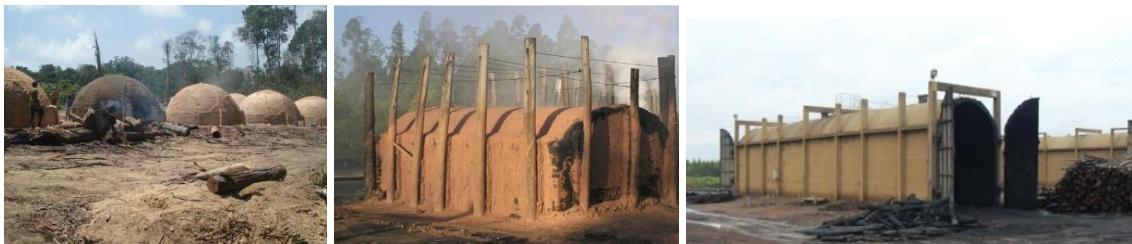


Figura 2.7 - Fornos de alvenaria: meia laranja, retangular (Fonte: AMODEI, 2008) e RAC220, respectivamente.

Os fornos meia laranja alcançam medidas de diâmetro na base entre 2,90 e 3,80m e aproximadamente 2,30 m de altura máxima (PINHEIRO et. al., 2006). O forno retangular de superfície com chaminé tem dimensões de 6m x 3 m x 2,85m (AMODEI, 2008). O forno RAC 220 tem as seguintes dimensões: 26 m x 4,0 m x 4,23 m.



Figura 2.8 - Fornos metálicos: cilíndricos verticais (Fonte: COLOMBO et al, 2006) e container (Fonte: DPC BIOMASSA, 2012), respectivamente.

O forno metálico cilíndrico tem diâmetro da base de 1m e altura de 1,6m (COLOMBO et al, 2006). O forno containers tem um volume interno disponível de 20,2m³ (DPC BIOMASSA, 2012). Nestes fornos existe o aproveitamento dos gases de carbonização.

O rendimento gravimétrico médio dos fornos atuais, ou seja, relação entre a massa de carvão vegetal produzido e massa de madeira enfornada (ambos em base seca), é de aproximadamente 30%. No entanto, estudos científicos (BARCELLO, 2002; REZENDE, 2007; SANTOS, 2007; FIGUEIREDO, 2009; OLIVEIRA, 2009) mostram que é possível aprimorar o processo de produção de forma a alcançar rendimentos superiores a 40%.

Basicamente, o baixo rendimento gravimétrico está relacionando a pouca tecnologia utilizada neste setor.

Segundo o MME (2012), o poder calorífico inferior do carvão vegetal, da lenha comercial e do bagaço de cana é de 6460, 3100 e 2130 kcal/kg, respectivamente.

2.4. Objetivos e Contribuição Científica deste Trabalho

Por meio de uma parceria entre Universidade e Empresa, este trabalho teve como objetivo analisar e definir o potencial energético de briquetes de capim braquiária produzidos pela empresa BRIQFENO Indústria e Comércio de Feno LTDA, sediada na cidade de Tupaciguara, Minas Gerais. Ressalta-se que a empresa recebe a biomassa de fazendas próximas ao município.

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU e consistiram em realizar a análise imediata, definir a relação entre poder calorífico e umidade do produto padrão e, por fim, aplicar o processo de torrefação nos briquetes de braquiária como alternativa para a valorização energética do produto.

Os experimentos foram baseados em normas internacionais e nacionais relacionadas ao tema proposto, conforme apresentado na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 - Normas Internacionais e Nacionais

Umidade	Materiais Voláteis	Cinzas	Carbono Fixo	Poder Calorífico
E871-82	E872-82	E1755-01	E870-82	E711-87
NBR 8112/1986	NBR 8112/1986	NBR 8112/1986	NBR 8112/1986	NBR 8633/1984
ISO 589	ISO 562	ISO 1171	-	ISO 1928
DIN 52183	DIN 51720	DIN 51719	-	DIN 51900

Devido à ausência de normas específicas para briquetes, a metodologia experimental neste trabalho foi conduzida a partir de normas nacionais destinadas à análise de carvão vegetal: ABNT NBR 8633/1984, NBR 8112/1986, NBR 6923/1981 e NBR 6922/1981.

A contribuição científica deste trabalho consistiu em analisar o potencial energético do produto padrão e identificar se a torrefação era capaz de aprimorar suas propriedades

energéticas, reduzir a absorção de umidade e padronizar seu poder calorífico. No caso específico da torrefação, propôs-se definir uma metodologia (tempo de aquecimento e temperatura) e quantificar o gasto energético no processo, de forma a verificar a viabilidade energética e sustentável do tratamento térmico imposto ao produto.

Ressalta-se que o produto padrão ainda não tem boa receptividade por parte de empresas. Estas questionam a viabilidade econômica e energética deste tipo específico de briquete. Assim, por meio deste trabalho, espera-se definir propriedades energéticas e metodologias que possam efetivamente comprovar a viabilidade econômica, energética e sustentável deste tipo de briquete para uso residencial, comercial e industrial.

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Devido à ausência de normas específicas para briquetes, os procedimentos experimentais foram conduzidos conforme as seguintes normas: ABNT NBR 8633/1984, NBR 8112/1986, NBR 6923/1981 e NBR 6922/1981 (RENDEIRO, 2008; RODRIGUES, 2009; PINCELLI, 2011; VILAS BOAS, 2011; SOUZA et al, 2012).

3.2. O Briquete de Capim Braquiária

Segundo Rocha et al (2009), a cultura do capim braquiária (*Brachiaria ssp.*) tolera regiões com baixo índice pluviométrico (<800 mm), devido ao seu sistema radicular profundo e, ainda, solos com menor fertilidade. O bom desempenho das várias espécies de braquiária deve-se à sua adequação em todos os tipos de solos. O manejo inadequado de suas pastagens nas regiões de Cerrado pode ocasionar diminuição da cobertura superficial e, com isso, empobrecimento do solo e queda de produção. O capim braquiária é mais tolerante a climas secos do que o capim elefante e produz sementes de valor comercial – sementes vendidas para produção de pasto para bovinos. Ressalta-se que o capim braquiária apresenta em sua produção grande quantidade de biomassa vegetal, de considerável valor energético.

Por exemplo, a *Brachiaria brizantha* é uma das espécies de capim braquiária mais comuns no Brasil. Segundo Silva e Ferrari (2012), essa espécie é representante da família Poaceae e é caracterizada por ser uma gramínea perene, de caule subterrâneo do tipo rizoma, planta cespitosa, apresentando folhas com lâminas lineares lanceoladas, pilosas na face ventral e glabras na face dorsal, apresentando pelos na porção apical dos entrenós e bainhas, a porção laminar são largas e longas, com pubescência somente na face interior.

Neste trabalho, a palha de capim braquiária (*Brachiaria ssp.*) é oriunda de fazendas localizadas próximas ao município de Tupaciguara - MG. O capim é considerado um resíduo agrícola, normalmente descartado por meio de uma prática primitiva da agricultura denominada queimada, que gera poluição atmosférica e aumento do efeito estufa.

A partir de uma prática sustentável a empresa Briqfeno - Indústria e Comércio de Feno Ltda, sediada em Tupaciguara, coleta a palha e a estoca em seus pátios. Na empresa, a biomassa sofre um processo mecânico de compactação denominado briquetagem, que a transforma em cilindros com 95 mm de diâmetro e 400 mm de comprimento. O briquete é posteriormente embalado em sacos com aproximadamente 50 kg, contendo 10 amostras cada, para ser finalmente comercializado.

3.3. Preparação das Amostras

Na empresa foram amostrados aleatoriamente, em lotes de produção, 30 amostras de briquetes de palha de capim braquiária que foram levados ao Laboratório de Transferência de Calor da Universidade Federal de Uberlândia (LTCM/FEMEC/UFU).

A amostragem e preparação das amostras seguiram procedimentos definidos na norma ABNT NBR 6923/1981. Neste caso, os equipamentos utilizados foram:

- Chapa de aço com diâmetro de 1 metro, base para a Trituração da amostra;
- Pilão de aço para triturar a amostra;
- Pá para esquartejamento e recolhimento da amostra;
- Peneiras com malhas de aço para padronização das partículas.



Figura 3.1 - Preparação das amostras

Verifica-se na Figura 3.1 que o briquete foi triturado até que ficou fino o suficiente para ser peneirado. Após a trituração, o briquete foi então esquartejado com o auxilio de uma pá e recolhido. Posteriormente, o produto foi padronizado com o uso de peneiras com malhas de 1,41 mm, 0,210 mm e 0,150 mm (Fig. 3.1b). Finalmente as amostras foram armazenadas em sacos plásticos do tipo *bag* para evitar a contaminação das mesmas (Fig. 3.2).



Figura 3.2 - 1: briquete; 2: amostra triturada; 3: padronização dos grãos; 4: amostras em sacos plásticos para testes experimentais.

Os experimentos foram divididos basicamente em duas partes: a primeira consiste na caracterização do produto padrão e a segunda na análise do produto após a valorização energética realizada por meio de um tratamento térmico, no caso, a torrefação.

3.4. Análise Imediata

A análise imediata consistiu na determinação dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo do briquete conforme a norma ABNT NBR 8112/1986.

Os materiais e equipamentos necessários para a realização da análise imediata do briquete, de acordo com a norma, foram:

- Peneiras com malhas de 19; 0,210 e 0,150mm.
- Balança com capacidade para 1,0kg e precisão de 1%;
- Balança analítica com precisão de 0,1mg;
- Chapa de aço para triturar as amostras;
- Cadiño com tampa com capacidade de 25 cm³;
- Estufa capaz de atingir 110°C;
- Mufla capaz de atingir 1000°C;
- Dessecador para armazenar as amostras e evitar umidade.

A Figura 3.3 apresenta os materiais e equipamentos aplicados na análise imediata das amostras. Tais equipamentos estão alocados no LTCM e foram adquiridos a partir de projetos de pesquisa em parceria com o CNPq.



a) Balanças



b) Dessecador, luva e pinça.



c) Estufa (à esquerda) e mufla (à direita)

d) Amostras no interior da estufa:
testes envolvendo teor de umidadee) Mufla aquecida para determinação
do teor de cinzasf) Mufla aquecida para determinação
do teor de voláteisg) Cadiños com amostra após o teste
do teor de cinzash) Cadiño com amostra após o teste
do teor de voláteis

Figura 3.3 - Materiais e equipamentos para análise imediata

3.4.1. Determinação do Teor de Umidade em Base Úmida

De acordo com a norma ABNT NBR 8112/1986, para determinar o teor de umidade em base úmida, deve-se realizar o seguinte procedimento: com uma balança de precisão, define-se a massa de um pote de aço inoxidável. Em seguida coloca-se a amostra de briquete padrão triturado com granulometria inferior a 19 mm no pote e define-se a massa do conjunto. Coloca-se o pote com briquete em uma estufa de circulação de ar forçada previamente aquecida à 105°C. O briquete triturado deve permanecer na estufa até que sua massa permaneça constante. Durante a etapa de secagem, o pote de briquete é retirado da estufa e levado à balança para que seja determinada sua massa. Este procedimento é repetido até que a massa de amostra permaneça constante. Finalmente, definida a massa da amostra, retira-se o pote com briquete da estufa deixando-o resfriar em um dessecador.

Assim, segundo a norma o teor de umidade é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$TU_{bu} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100 \quad (3.1)$$

onde, TU_{bu} é o teor de umidade [%], m_0 é a massa inicial da amostra [g] e m_1 a massa final [g].

De acordo com a ABNT NBR 8112/1986 devem ser realizadas duas análises no mínimo para determinar a umidade do briquete. A precisão para os resultados obtidos na determinação da umidade não deve exceder 5%.

3.4.2. Determinação do Teor de Materiais Voláteis

De acordo com a norma ABNT NBR 8112/1986, com uma balança analítica deve-se obter 1,0g de amostra de briquete, isenta de umidade e com granulometria entre 0,150 e 0,210mm. Na sequencia, coloca-se a amostra em um cadiño previamente seco e de massa conhecida. O conjunto deve ser posicionado sobre a porta de uma mufla previamente aquecida a $900 \pm 10^\circ\text{C}$, permanecendo nessa posição durante 3 minutos. Após 3min, o cadiño é inserido no interior da mufla onde permanece por 7 minutos com a porta da mufla fechada. Finalmente, a amostra é retirada da mufla e inserida no dessecador para resfriar. Na sequência, mede-se a massa final do conjunto.

Segundo a norma, o teor de materiais voláteis é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$MV = \frac{m_2 - m_3}{m} \cdot 100 \quad (3.2)$$

onde, MV é o teor de matérias voláteis [%], m_2 é massa inicial do cadiño somada à massa da amostra [g], m_3 é massa final do cadiño somada à amostra [g] e m é massa da amostra [g].

São necessárias duas análises para determinar o teor de voláteis de acordo com a ABNT NBR 8112/1986. A precisão para os resultados não deve exceder 2%.

3.4.3. Determinação do Teor de Cinzas

De acordo com a norma ABNT NBR 8112/1986, para determinar o teor de cinzas, deve-se realizar o seguinte procedimento: com uma balança analítica define-se 1,0g de amostra de briquete, isenta de umidade e com granulometria inferior a 0,210mm. A amostra deve ser colocada em um cadiño sem tampa, previamente seco e com massa conhecida. O cadiño com a amostra de briquete é então inserido em uma mufla previamente aquecida a $700 \pm 10^\circ\text{C}$. Aguarda-se até que o briquete queime totalmente e, finalmente, retira-se a amostra da mufla e coloca-se em um dessecador para esfriar e mede-se a massa final.

Segundo a norma o teor de cinzas é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$CZ = \frac{m_1 - m_0}{m} \cdot 100 \quad (3.3)$$

onde, CZ é o teor de cinzas [%], m_0 é a massa do cadiño [g], m_1 é a massa do cadiño somada aos resíduos [g], m é a massa da amostra [g].

Devem ser realizadas pelo menos duas análises para determinar o teor de cinzas de acordo com a ABNT NBR 8112/1986. A precisão para os resultados obtidos na determinação de cinzas não deve exceder 10%.

3.4.4. Determinação do Teor de Carbono Fijo

Segundo a norma ABNT NBR 8112/1986 o teor de carbono fixo é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad (3.4)$$

onde, CF é o teor de carbono fixo [%], CZ é o teor de cinzas [%] e MV é o teor de matérias voláteis [%].

3.5. Determinação da Densidade à Granel e Densidade Aparente

A densidade à granel (massa específica) foi mensurada segundo a metodologia da norma ABNT NBR 6922/1981. E conforme mencionado no Capítulo II, a densidade à granel é dada pela seguinte fórmula:

$$D_{gra} = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (3.5)$$

onde, D_{gra} é a densidade à granel [kg/m^3], M_1 é a massa da caixa vazia [kg], M_2 é a massa da caixa cheia de amostra [kg], V é o volume interno da caixa [m^3].

Ainda, de acordo com a norma, para a correta interpretação dos resultados da massa específica, devem ser informados o teor de umidade e a análise granulométrica do produto em estudo. A análise granulométrica foi realizada por meio da utilização de peneiras com malhas de 1,41mm e 0,210mm.

Para obter a massa do briquete utilizou-se de uma balança analítica. Já o volume foi calculado com base nas dimensões (comprimento e diâmetro) do briquete mensuradas com um paquímetro. A partir de tais informações calculou-se sua densidade aparente.

3.6. Determinação do Poder Calorífico

O poder calorífico pode ser dividido em:

- Poder Calorífico Superior (PCS);
- Poder Calorífico Inferior (PCI);
- Poder Calorífico Útil (PCU).

O Poder Calorífico Superior (PCS) foi determinado conforme método prescrito na norma ABNT NBR 8633/1984 em uma bomba calorimétrica isoperibólica 25°C IKA-WERNE C2000. De acordo com tal norma, o PCS de uma amostra é obtido pela média de no mínimo duas amostragens realizadas no calorímetro, cuja precisão deve ser de $\pm 20\text{J/g}$ ($\pm 4,777\text{cal/g}$). Ainda segundo a norma, em ensaios repetidos devem ser tolerados as seguintes diferenças máximas entre as determinações do PCS: 120J/g (28,662cal/g) para ensaios executados no mesmo laboratório (repetibilidade) e 300J/g (71,654cal/g) para ensaios executados em laboratórios diferentes (reprodutibilidade). Neste trabalho os ensaios foram realizados em um mesmo laboratório usando a bomba calorimétrica apresentada na Fig. (3.4).

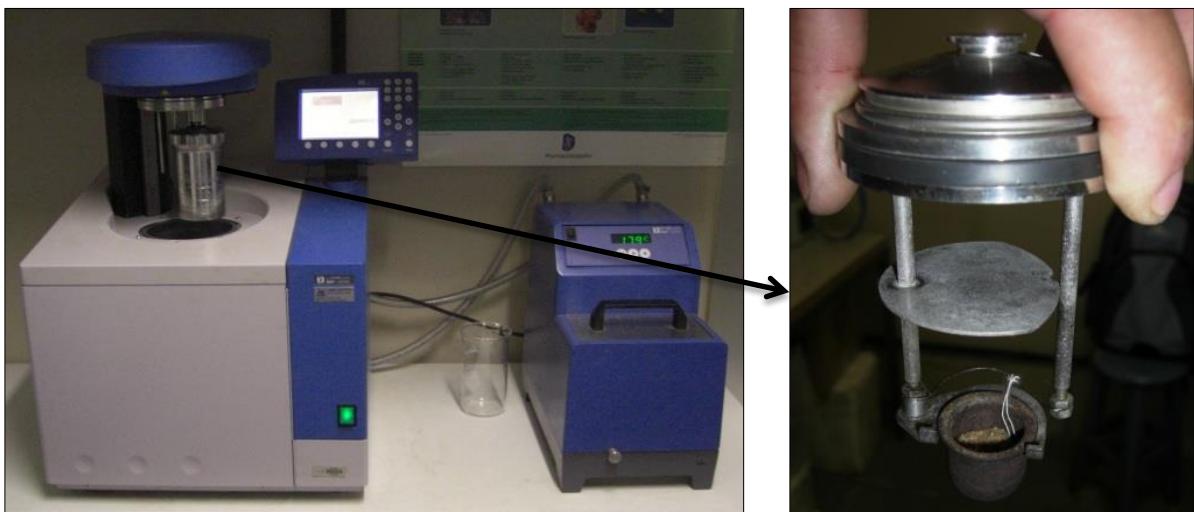


Figura 3.4 - Bomba calorimétrica IKA-WERNE C2000

Devido à inexistência de equipamento que determine o Poder Calorífico Inferior (PCI) e o Poder Calorífico Útil (PCU), estes valores são calculados a partir do PCS. De acordo com o procedimento descrito no Capítulo II, o PCI e o PCU são obtidos conforme as seguintes fórmulas:

$$PCI_{B.S.} = PCS_{B.S.} - h_{lv} \left(9 \cdot \frac{H}{100} \right) \quad (3.6)$$

$$PCU = PCI_{B.U.} = PCI_{B.S.} \left(1 - \frac{TU_{bu}}{100} \right) - h_{lv} \left(\frac{TU_{bu}}{100} \right) \quad (3.7)$$

onde, $PCI_{B.S.}$ é o poder calorífico inferior em base seca – combustível seco [kcal/kg], $PCS_{B.S.}$ é o poder calorífico superior em base seca – combustível seco [kcal/kg], h_{lv} é a entalpia de vaporização da água a 20°C e é igual a 586,16 kcal/kg, H é o percentual médio de hidrogênio presente no material considerado como 5%, PCU é o poder calorífico útil também denominado de $PCI_{B.U.}$ poder calorífico inferior em base úmida – combustível com umidade [kcal/kg] e TU_{bu} é o teor de umidade em base úmida da amostra.

3.7. Densidade Energética

A densidade energética é a quantidade de energia por unidade de volume de biomassa. Segundo a citação no Capítulo II, a densidade energética foi obtida conforme a seguinte fórmula:

$$DE_n = PCS \cdot D_{gra/briquete} \quad (3.8)$$

onde, DE_n é a densidade energética [kcal/m³], PCS é o poder calorífico superior [kcal/kg] e $D_{gra/briquete}$ é a densidade à granel ou densidade briquete [kg/m³].

3.8. Influência do Teor de Umidade no Poder Calorífico Superior do Briquete

Determinado o teor de umidade das amostras de briquete padrão, foram separadas seis amostras secas, de 10g cada, às quais foi acrescida água destilada até obter massas proporcionais a 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60% de umidade. Para o cálculo do teor de umidade em base úmida, utilizou-se novamente a Eq. (3.1). Em seguida, as amostras foram acondicionadas em recipientes hermeticamente fechados e levadas para uma câmara de germinação permanecendo por 14 dias a 18°C, conforme recomendação de Lima et al. (2008), Souza et al (2012) e Silva e Morais (2008).

Tabela 3.1 - Quantidade de água adicionada e umidade desejada

Amostra	Massa de amostra Seca [g]	Água Adicionada [g]	TU_{bu} [%]
Padrão seca	10	-	0,000
1	10	1,174	10,505
2	10	2,508	20,046
3	10	4,290	30,021
4	10	6,668	40,005
5	10	10,168	50,417
6	10	15,001	60,002

Após o período de humectação, determinou-se, para cada amostra, o poder calorífico superior, o poder calorífico inferior e o poder calorífico útil conforme descrito nos procedimentos anteriores. Para análise estatística dos dados foram realizadas cinco repetições para cada amostra. Os resultados são apresentados no Capítulo IV.

3.9. Torrefação de Briquete

Conforme mencionado no Capítulo II, o objetivo da torrefação é valorizar energeticamente o briquete, transformando-a em um produto com características intermediárias entre o carvão vegetal e a biomassa seca. Ou seja, por meio do tratamento

térmico, espera-se aumentar o poder calorífico da biomassa e torná-la menos higroscópica, motivando ainda mais seu uso doméstico, comercial e industrial.

Os ensaios de torrefação dos briquetes foram realizados considerando 35g de amostra de briquete desintegrado e triturado dentro de um cilindro de massa conhecida (Fig. 3.5b). A cada ensaio, o cilindro era posicionado no interior da mufla apresentada na Fig. 3.5a, previamente aquecida a uma determinada temperatura (regime permanente). O cilindro permanecia no interior da mufla por um período de tempo e então era removido e colocado para esfriar em água corrente à temperatura ambiente.

A priori, a temperatura bem como o tempo necessário para a torrefação do produto padrão não são conhecidos. Assim, com base em artigos apresentados no item 2.3.3 do Capítulo II, foram definidos os seguintes níveis de temperatura: 180°C, 200°C, 220°C ou 240°C. Para cada nível de temperatura, foram ajustados os seguintes tempos de aquecimento das amostras: 10min, 20min, 30min ou 40min.

A cada ensaio foi definida a massa inicial e final da amostra, bem como a massa do forno cilíndrico. Durante a etapa de resfriamento do cilindro em água corrente foram tomados os devidos cuidados para que a amostra não entrasse em contato com a água. Ressalta-se que o cilindro possuía uma tampa com rosca de forma a preservar a integridade da amostra em seu interior.



a) Mufla e forno cilíndrico para torrefação



b) Forno cilíndrico para torrefação

Figura 3.5 - Equipamentos para torrefação

A Tabela 3.2 mostra o quadro ilustrativo dos experimentos.

Tabela 3.2 - Quadro ilustrativo dos experimentos

Amostra	Temperatura	Tempo de residência no interior da mufla	Resfriamento da carcaça do forno cilíndrico
Briquete triturado	180°C		
(palha de capim braquiária)	200°C 220°C 240°C	10min; 20min; 30min; 40min	Água corrente à temperatura ambiente (~25°C)

Após a torrefação, as amostras foram rotuladas e armazenadas em uma mufla a 105°C, preservando-as secas para os próximos testes. Na sequência cada amostra foi submetida aos seguintes testes:

- Definição do rendimento gravimétrico;
- Definição da densidade a granel;
- Análise de higroscopicidade.

Finalmente, para o produto menos higroscópico fez-se a análise imediata, o poder calorífico superior e a densidade energética.

3.10. Definição do Rendimento Gravimétrico

O rendimento gravimétrico ou rendimento em massa é a razão entre a massa de briquete após tratamento térmico e a massa de briquete seco padrão antes do tratamento, conforme apresentado na Eq. (3.9):

$$\eta_m = \frac{M_{torr}}{M_{s,padrão}} \cdot 100 \quad (3.9)$$

onde, η_m é o rendimento gravimétrico [%], M_{torr} é a massa torrificada [g] e $M_{s,padrão}$ é a massa padrão seca [g].

3.11. Análise de Higroscopicidade do Briquete Torrificado

Após a torrefação dos briquetes, realizou-se uma análise visual e uma triagem nos produtos torrificados para a realização da análise de higroscopicidade. Basicamente, esperou-se nesta etapa do trabalho encontrar o tempo e a temperatura de torrefação capaz

de gerar um produto menos higroscópico. Nesse sentido, foram selecionados os produtos oriundos dos tratamentos térmicos configurados com nível de temperatura de 240°C e com ajuste de tempos de aquecimento de 10min, 20min e 30min. O produto oriundo do experimento 240°C e 40min não foi considerado por apresentar características similares ao do 240°C e 30min.

Foram separadas amostras de aproximadamente 1,5g para cada ensaio. Estas foram submetidas ao condicionamento higroscópico. Nesta etapa, uma amostra padrão e as demais torrificadas foram colocadas em pequenos frascos abertos de massas conhecidas. Em seguida os frascos foram inseridos no interior de uma câmara úmida, permanecendo por um tempo médio de três dias à temperatura de 18°C e a umidade relativa de 100%.

Durante o condicionamento, por várias vezes, os frascos com palha úmida foram retirados da câmara de condicionamento e levados à balança para obtenção das suas massas. Por meio deste procedimento, notou-se que a absorção de água das amostras permaneceu com uma tendência constante no decorrer do experimento.

Ao final do condicionamento, removeu-se o excesso de umidade sobre os frascos e amostras e, imediatamente, foram realizadas análises na bomba calorimétrica para determinação do poder calorífico superior de forma a verificar o caráter higroscópico das amostras torrificadas. Os resultados obtidos são apresentados no Capítulo IV.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados das diversas análises do briquete de palha de capim braquiária padrão e torrificadas. O objetivo foi avaliar e definir o potencial energético da biomassa como combustível. A seguir são apresentados os resultados conforme a sequência de execução dos experimentos.

4.1. Caracterização do Produto Padrão

Neste estudo propôs-se inicialmente caracterizar o produto padrão por meio da análise imediata, densidade aparente, densidade à granel, poder calorífico e densidade energética. Na sequência os valores obtidos foram comparados à análises similares, realizadas com o produto torrificado. Por fim, foram realizadas comparações entre o potencial energético do briquete de capim braquiária e outros biocombustíveis disponíveis na literatura científica.

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados referentes à análise imediata do briquete de capim braquiária padrão.

Tabela 4.1 – Análise imediata de amostras padrão.

Parâmetro	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação [%]	Repetições
Teor de Umidade: TU [%]	8,827	0,088	0,997	9
Materiais Voláteis: MV [%]	72,802	0,647	0,889	9
Cinzas: CZ [%]	7,588	0,425	5,600	9
Carbono Fixo: CF [%]	19,610	0,736	3,753	9

Verificou-se na Tabela 4.1 que o desvio padrão e o coeficiente de variação indicaram que as análises realizadas foram suficientes para caracterizar o produto padrão. Ressalta-se ainda que as médias apresentadas não excederam os valores estabelecidos na norma ABNT NBR 8112/1986.

Por meio da análise da Tabela 4.2, notou-se que, de forma geral, que os resultados obtidos neste trabalho para a análise imediata foram condizentes com valores disponíveis na literatura científica.

Tabela 4.2 – Análise imediata de amostras padrão e comparações com dados da literatura científica

Parâmetro	Capim braquiária (1)	Capim braquiária (2)	Capim elefante (3)	Casca de arroz (4)	<i>Eucalyptus grandis</i> (5)
Teor de Umidade: TU [%]	8,827	10,41 ±0,34	10,80	9,71	10,4
Materiais Voláteis: MV [%]	72,802	76,51 ±0,43	82,60	68,42	81,9
Cinzas: CZ [%]	7,588	6,61 ±0,34	10,90	15,56	0,98
Carbono Fixo: CF [%]	19,610	16,88 ±0,58	8,40	16,02	16,7

(1) Presente trabalho; (2) LEB/FUPEF/UFPR (2009); (3) Fernandes (2000); (4) Filippetto (2008) e (5) Pincelli (2011).

Neste presente trabalho, as amostras analisadas foram de palha de capim braquiária da região de Tupaciguara - Minas Gerais.

Por meio da análise da Tabela 4.2, verificou-se que o Laboratório de Energia de Biomassa (LEB) da Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná (FUPEF) conveniada à Universidade Federal do Paraná (UFPR) apresentou uma caracterização do briquete de capim braquiária proveniente da região de Curitiba – Paraná.

Analisando os resultados e o desvio padrão apresentado na Tab. 4.1 e comparando-os com os apresentados no Tab. 4.2, verificou-se que os valores medidos no presente trabalho e aqueles definidos pelo LEB/FUPEF/UFPR (2009) são próximos, além disso, ambos se apresentam em conformidade com a norma ABNT NBR 8112/1986. Comparando ainda tais resultados com informações disponíveis na literatura científica, verificou-se que Fernandes (2000), na análise do capim elefante, relata 10,80% de umidade, 82,60% de materiais voláteis, 10,90% de cinzas e 8,40% de teor de carbono fixo. Já Filippetto (2008), na análise imediata da casca de arroz *in natura* (anterior à briquetagem), obteve 9,71%, 68,42%, 16,02% e 15,56% para teor de umidade, teor de materiais voláteis, teor carbono fixo e teor de cinzas, respectivamente. Posteriormente à briquetagem em prensa de parafuso, o autor repetiu a análise imediata e obteve 9,2% para teor de umidade, 66,2% para teor de materiais voláteis, 17,2% para teor de carbono fixo e 16,6% para teor de cinzas. Tais resultados comprovam, segundo o autor, que a briquetagem praticamente não altera a composição da biomassa, mas altera o teor de umidade. O autor afirma ainda que a redução no teor de materiais voláteis é devido ao aquecimento durante a extrusão, consequentemente há um leve aumento do teor de carbono fixo e de cinzas. Finalmente, Pincelli (2011), em seu trabalho com resíduos de *Eucalyptus grandis*, segunda rotação, com 7 anos de idade, obteve 10,4% para teor de umidade, 81,9% para materiais voláteis, 0,98% para cinzas e 16,7% para carbono fixo.

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados referentes ao poder calorífico de amostras padrão de briquete de capim braquiária.

Tabela 4.3 – Poder calorífico de amostras padrão

Parâmetro	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação [%]	Repetições
PCS (B. Seca) [kcal/kg]	4184,167	45,828	1,095	6
PCI (B. Seca) [kcal/kg]	3920,396	-	-	-
PCS (TU: 8,827%) [kcal/kg]	3872,889	13,033	0,336	9
PCU (TU: 8,827%) [kcal/kg]	3522,603	-	-	-

De acordo com a norma ABNT NBR 8633/1984, obteve-se neste trabalho repetibilidade para o poder calorífico superior em base úmida. O mesmo não aconteceu para o poder calorífico superior em base seca. Neste caso, o desvio padrão excedeu o limite previsto na norma que é de 28,662 [kcal/kg].

Conforme apresentado no Capítulo III, o PCS foi definido experimentalmente com uma bomba calorimétrica enquanto que os valores referentes ao PCI e PCU foram calculados conforme as Eqs. (3.6) e (3.7), respectivamente.

A Tabela 4.4 apresenta um comparativo entre o poder calorífico obtido neste trabalho e valores definidos na literatura científica.

Tabela 4.4 – Poder calorífico de amostras padrão e comparações com dados da literatura científica

Parâmetro	Capim braquiária (1)	Capim braquiária (2)	Capim elefante (3)	Casca de arroz (4)	<i>Eucalyptus</i> <i>grandis</i> (5)
PCS (B. Seca) [kcal/kg]	4184,167	4649 ±248	3487	3343,78	4663
PCI (B. Seca) [kcal/kg]	3920,396	4332 ±197	3200	-	-
PCS [kcal/kg]	3872,889*	-	-	-	-
PCU [kcal/kg]	3522,603*	3867 ±203**	-	-	-

(1) Presente trabalho; (2) LEB/FUPEF/UFPR (2009); (3) Fernandes (2000); (4) Filippetto (2008) e (5) Pincelli (2011). *PCS com 8,827% de teor de umidade. **PCS com 10,36% de teor de umidade.

Na Tabela 4.4 verifica-se certa diferença entre aos valores obtidos pelo LEB/FUPEF/UPFR (2009) e aqueles obtidos no presente trabalho. Tanto o poder calorífico superior quanto o poder calorífico útil foram maiores, excedendo em média 10% os valores apresentados no presente trabalho. Tais discrepâncias podem ser justificadas pelas características e composições das espécies analisadas e pelas condições de operação durante o processo de briquetagem. Além disso, comparando-se o desvio padrão apresentado na Tab. 4.3 com aquele apresentado na Tab. 4.4, verifica-se que os resultados do presente trabalho têm menor desvio e se aproximam mais do valor previsto na norma ABNT NBR 8633/1984.

Comparando o poder calorífico com dados disponíveis na literatura científica, verifica-se que Fernandes (2000), na análise do capim elefante, encontrou 3487 kcal/kg para o poder calorífico superior e 3200 kcal/kg para o poder calorífico inferior. Já Filippetto (2008) obteve 3343,78 kcal/kg para o poder calorífico superior da casca de arroz, enquanto que Pincelli (2011), na análise de resíduos de eucaliptos, obteve 4663 kcal/kg.

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados referentes à densidade.

Tabela 4.5 – Densidade de amostras padrão.

Parâmetro	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação [%]	Repetições
D_{granel} (TU: 0%) [kg/m ³]	277,838	1,564	0,563	5
D_{granel} (TU: 8,827%) [kg/m ³]	300,692	2,081	0,692	5
Densidade briquete [kg/m ³]	1102,933	16,199	1,469	5

Na Tabela 4.5, o valor obtido para a densidade à granel das amostras foi de $277,838 \pm 1,564 \text{ kg/m}^3$ para o produto padrão seco e $300,692 \pm 2,081 \text{ kg/m}^3$ para capim padrão com 8,827% de umidade. Tal parâmetro diz respeito à amostra de briquete de palha de capim braquiária triturado com granulometria de 1,410mm a 0,125mm. Verifica-se que o valor obtido no presente trabalho está condizente com dados da literatura científica. Pinheiro et al (2012), por exemplo, afirma que a densidade à granel aumenta com o aumento do teor de umidade e comenta que a densidade à granel de serragem varia de 150kg/m³ a 250kg/m³, para madeiras leves e pesadas, respectivamente.

Com relação à densidade do briquete de capim braquiária, obteve-se no presente trabalho o seguinte valor: $1102,933 \pm 16,199 \text{ kg/m}^3$. Resultados semelhantes foram encontrados por Rendeiro (2008) que obteve 1200 kg/m³ para o briquete de eucalipto. Filippetto (2008), por sua vez, em estudo da casca de arroz *in natura* obteve 130 kg/m³ para densidade à granel. Posteriormente à briquetagem, em prensa de parafuso, obteve-se densidade de 1236 kg/m³.

A proporção de densificação da palha de capim braquiária é calculada pela razão entre a densidade briquete e a densidade à granel e neste trabalho obteve-se 3,668. Este valor indica a capacidade do processo mecânico de briquetagem em aumentar a densidade energética inicial do produto *in natura*.

A densidade energética por sua vez é obtida pelo produto do poder calorífico superior e densidade à granel da amostra de briquete de capim braquiária triturado. Neste trabalho, para o produto padrão comercial com umidade de $8,827 \pm 0,088\%$, obteve-se uma densidade energética de 1164,547 Mcal/m³.

De acordo com Pinheiro et al (2012), a densidade à granel tem intensa influência na densidade energética dos combustíveis. Obviamente, a briquetagem por aumentar a densidade do briquete acarreta no aumento na densidade energética do combustível. No entanto, durante a briquetagem, o excesso de poeira, terra e particulados pode

comprometer a qualidade e a densidade energética final do briquete. Neste caso, é necessário avaliar a concentração de impurezas no briquete pós-briquetagem, ou mesmo seu teor de cinzas pós-combustão, para efetivamente comprovar o real valor da densidade energética do briquete.

Considerando o briquete sem impurezas, a Tab. 4.6 apresenta um comparativo da densidade energética do briquete de capim braquiária com dados disponíveis na literatura científica.

Tabela 4.6 – Densidade energética de amostras padrão e comparações com dados da literatura científica.

Parâmetro	Densidade Energética [Mcal/m ³]
Capim braquiária a granel ^{(1)*}	1164,547
Bagaço de cana ^{(2)**}	227,50
Casca de arroz a granel ⁽³⁾	434,691
Briquete de capim braquiária ^{(1)*}	4271,537
Briquete de casca de arroz ⁽³⁾	4132,912
<i>Eucalyptus benthamii</i> ⁽⁴⁾	2193,794
Lenha comercial ^{(5)***}	1345,497

(1) Presente trabalho; (2) Silva e Morais (2008); (3) Filippetto (2008); (4) Silva et al (2013); (5) Lima et al (2008) e Alves (2010). *Teor de umidade de 8,827%. **Teor de umidade de 50%. ***Teor de umidade de 40%.

No presente trabalho obteve-se densidade energética para o briquete de capim braquiária igual a 4271,537Mcal/m³ com teor de umidade de 8,827%.

Silva et al (2013) avaliaram toras de *Eucalyptus benthamii* em base seca e obtiveram densidade energética de $2193 \pm 155,51$ Mcal/m³. Considerando o *Eucalyptus benthamii*, comercializado com 40% teor de umidade, a partir do poder calorífico definido por Lima et al (2008) (2850,63 kcal/kg) e densidade definida por Alves (2010) (472 kg/m³), têm-se uma densidade energética de 1345,497 Mcal/m³, ou seja, bem inferior àquela apresentada para o briquete de capim braquiária.

Segundo Silva e Morais (2008), o bagaço de cana *in natura* a 50% de umidade possui uma densidade energética de 227,50 Mcal/m³. Filippetto (2008) em análise da casca de arroz relatou uma densidade energética de 434,691Mcal/m³ e 4132,912Mcal/m³ para o produto antes e após o processo mecânico de briquetagem, respectivamente. Neste caso,

verifica-se novamente, que os valores obtidos neste trabalho estão condizentes com dados disponíveis na literatura científica.

4.2. Influência da Umidade no Poder Calorífico do Produto Padrão

O poder calorífico é definido como a quantidade de energia por unidade de massa de combustível. Já o teor de umidade representa a proporção de água presente no combustível em forma de impureza que reduz a energia térmica.

A Tabela. 4.7 mostra a influência do teor de umidade no poder calorífico do briquete de capim braquiária triturado (produto padrão).

Tabela 4.7. - Poder calorífico em função da umidade da amostra padrão.

Umidade [%]	PCS				PCU [kcal/kg]
	Média [kcal/kg]	Desvio Padrão [kcal/kg]	Coeficiente de variação [%]	Repetição	
0,000	4184,167	45,828	1,095	5	3920,396
10,000	3778,200	4,764	0,126	5	3469,741
20,000	3399,200	1,924	0,057	5	3019,086
30,000	2906,800	11,862	0,408	5	2568,430
40,000	2577,200	8,758	0,340	5	2117,775
50,000	2110,000	11,916	0,565	5	1667,120
60,000	1776,000	17,649	0,994	5	1216,465

Observa-se na Tabela 4.7 que os valores de desvio padrão e de coeficiente de variação confirmam a confiabilidade nos resultados. Verifica-se ainda que o poder calorífico superior e útil da amostra de briquete de capim braquiária segue tendências inversamente proporcionais ao teor de umidade. Tal comportamento encontra-se de acordo com a literatura: Farinhaque (1981) e Souza et al (2012), por exemplo, na análise de madeira de Bracatinga (*Mimosa scabrella bentham*) e resíduos provenientes da colheita florestal e do processamento da madeira de *Pinus taeda L*, concluíram que o poder calorífico é inversamente proporcional ao teor de umidade.

Lima et al (2008) em estudo sobre a relação do percentual de umidade no poder calorífico da madeira *Eucalyptus benthamii*, além de concluir que o poder calorífico da madeira é inversamente proporcional ao seu teor de umidade, também mencionam que a partir de 60% de umidade, não ocorre combustão da madeira devido à elevada quantidade de umidade no biocombustível.

Na Figura 4.1 é apresentado o gráfico do poder calorífico superior e útil em função do teor de umidade da amostra de briquete de palha de capim braquiária triturado.

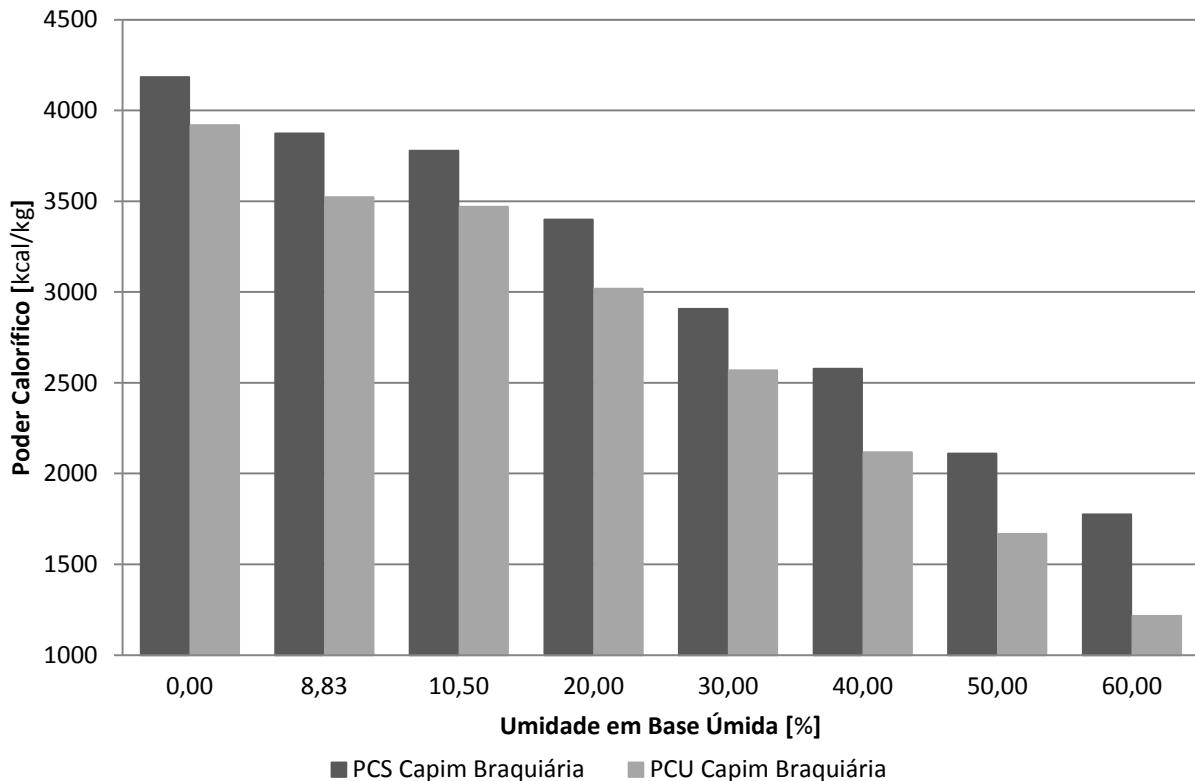


Figura 4.1 - Poder calorífico em função do teor de umidade da amostra de briquete.

Na figura anterior o PCU é calculado a partir do PCS e da Eq. (3.7). Cabe salientar que o excesso de umidade na biomassa prejudica o bom funcionamento de fornos e plantas industriais. A priori, quanto maior o teor de umidade no biocombustível menor o poder calorífico, o que implica em um consumo maior de matéria prima.

A Figura 4.2 mostra a comparação entre os poderes caloríficos da amostra de briquete da palha de capim braquiária e da madeira de *Eucalyptus benthamii* (Lima et al, 2008) em função da umidade.

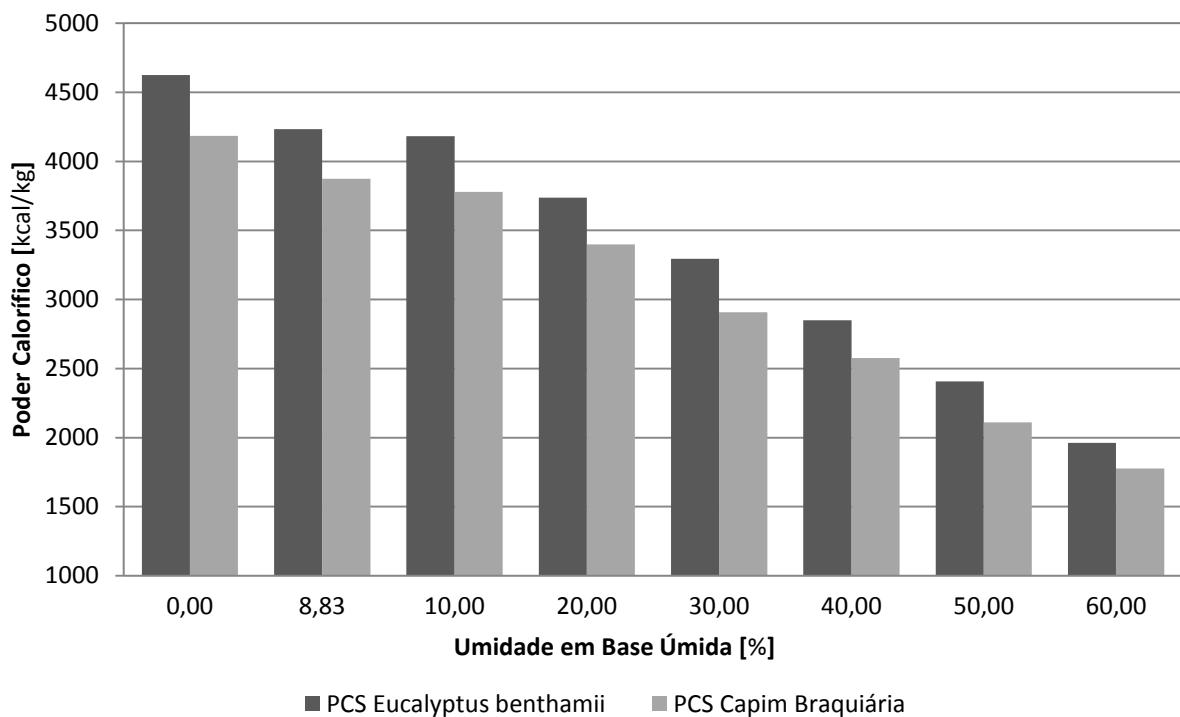


Figura 4.2 - Comparativo do poder calorífico do capim e do eucalipto em função da umidade.

Observa-se na figura anterior que o PCS da madeira é sempre superior ao do briquete. Entretanto, considerando os combustíveis isentos de impurezas, ao longo do ano o briquete de capim braquiária é comercializado com 8,8% de umidade média o que, segundo a Fig. 4.2, garante 3872,89kcal/kg de poder calorífico superior e 4271,53Mcal/kg de densidade energética. Tais informações confirmam a viabilidade do briquete de capim braquiária com alternativa energética para fins comerciais e industriais.

4.3. Torrefação de Briquete

Finalizada a caracterização do produto padrão e o estudo da influência da umidade no poder calorífico do briquete de capim braquiária,, realizou-se o tratamento térmico do produto. Neste caso, adotou-se a torrefação na busca pela valorização energética do briquete. O tratamento térmico foi conduzido com níveis de temperatura de 180°C, 200°C, 220°C e 240°C. Para cada temperatura, foram definidos quatro tempos de aquecimento: 10min, 20min, 30min e 40min. Em cada teste, adotou-se 35 gramas de briquete de palha de capim braquiária triturado com granulometria de 1,410 a 0,125mm com percentual de umidade de 0%. Ao final de cada experimento, analisou-se o rendimento gravimétrico, a densidade à granel e a higroscopidez dos produtos torrificados.

A Figura 4.3 ilustra o briquete de palha de capim braquiária triturado após tratamento térmico.



Figura 4.3 – Amostra de briquete de capim braquiária triturado após torrefação

Visualmente, nota-se a diferença de tonalidade nas amostras com o aumento da temperatura e tempo de torrefação. Conforme esperado, a tendência dos produtos torrificados é a de se aproximarem das características do carvão vegetal. Nesse sentido, após o tratamento térmico das amostras, estas foram submetidas às demais análises energéticas.

4.3.1. Rendimento Gravimétrico

Na Figura 4.4 são apresentados os resultados para o rendimento gravimétrico conforme os tratamentos térmicos. O rendimento gravimétrico é calculado pela razão entre a massa torrificada e a massa de briquete triturado seco, ambos em base seca. Segundo Rodrigues (2009), este parâmetro indica o quanto de massa se perdeu no processo de torrefação.

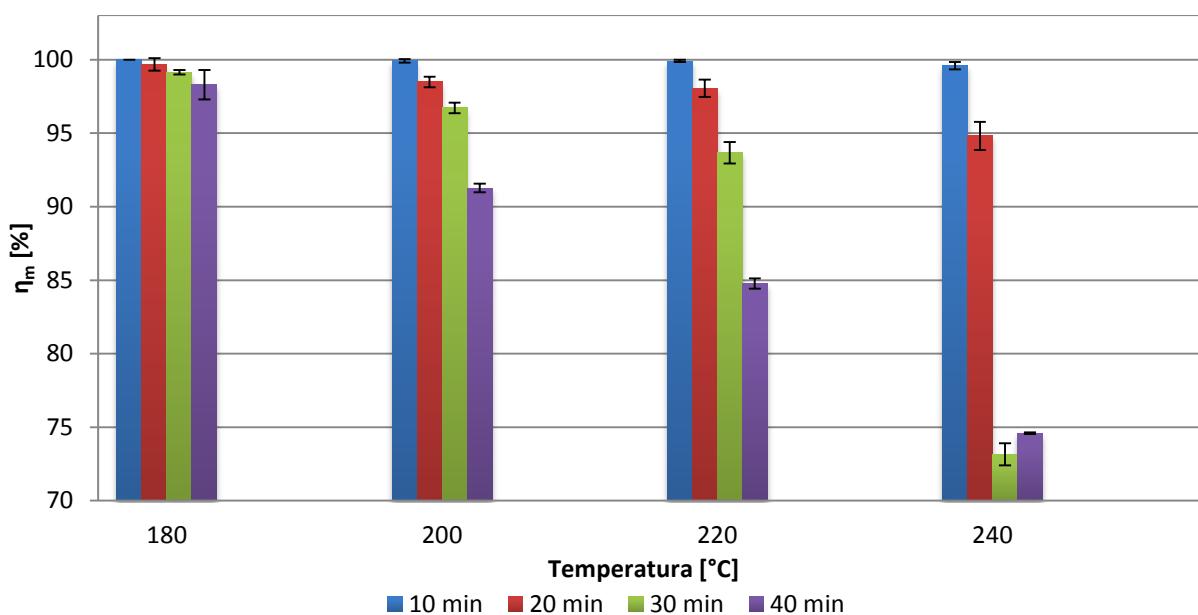


Figura 4.4 - Rendimento gravimétrico em função da temperatura e tempo de aquecimento

Na Figura 4.4 observa-se que a torrefação ajustada em 180°C interferiu pouco no rendimento gravimétrico que variou de 100% a 97,58%, conforme os tempos de aquecimento de 10 a 40 min, respectivamente. A 200°C o rendimento variou de 100% a 91,06%. Nas temperaturas de 220°C e 240°C a variações no rendimento gravimétrico foram mais significativas, em torno de 100% a 84,52% para 220°C e de 99,78% a 72,62% para 240°C.

Tais resultados se assemelham ao encontrado na literatura, Vidal e Hora (2013), por exemplo, comentam que em uma torrefação típica de madeira 70% da massa permanece como produto sólido.

Rodrigues (2009) realizou a torrefação da madeira seca de *Eucalyptus grandis* com taxa de aquecimento constante de 3°C/min até a temperatura final pré-estabelecida, permanecendo neste patamar por 1 hora. Ao analisar o rendimento gravimétrico obteve-se 96,39%, 88,27% e 80,15% para 220°C, 250°C e 280°C, respectivamente.

Fonseca Felfi (2003) comenta que o rendimento gravimétrico em um processo de torrefação varia entre 60 e 80% conforme as condições tempo e temperatura em que se realiza o processo. Em seu trabalho de torrefação da madeira de eucalipto obteve rendimento gravimétrico de 87,50%, 81,50% e 67% e densidade aparente de 437,50 kg/m³, 407,50 kg/m³, 335,00 kg/m³ para temperaturas de 230°C, 250°C e 270°C, respectivamente.

Pincelli (2011) realizou a torrefação em amostras secas de resíduos de *Eucalyptus grandis* com 7 anos de idade e de *Pinus caribaea* var *hondurensis* com 11 anos de idade. Tal tratamento térmico foi conduzido em presença de oxigênio nas temperaturas de 140°C e

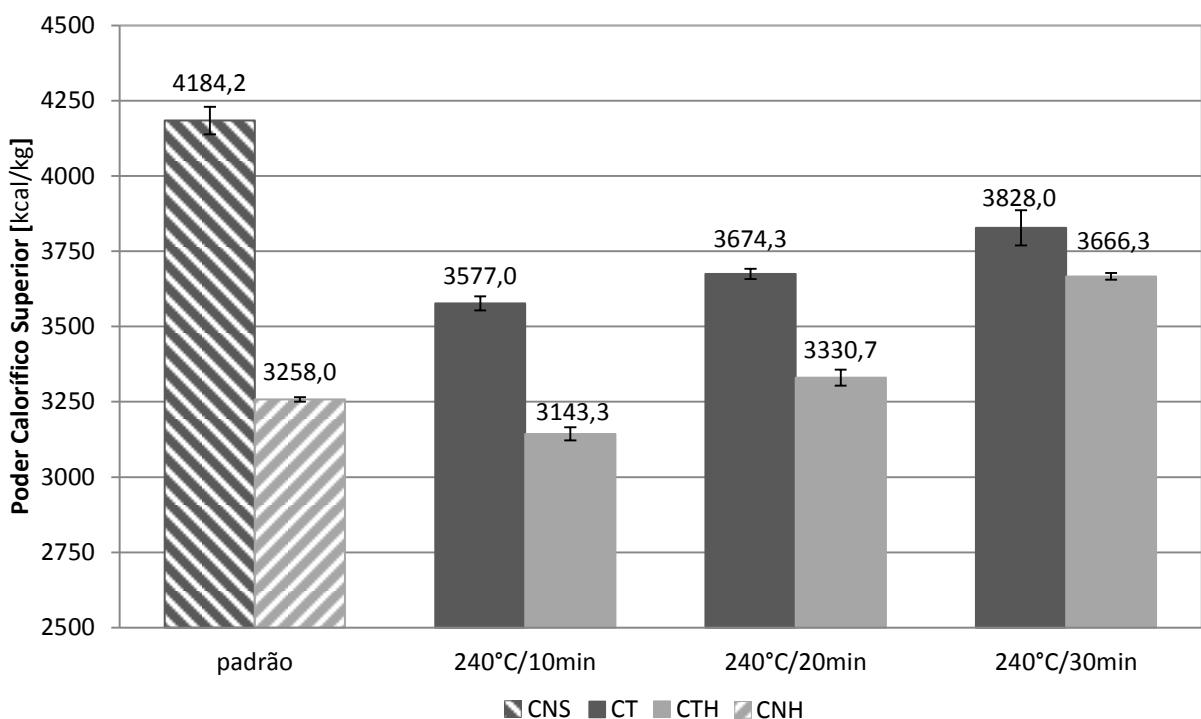
180°C e em atmosfera inerte (N_2) nas temperaturas de 220°C, 260°C e 300°C. Os resíduos secos foram colocados em estufa à temperatura de 100°C, após o processo de torrefação. Um patamar de temperatura máxima constante foi mantido durante 1 hora ao final de cada tratamento. Posteriormente, a estufa era desligada e as amostras permaneciam no seu interior em resfriamento natural até atingirem a temperatura de 30°C. Em conclusão ao rendimento gravimétrico, obteve-se $100\pm0,00\%$ a 140°C, $95,4\pm0,07\%$ a 180°C, $85,3\pm0,18\%$ a 220°C, $76,1\pm0,66\%$ a 260°C e $58,3\pm0,71\%$ a 300°C para os resíduos de eucalipto. Já para os resíduos de pinus obteve-se $99,9\pm0,06\%$ a 140°C, $97,6\pm0,16\%$ a 180°C, $89,9\pm0,30\%$ a 220°C, $80,5\pm0,19\%$ a 260°C e $61,4\pm0,46\%$ a 300°C.

Assim, analisando novamente a Figura 4.4, verifica-se que somente a partir de 240°C e tempo superior a 30min de aquecimento é que se obtêm rendimentos entre 60% e 80%. Esta faixa de rendimento gravimétrico, segundo a literatura, seria uma referência para a torrefação do briquete de capim braquiária triturado. Portanto, para fins de análise higroscópica serão consideradas apenas as amostras submetidas ao tratamento térmico à 240°C.

Na análise da densidade à granel não foram encontradas variações significativas quando comparado aos valores apresentados na Tab. 4.5.

4.3.2. Análise de Higroscopicidade

Posterior à torrefação dos briquetes, realizou-se a análise de higroscopicidade nos produtos oriundos dos seguintes tratamentos: 240°C (10min), 240°C (20min) e 240°C (30min), juntamente com a amostra padrão. O objetivo desta análise foi encontrar o tempo e a temperatura de torrefação que resulte num produto menos higroscópico. Na Fig. 4.5 são apresentados os resultados experimentais e o desvio padrão no poder calorífico superior do capim torrificado (CT) e de amostras capim torrificado submetido à análise de higroscopicidade (CTH).



CNS: Capim padrão seco; CT: Capim torrificado; CTH: Capim torrificado submetido à análise de higroscópicidade; CNH: Capim padrão com teor de umidade de 22,973%.

Figura 4.5 – Poderes caloríficos superiores em função dos tratamentos térmicos

Para a análise higroscópica foram separadas amostras de aproximadamente 1,5g para cada ensaio. Estas foram submetidas ao condicionamento higroscópico. Nesta etapa, uma amostra padrão e as demais torrificadas foram colocadas em pequenos frascos sem tampa que foram, posteriormente, inseridos no interior de uma câmara úmida, permanecendo por um tempo médio de três dias à temperatura de 18°C e umidade relativa do ar de 100%.

Por meio da Figura 4.5 verificou-se que o maior poder calorífico foi identificado no capim padrão seco. Notou-se que a torrefação do capim seco (CT) reduziu inicialmente o poder calorífico, devido à liberação de materiais voláteis. Com o aumento do tempo de aquecimento, o poder calorífico aumentou, indicando reações de transformação que promoveram o retorno dos gases para a estrutura do capim. O desvio padrão apresentado na Fig. 4.5 confirmou a homogeneidade dos resultados obtidos experimentalmente na bomba calorimétrica.

No caso do capim submetido à análise higroscópica (CNH), verificou-se que a amostra padrão seca absorveu grande quantidade de umidade, cerca de 22%, o que proporcionou uma redução no poder calorífico de aproximadamente 22%, conforme apresentado na Fig. 4.6. Com o aumento do tempo de torrefação, verifica-se nas Figs. 4.5 e

4.6 que após 30 min à 240°C, o capim torrado absorveu uma quantidade menor de umidade, aproximadamente 13% e que seu poder calorífico se tornou mais uniforme, variando apenas 4%. Tais características confirmaram que o capim se torna menos higroscópico quando submetido a um processo de torrefação adequado.

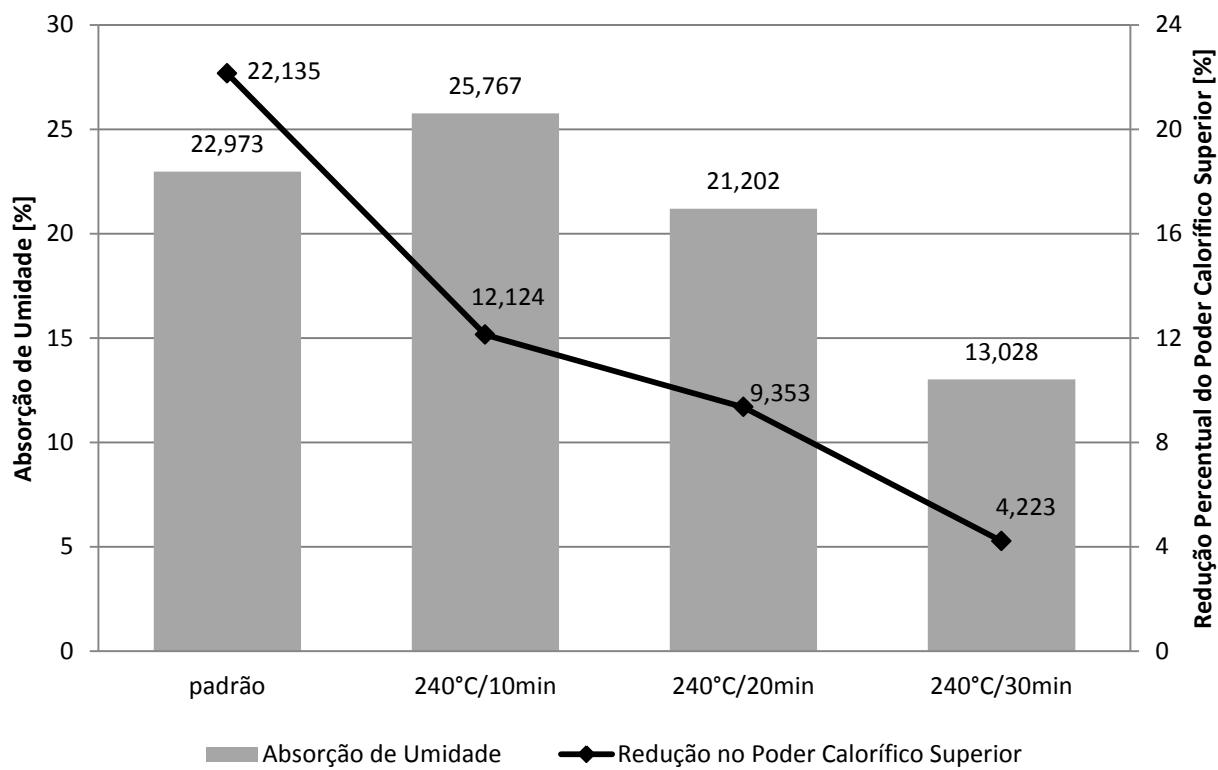


Figura 4.6 – Absorção de umidade e redução no PCS em função do tratamento térmico

A absorção ou teor de umidade apresentada na Figura 4.6, foi calculada conforme a Eq. (4.1), definida a partir dos dados experimentais da Tab. 4.7 para a umidade e PCS.

$$PCS = -41,057 * TU + 4201,2 \quad (4.1)$$

Neste caso, por meio de uma regressão linear, ajustou-se uma expressão matemática condizente com os dados experimentais.

A redução no poder calorífico superior, por sua vez, foi calculada pela Eq. (4.2).

$$\text{Redução PCS} = \left(\frac{CT - CTH}{CT} \right) \cdot 100 \quad (4.2)$$

Assim, a partir da Figura 4.5 e 4.6 foi possível concluir que o produto menos higroscópico foi aquele oriundo da torrefação no nível de temperatura de 240°C e tempo de

30min. Ressalta-se que esse produto possuiu poder calorífico superior em base seca (3828,0kcal/kg) similar ao do produto padrão (3872,889kcal/kg) com teor de umidade de 8,827%.

Para o capim torrado à 240°C com tempo de aquecimento de 30 minutos, realizou-se novamente a análise imediata e a densidade energética.

Tabela 4.8 – Análise imediata do produto torrificado: 240°C e tempo de aquecimento de 30min.

Parâmetro	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação [%]	Repetições
MV [%]	69,715	0,729	1,046	3
CZ [%]	6,671	0,206	3,091	3
CF [%]	23,614	0,687	2,911	3
DE _{granel} [Mcal/m ³]	1063,564	-	-	-

Comparando-se a análise imediata do produto padrão (Tab. 4.1) com a do produto torrificado (Tab. 4.8), verificou-se que o teor de carbono aumentou em 20,42% e o teor de materiais voláteis diminuiu em 4,24%. Tais características confirmaram que um processo de torrefação adequado agrega potencial energético ao capim braquiária. No entanto, para comprovar tais afirmações, apresenta-se na sequencia uma análise da combustão do capim padrão e do capim torrificado.

4.3.3. Comportamento do Capim na Combustão

Para avaliar o comportamento do briquete de capim braquiária triturado na combustão adotou-se a prática comum dos autores Quirino e Brito (1991), Pincelli (2011) e Paula et al (2011). Basicamente, a bancada de análise de combustão apresentada na Fig. 4.7 é formada por um combustor, uma balança analítica com capacidade máxima de 4100g e precisão de 0,1mg, um soprador para fornecer ar ao processo e um isolante térmico entre o forno e a balança.

Neste trabalho foram usados, em cada experimento, aproximadamente 10 gramas de amostra padrão. Para iniciar a combustão do briquete de capim braquiária triturado fez o uso de 10 gramas de álcool hidratado que eram depositados em um reservatório abaixo da grelha com capim. A combustão do álcool manteve uma chama estável por aproximadamente 2 minutos. Após esse prazo, a chama se apagou e o processo de combustão da biomassa teve continuidade por meio da injeção de ar com um soprador.

Nesse momento, iniciou-se o monitoramento da redução de massa do capim em função do tempo de combustão.

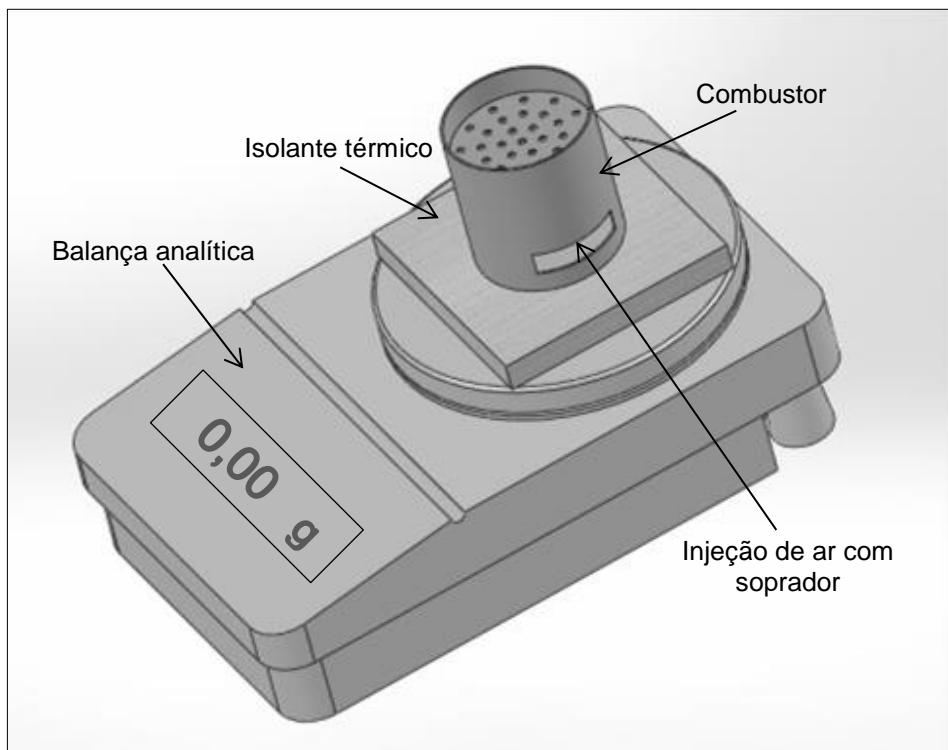


Figura 4.7 – Esquema da bancada de análise de combustão (Solidworks)

Inicialmente, desejou-se conhecer a perda de massa percentual do produto padrão durante a combustão. Nesse sentido, foram realizados dois experimentos distintos. No primeiro usou-se 10 gramas aproximadamente de briquete integral. Enquanto que no segundo apenas o capim braquiária padrão (amostra padrão). A Fig. 4.8 apresenta os resultados para o briquete integral e para o capim braquiária padrão, ambos com teor de umidade de 8,8%.

Notou-se claramente na Figura 4.8 que o briquete e o capim padrão apresentaram perda de massa semelhante durante o processo de combustão. Portanto, conclui-se que, adotando a mesma quantidade de amostra, ou seja, 10g, o processo de compactação ou briquetagem não teve influência na perda de massa do capim durante a combustão.

Ressalta-se que na combustão de ambos não foi detectada a presença de chama, como pode ser observado na Fig. 4.9. Além disso, durante a combustão de ambos verificou-se uma grande quantidade fumos e gases que foram liberados durante todo o processo.

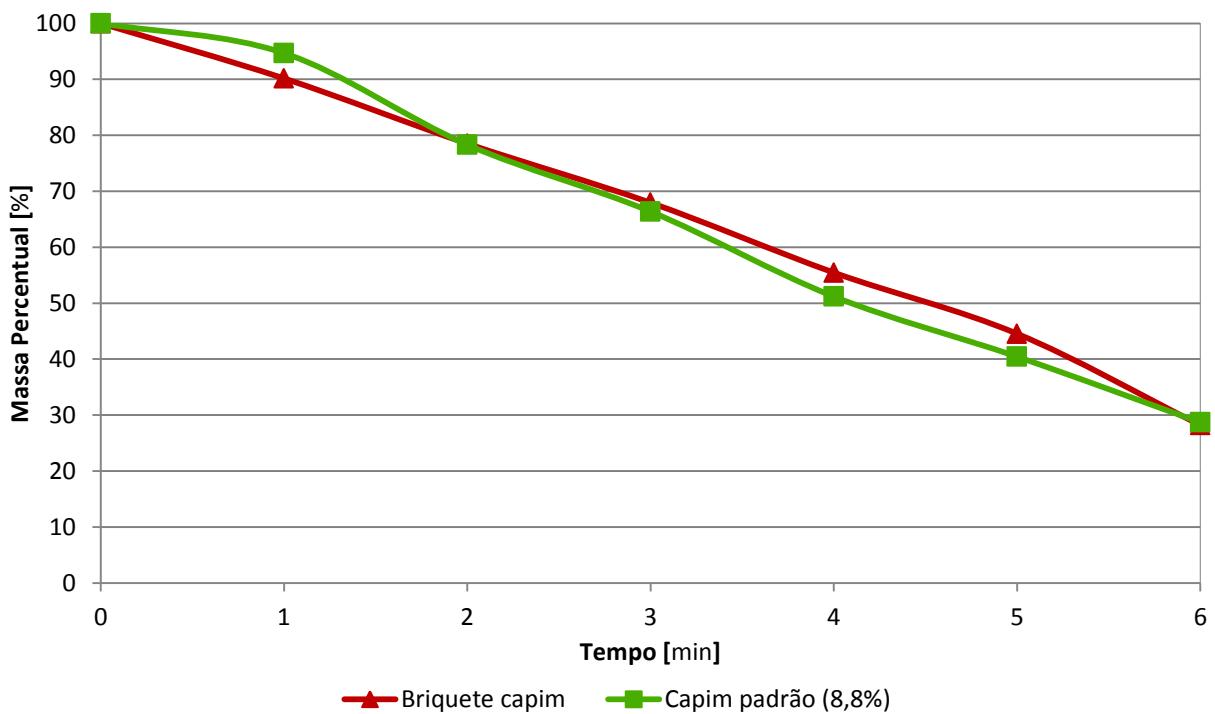


Figura 4.8 - Perda de massa em função do tempo de combustão. Matéria prima: briquete e capim braquiária padrão, ambos com teor de umidade de 8,8%.



Figura 4.9 – Combustão do capim braquiária padrão com 8,8% de umidade

Na sequência realizou-se a combustão do capim padrão seco e em seguida a combustão do capim padrão torrificado a 240°C/30min. Como experimento adicional, realizou-se a combustão de briquete de folha de eucalipto desintegrado e triturado, biocombustível bastante usado em caldeiras na região do Triângulo Mineiro e interior de São Paulo. A Figura 4.10 apresenta os resultados obtidos.

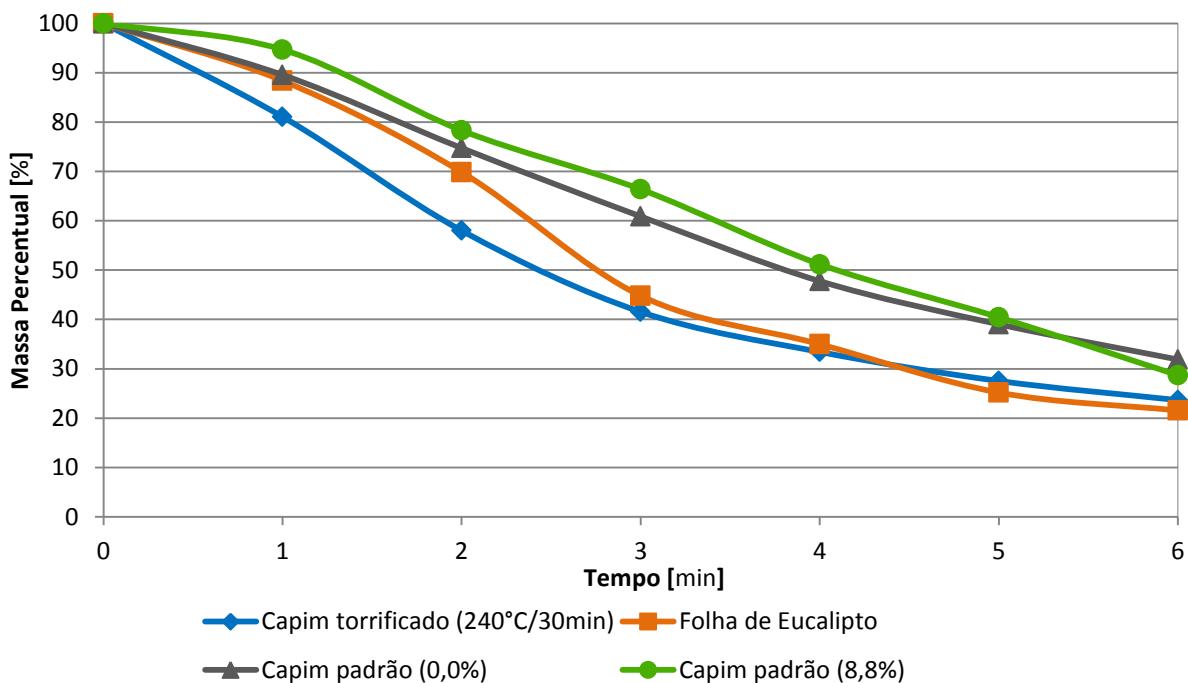


Figura 4.10 - Perda de massa transiente para alguns tipos de biomassas

Na Figura 4.9 verificou-se que o capim padrão torrificado apresentou maior perda de massa durante o processo de combustão. Tanto o capim padrão seco quanto o capim com 8,8% de umidade apresentam pequena perda de massa, quando comparados à combustão de briquete de folha de eucalipto desintegrado e triturado e à de capim padrão torrificado.

Durante a combustão do briquete de folha de eucalipto desintegrado e triturado e do capim padrão torrificado foi constatada a presença de chama, que pode ser claramente visualizada na Fig.4.10. Além disso, destaca-se a pequena quantidade de gases e fumos liberados durante a combustão de tais biocombustíveis.



Figura 4.11 – Combustão do capim braquiária padrão torrificado a 240°C/30min

De uma forma geral, a combustão do briquete de folha de eucalipto e do capim padrão torrificado ocorreu de forma mais homogênea, enquanto que a combustão do produto padrão seco e com certo teor de umidade é bastante heterogênea. Na Fig. 4.9, por exemplo, foi possível identificar claramente uma parcela de capim padrão em brasa e outra praticamente intacta. Enquanto que o mesmo não ocorreu na Fig. 4.11. Rapidamente todo o capim padrão torrificado se transforma em brasa e há a presença de chama.

Assim, a partir dos resultados apresentados neste capítulo, é possível afirmar que o processo de torrefação realmente agrega potencial energético ao produto padrão, com impacto direto no briquete, aprimorando sua densidade energética, reduzindo sua higroscopicidade, proporcionando uma combustão mais homogênea em caldeiras e fornos.

CAPÍTULO V

ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA DO PROCESSO DE TORREFAÇÃO

5.1. Introdução

A torrefação é considerada um tratamento térmico para aumentar e padronizar o poder calorífico da biomassa e torná-la menos higroscópica. Estas características são de grande importância comercial no que diz respeito ao armazenamento, transporte e à eficiência energética. Entretanto, faz-se necessário uma avaliação térmica e energética do processo para comprovar sua viabilidade econômica e financeira.

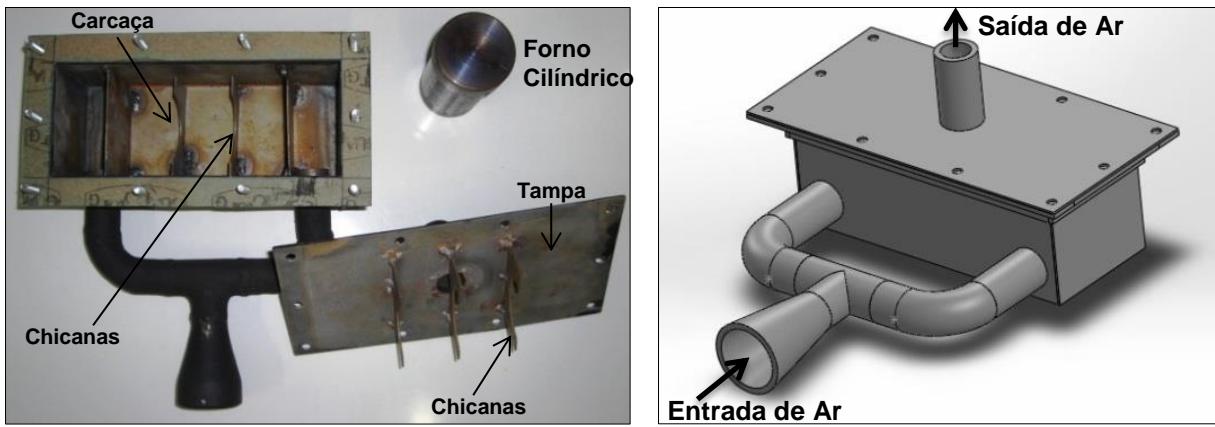
A energia para torrefação pode ser oriunda de resistências elétricas, combustíveis fósseis e até mesmo da própria biomassa. Nesse sentido, deve-se realizar um estudo prévio que quantifique o gasto energético para a torrefação da biomassa.

Assim, propôs-se neste capítulo realizar um balanço de energia no processo de torrefação. Esse estudo foi baseado em informações obtidas no Capítulo IV, no qual, foi definida a temperatura de torrefação (240°C) bem como o tempo de aquecimento do capim de braquiária (30min), capaz de fornecer um produto menos higroscópico e com melhores características energéticas quando comparado ao produto comercial, ou seja, palha padrão com umidade de 8% a 10%.

5.2. Problema Físico

Para realizar o balanço de energia, desenvolveu-se no LTCM/UFU um forno para torrefação, conforme apresentado na Fig.5.1. Este é constituído basicamente por uma

carcaça em forma retangular, uma chaminé acoplada à tampa, um cilíndrico oco com tampa rosqueada para acomodar a amostra de biomassa e chicanas distribuídas ao longo da carcaça e da tampa para aumentar e direcionar o ar, de forma a uniformizar a taxa de transferência de calor.



a) Detalhes do forno de torrefação

b) Projeto do forno de torrefação (Solidworks)

Figura 5.1 - Projeto de forno de torrefação

O forno é completamente isolado com lã de rocha para minimizar as perdas de calor com o meio ambiente. O encaixe da tampa na carcaça é feito por parafusos e porcas e a vedação é realizada por meio de uma placa de laminado de grafite.

Um soprador térmico com potência máxima de 1000 watts, acoplado a um variador de tensão e a um multímetro, forneceu a energia necessária ao forno.

Com um sistema de aquisição de dados, termopares e um tubo de Pitot foram definidos a potência, a vazão mássica e a temperatura do ar no forno.

5.3. Problema Térmico

O problema térmico consiste em determinar a energia necessária para promover a torrefação da biomassa a uma dada temperatura e tempo de aquecimento. Neste trabalho tal parâmetro é denominado $E_{torrefação}$ [J].

A partir de tal informação podem ser projetados ou adquiridos equipamentos industriais capazes de fornecer energia à biomassa, proporcionando um produto torrificado semelhante àquele obtido em laboratório.

Para quantificar a $E_{torrefação}$, realizou-se um balanço de energia no forno apresentado na Fig. 5.1b, em dois momentos distintos:

- i) Momento 1 - caracterizado pela ausência de biomassa no interior do cilindro (Fig. 5.2);
- ii) Momento 2 - caracterizado pela presença de biomassa no interior do cilindro (Fig. 5.3), aproximadamente 35 gramas de produto padrão com 0% de umidade e granulometria de 1,410 a 0,125mm;

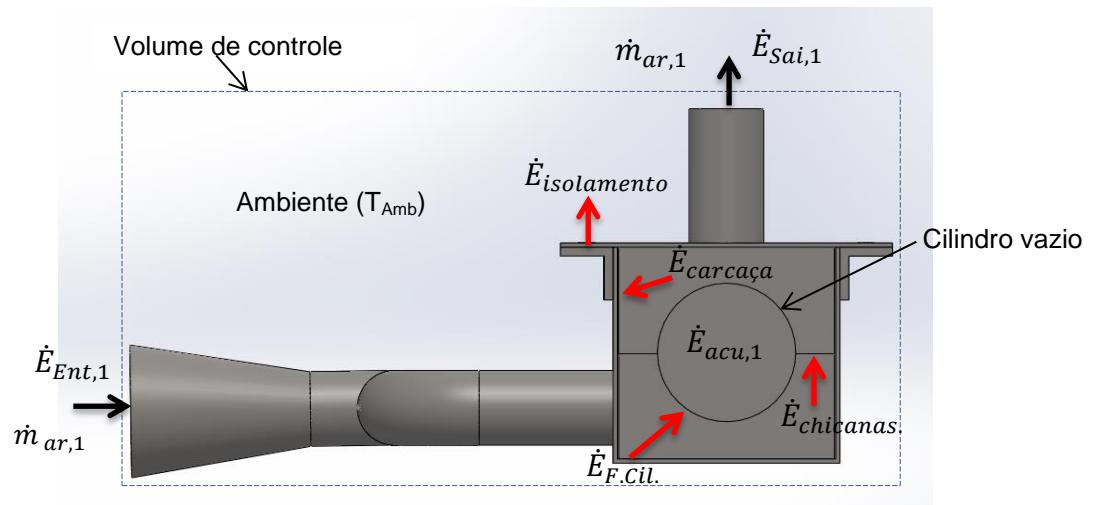


Figura 5.2 – Momento 1: ausência de biomassa no interior do cilindro.

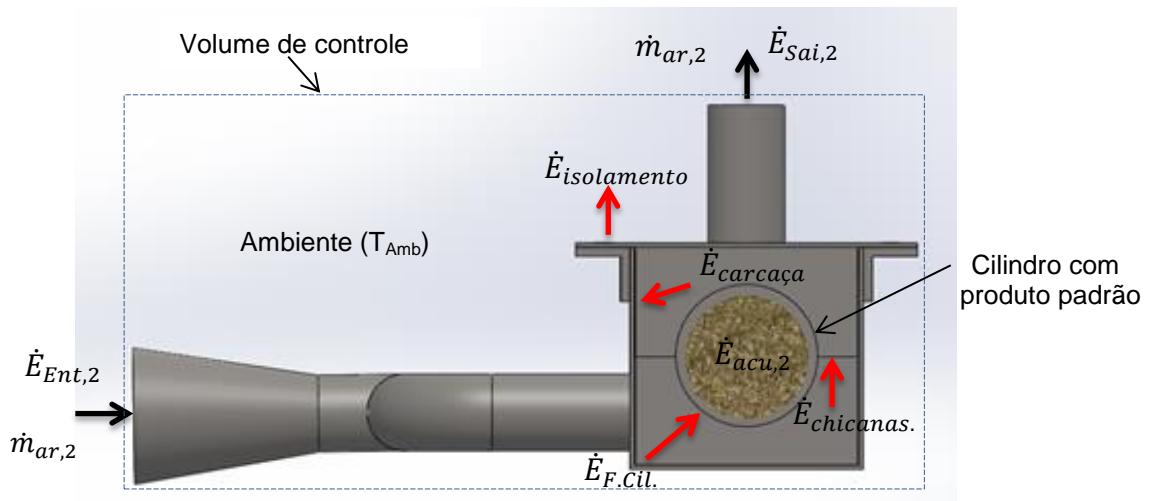


Figura 5.3 – Momento 2: presença de biomassa no interior do cilindro.

Nas Figuras 5.2 e 5.3 são apresentados os seguintes parâmetros:

- $\dot{E}_{isolamento}$; $\dot{E}_{carcaça}$; $\dot{E}_{chicanas}$; $\dot{E}_{F.cil.}$: taxas de energias perdidas ou absorvidas pelo isolamento; pela carcaça, pelas chicanas e pelo forno cilíndrico;

- $\dot{E}_{Ent,i}$: taxa de energia que entra no volume de controle;
- $\dot{E}_{sai,i}$: taxa de energia que sai do volume de controle;
- $\dot{m}_{ar,i}$: fluxo mássico de ar no volume de controle;
- $\dot{E}_{acu,i}$: taxa de energia acumulada no volume de controle;

$i = 1, 2$: indicando os momentos 1 e 2, respectivamente.

Para análise térmica do processo, adotou-se um volume de controle no forno no qual serão aplicados os princípios da conservação de massa e de energia. Na sequência, apresenta-se o modelo matemático.

5.4. Modelo Matemático

Da equação da continuidade (BORGNAKKE & SONNTAG, 2009) aplicada ao problema térmico, tem-se:

$$\sum \dot{m}_{ent} = \sum \dot{m}_{sai} \quad (5.1)$$

Logo,

$$\dot{m}_{ar,i,ent} = \dot{m}_{ar,i,sai} = \dot{m}_{ar,i} \quad \text{para } i = 1, 2. \quad (5.2)$$

Segundo Çengel (2009) e/ou Incropera (2011), o balanço de energia no forno é expresso por:

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{saída} = \dot{E}_{acu} = \frac{dE_{acu}}{dt} \quad [\text{W}] \quad (5.3)$$

Aplicando a Eq.(5.3) no volume de controle da Fig. 5.2, que considera ausência de biomassa no cilindro (Momento 1), tem-se:

$$\dot{E}_{ent,1} - \dot{E}_{sai,1} - \dot{E}_{isolamento} - \dot{E}_{chicanas} - \dot{E}_{F.Cil.} - \dot{E}_{carcaça} = \frac{dE_{acu,1}}{dt} \quad (5.4)$$

Fazendo o mesmo para o Momento 2 (Fig. 5.3), tem-se:

$$\dot{E}_{ent,2} - \dot{E}_{sai,2} - \dot{E}_{isolamento} - \dot{E}_{chicanas} - \dot{E}_{F.Cil.} - \dot{E}_{carcaça} = \frac{dE_{acu,2}}{dt} \quad (5.5)$$

Segundo Borgnakke e Sonntag (2009), Incropera (2011) e Çengel (2009), a taxa de energia transferida pode ser obtida em função do fluxo de massa e da entalpia do ar, representado pela Eq. (5.6).

$$\dot{E} = \dot{m}_{ar,i} \cdot h_{j,i} \quad (5.6)$$

onde:

$j = e, s$: para entrada e saída, respectivamente;

$i = 1,2$: para Momentos 1 e 2, respectivamente;

Analizando as Eq. (5.4) e (5.5), verifica-se que a diferença entre a energia acumulada no forno no Momento 1 e no Momento 2 representa a energia necessária para promover a torrefação da biomassa, denominada $E_{torrefação}$ [J]. Assim, tem-se que:

$$E_{torrefação} = \int (\dot{E}_{acu,1} - \dot{E}_{acu,2}) dt \quad [J] \quad (5.7)$$

Substituindo a Eq. (5.6) na Eq. (5.7), obtém-se:

$$\dot{E}_{acu,1} = \int \dot{m}_{ar,1} (h_{e,1} - h_{s,1}) dt \quad [J] \quad (5.8)$$

$$\dot{E}_{acu,2} = \int \dot{m}_{ar,2} (h_{e,2} - h_{s,2}) dt \quad [J] \quad (5.9)$$

e finalmente a expressão que descreve a energia de torrefação de biomassa:

$$E_{torrefação} = \int \dot{m}_{ar,1} (h_{e,1} - h_{s,1}) dt - \int \dot{m}_{ar,2} (h_{e,2} - h_{s,2}) dt \quad [J] \quad (5.10)$$

onde $h_{j,i}$ representa a entalpia do ar calculada a partir de tabelas de propriedades do ar (BORGNAKKE & SONNTAG, 2009) e de temperaturas experimentais monitoradas no forno e $\dot{m}_{ar,i}$ representa o fluxo mássico de ar definido experimentalmente a partir de um tubo de Pitot instalado na chaminé do forno de torrefação.

5.5. Medição de Temperaturas

A medição das temperaturas do ar na entrada e na saída do forno, bem como nas chicanas, foi realizada por meio de termopares do tipo T, conforme a Fig. 5.4. Para a

aquisição dos dados usou-se o HP 34970 (Data Acquisition\Control Unit) e um microcomputador.

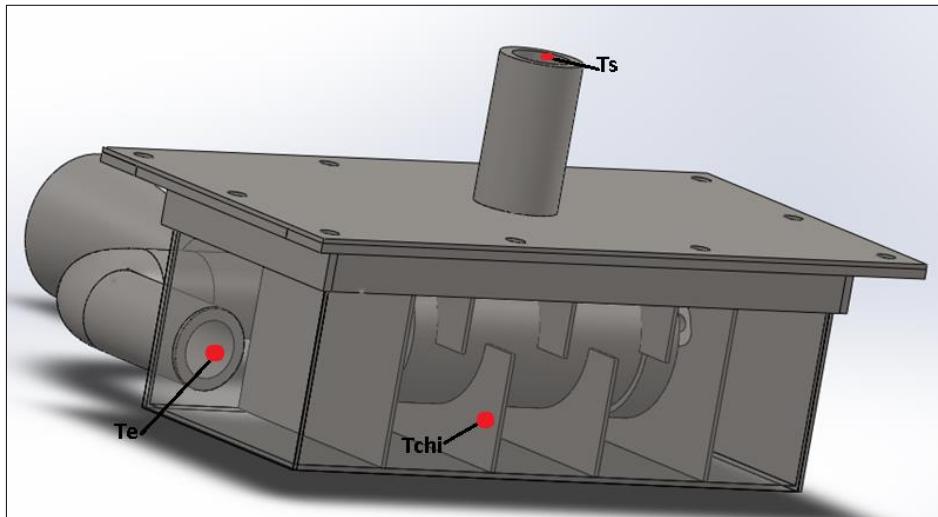


Figura 5.4 - Localização dos termopares no forno

A Figura 5.5 apresenta os valores experimentais das temperaturas medidas no forno nos momentos 1 e 2.

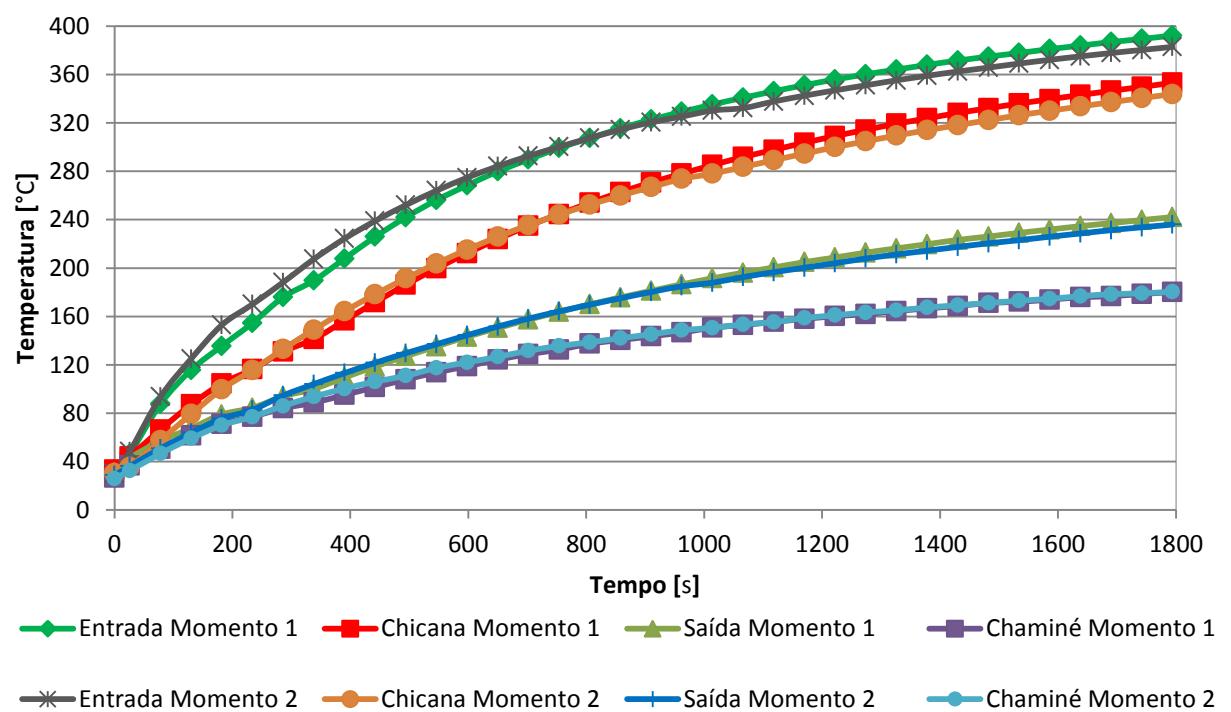


Figura 5.5 – Temperaturas monitoradas no forno nos momentos 1 e 2.

De forma geral, observa-se na Fig. 5.5 um comportamento bastante semelhante entre as temperaturas medidas nos momentos 1 e 2, o que já era esperado em função da massa de capim inserido no forno, ou seja, 35 gramas.

Por meio do variador de tensão e de um soprador térmico, ajustou-se o fluxo de calor para que se tivesse uma temperatura média de torrefação nas chicanas próxima àquela definida no Capítulo IV, ou seja, 240°C com intervalo de aquecimento de 30min. Após esse tempo, o soprador térmico foi desligado promovendo então a etapa de resfriamento do forno.

A partir das temperaturas experimentais apresentadas na Fig. 5.5, de tabelas termodinâmicas e do software MATLAB® foi desenvolvido um algoritmo computacional apresentado no Anexo I. A Figura 5.6 apresenta um fluxograma do algoritmo computacional.

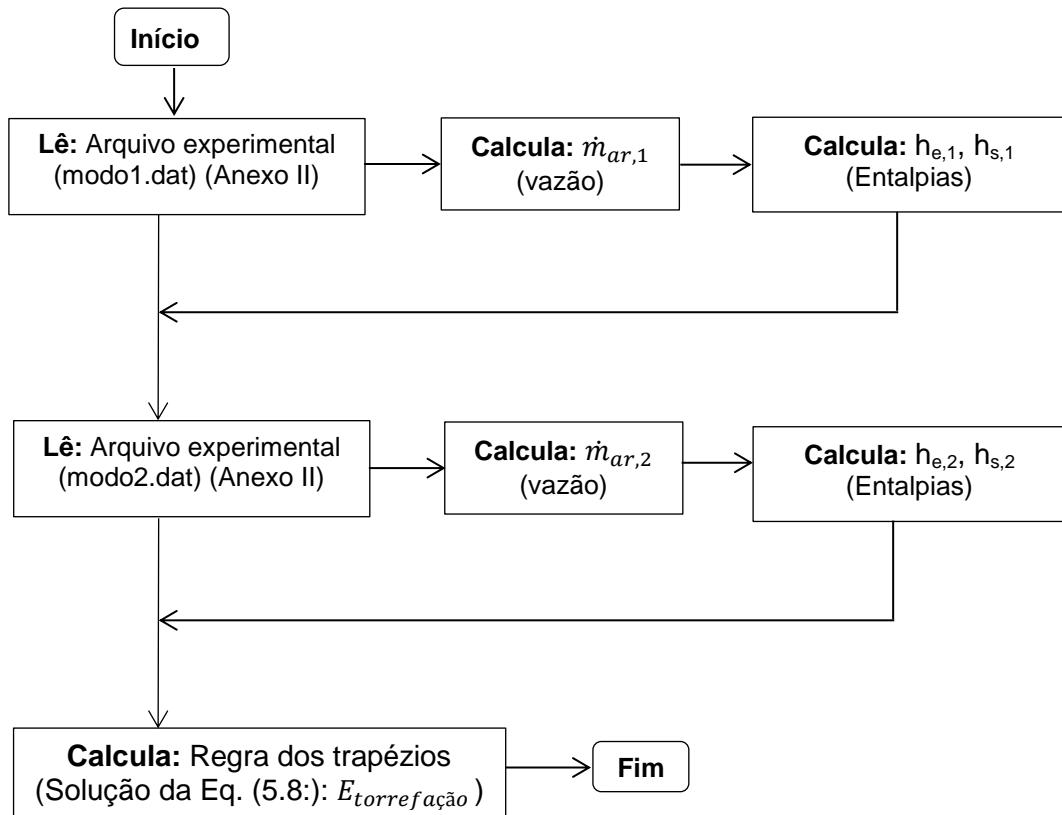


Figura 5.6 – Fluxograma: algoritmo computacional

Basicamente, o algoritmo lê os arquivos contendo as temperaturas experimentais transientes referentes aos Momentos 1 e 2 (Figs. 5.2 e 5.3), bem como a diferença de pressão transiente monitorada pelo tubo de Pitot. Na sequência o software calcula a vazão mássica transiente para cada experimento e, por meio de tabelas termodinâmicas, converte as temperaturas em entalpias. Por fim, resolve-se a integral definida na Eq. (5.8), apresentando como resultado a energia necessária para torrar o capim braquiária.

5.6. Medição da Vazão de Ar e Potência do Soprador Térmico

Para definir a vazão mássica transiente, usou-se um tubo de Pitot desenvolvido no LTCM/UFU conforme FIGUEIRA JR (2012). O equipamento é provido de sensores comerciais (sensor diferencial) que convertem o sinal elétrico em pressão [Pa], conforme uma curva de calibração conhecida, Eq. (5.11), fornecida pelo fabricante.

$$P_i = (V_{final} - V_{inicial}) * 1000 \quad [Pa] \quad (5.11)$$

A Figura 5.7 mostra o esquema de montagem deste dispositivo na chaminé do forno de torrefação. Ressalta-se que o tubo de Pitot foi fixado no centro da chaminé a uma altura superior a 10 vezes o diâmetro da chaminé. Verifica-se ainda um termopar tipo T, que afere a temperatura da chaminé ($T_{chaminé}$). Tal informação é usada posteriormente para definir a temperatura do ar e consequentemente sua massa específica.

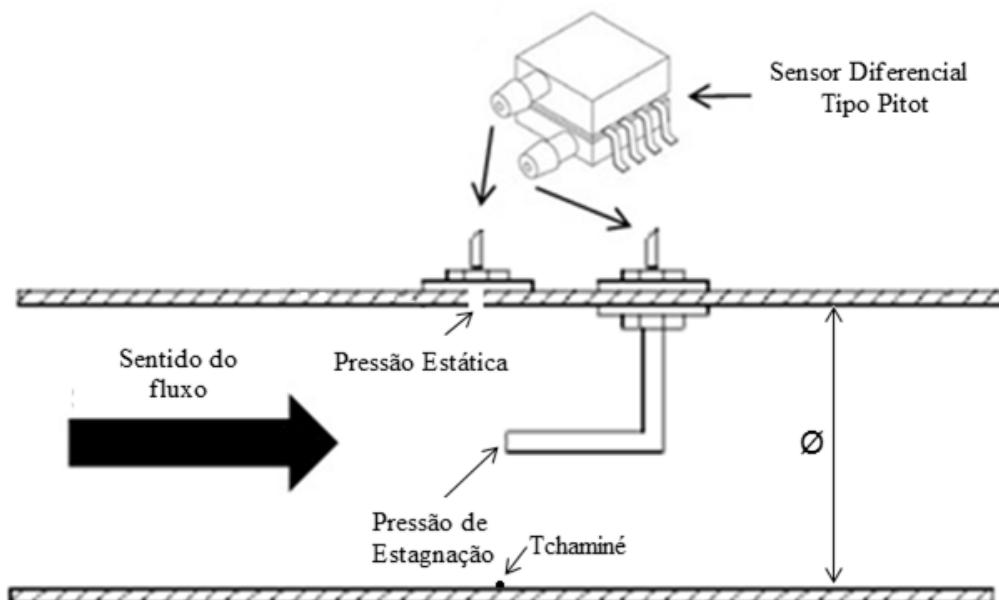


Figura 5.7 - Esquema de medição de pressão e temperatura na chaminé do forno. (Adaptado de FIGUEIRA JR, 2012).

Ressalta-se que as pressões medidas pelo tubo de Pitot da Fig. 5.7 foram comparadas com valores obtidos a partir de um tubo de Pitot comercial da marca Arnor, apresentando boa concordância.

Para medir a potência fornecida pelo soprador térmico, utilizou-se um sensor de corrente elétrica por efeito Hall realimentado (modelo SECOHR 50 CI-12) e um variador de

tensão, ambos acoplados à placa de aquisição de dados do HP 34970 (Data Acquisition\Control Unit). A potência do soprador é calculada pelo produto da corrente elétrica e tensão ajustada no variador de tensão.

A Figura 5.8 apresenta os valores experimentais do diferencial de pressão medidos no forno e a potência do soprador nos Momentos 1 e 2.

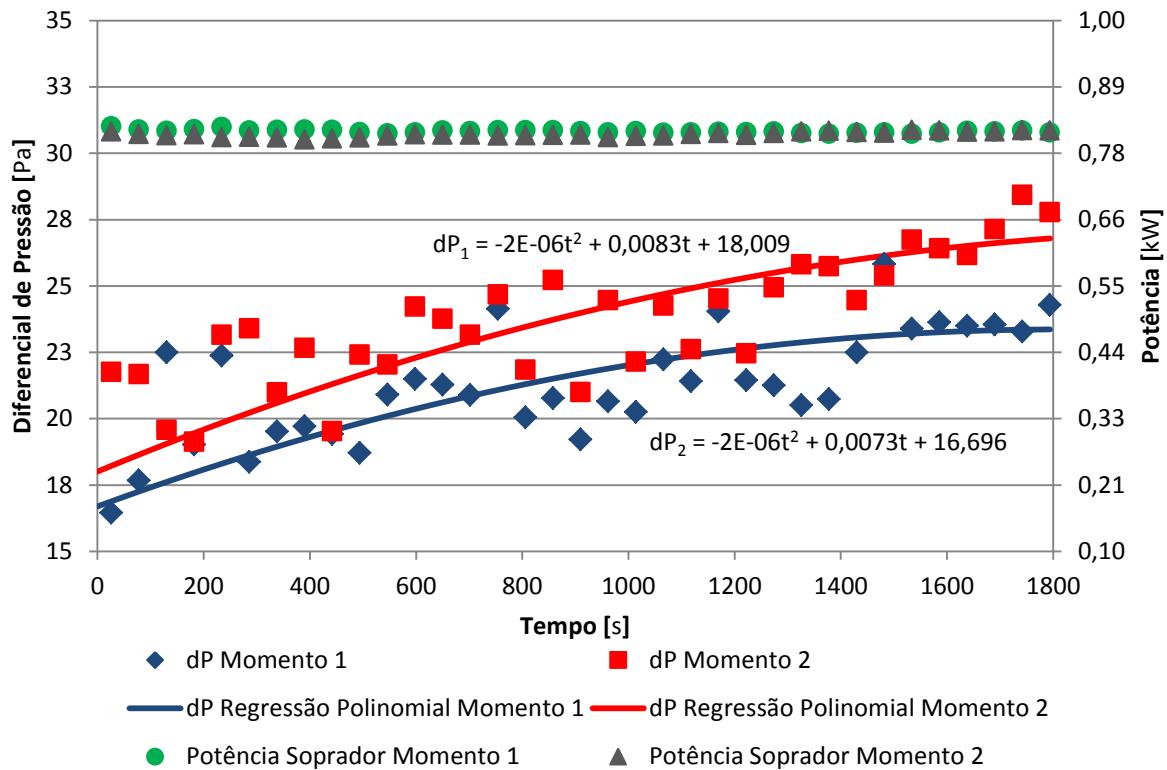


Figura 5.8 – Diferencial de pressão no forno e potência do soprador nos momentos 1 e 2.

Observa-se na Figura 5.8 que a potência fornecida pelo soprador manteve-se praticamente constante em 800 Watts em ambos os momentos 1 e 2. No entanto o mesmo não aconteceu com a pressão experimental. Neste caso, por meio de uma regressão polinomial aplicada aos pontos, verificou-se que a pressão no momento 2 foi maior que aquela medida no momento 1. Ressalta-se que outros testes experimentais foram realizados para confirmar a potência a correlações encontradas para a pressão.

A vazão mássica de ar foi calculada conforme a Eq. (5.10) (ÇENGEL, 2009; White, 2002), sendo o diâmetro da chaminé $\varnothing = 2,6 \cdot 10^{-2} [m]$ e os valores de pressão $dP_i = P_i$ conforme os polinômios apresentados na Fig. 5.8.

$$\dot{m}_i = A \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_i \cdot P_i} \quad (5.12)$$

Onde,

$$A = \frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4} \quad [m^2] \quad (5.13)$$

$$\rho_i = \frac{P}{R \cdot T_{chaminé}} = \frac{91,992 \cdot 10^3}{287 \cdot (273,15 + T_{chaminé})} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (5.14)$$

onde, P representa a pressão local e R a constante do ar. $i = 1,2$: conforme os Momentos 1 e 2, respectivamente.

A Figura 5.9 apresenta as entalpias de entrada e saída do forno, bem como a vazão mássica nos momentos 1 e 2, calculadas a partir do algoritmo computacional apresentado na Fig. 5.6.

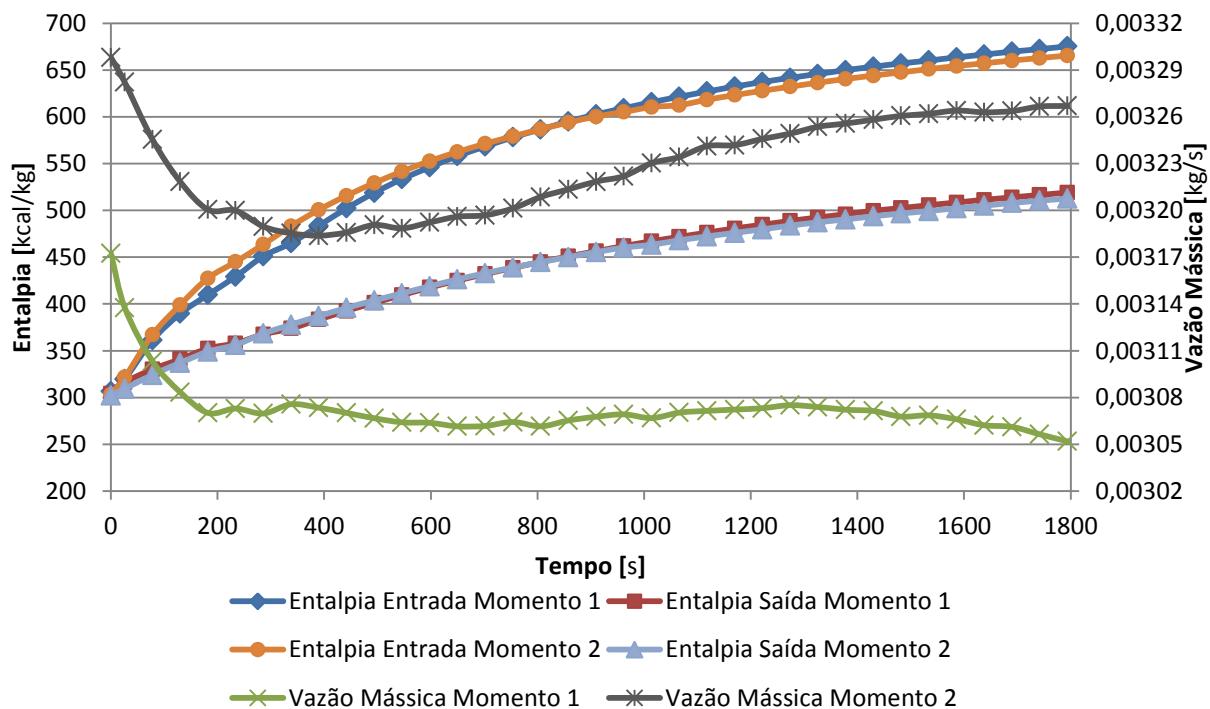


Figura 5.9 – Entalpia e vazão mássica transiente nos momentos 1 e 2.

Nota-se na Figura 5.9 que as entalpias se mantivessem praticamente iguais nos momentos 1 e 2. A maior variação identificada foi com relação à pressão diferencial (Fig. 5.8). Logo, a vazão mássica calculada no momento 2 foi bastante superior àquela no momento 1.

A Figura 5.10 apresenta as energias de torrefação de biomassa nos momentos 1 e 2 conforme as Eqs. 5.8 e 5.9, respectivamente.

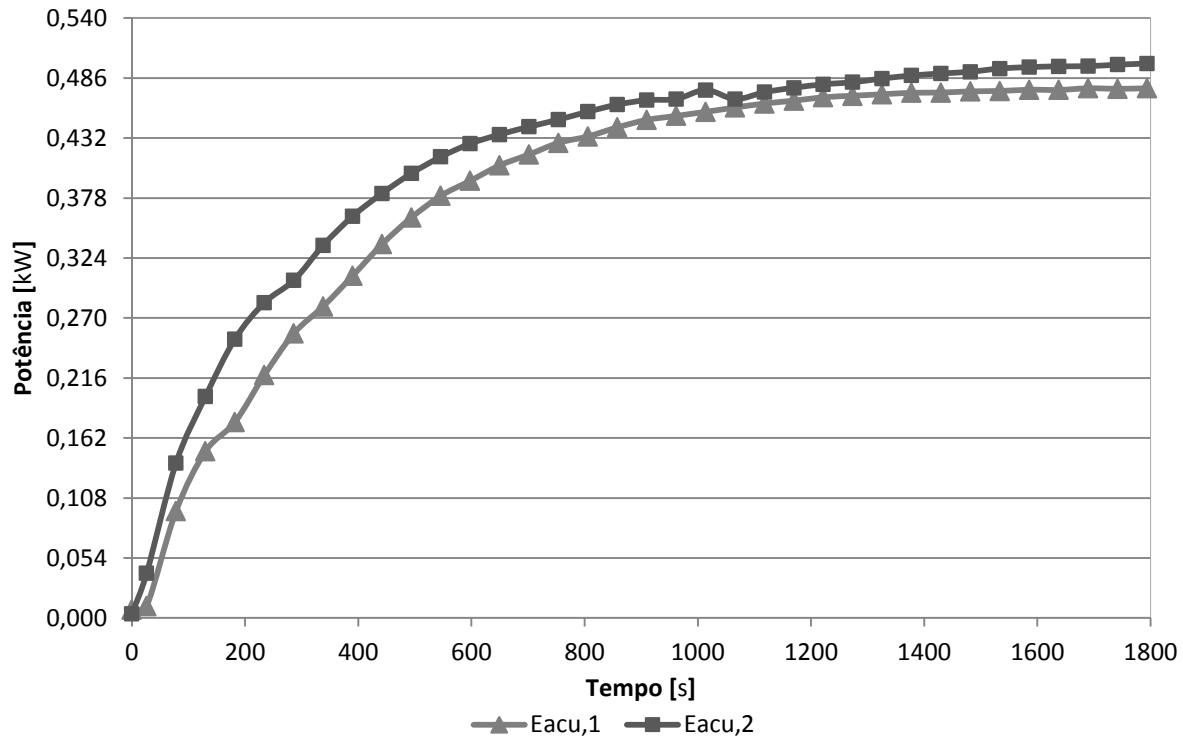


Figura 5.10 – Energia de torrefação acumulada no forno nos momentos 1 e 2.

Como a vazão mássica no momento 2 é superior àquela calculada no momento 1, verifica-se na Fig. 5.10 que a energia de torrefação acumulada no momento 2 se apresenta maior que aquela medida no momento 1. De fato, a energia acumulada no momento 2 tem que ser superior àquela do momento 1, visto que o cilindro está cheio de biomassa que absorve energia durante a torrefação.

A diferença entre as curvas $\dot{E}_{acu,1}$ e $\dot{E}_{acu,2}$ representa a energia transiente necessária para promover a torrefação da biomassa durante 30 minutos. Tal diferença é apresentada na Fig. 5.11.

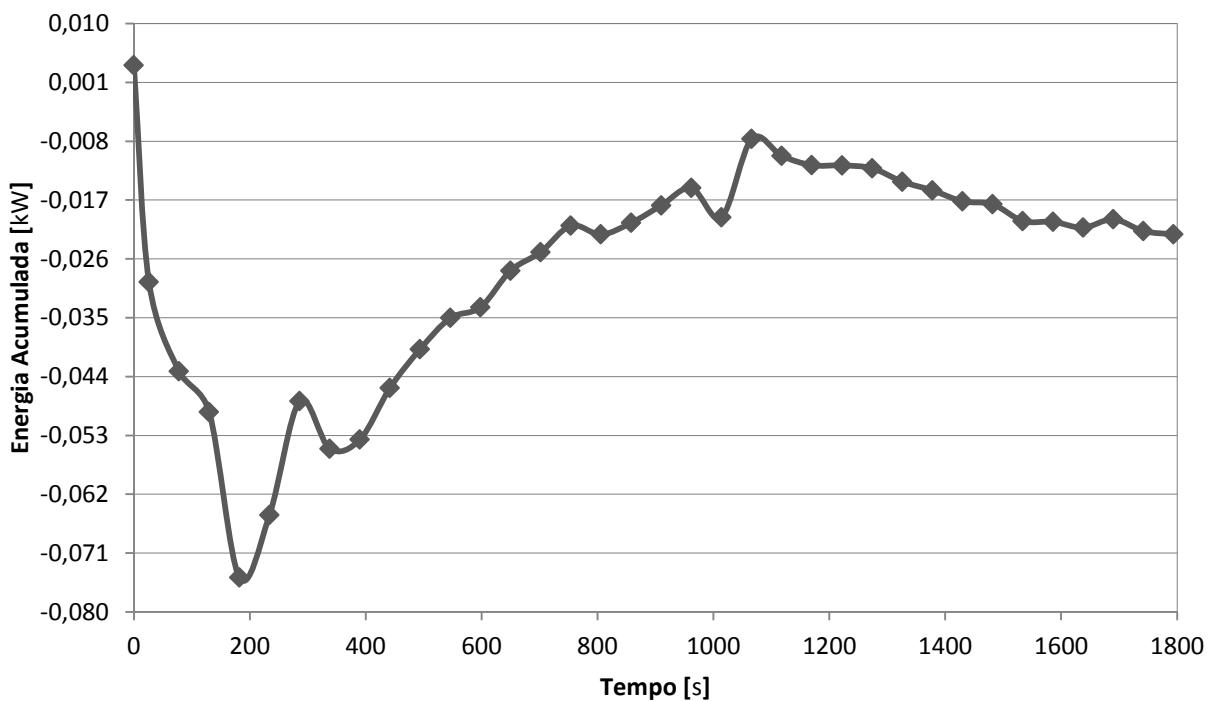


Figura 5.11 – Energia para torrefação da biomassa.

A partir da solução da Eq. (5.10), obtém a área da curva apresentada na Fig. 5.11, que representa a energia necessária para o processo de torrefação do capim braquiária. O valor calculado é apresentado na Tab. 5.1.

Tabela 5.1 – Energia necessária para a torrefação do capim braquiária.

Parâmetro $E_{torrefação}$	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação [%]
[kcal]	10,910	1,073	9,833
[kJ]	45,679	4,492	9,833
[kWh]	0,01269	0,00125	9,833
[kcal/kg de capim]	308,797	29,215	9,461
[kJ/kg de capim]	1292,870	122,319	9,461

Por meio da análise da Tabela 5.1, verifica-se a energia necessária para promover a torrefação de um quilo de capim braquiária, ou seja, $308,797 \pm 29,215$ kcal/kg. Logo, considerando o capim padrão com 8,8% de umidade, cujo poder calorífico superior equivale a 3872,889 kcal/kg e um forno com rendimento térmico de 50% a 80%, a Fig. 5.12

apresenta o consumo de capim braquiária para promover a torrefação de 1 tonelada de biomassa.

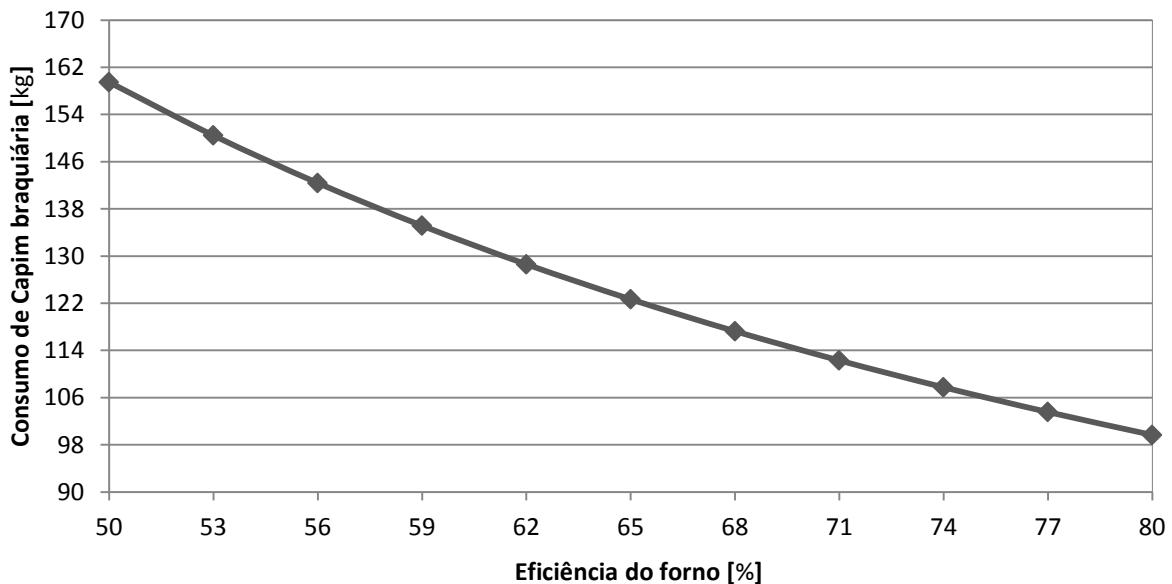


Figura 5.12 – Consumo de capim braquiária em função da eficiência do forno. Valor de referência: torrefação de 1 ton de biomassa.

Na Figura 5.12 verifica-se que o consumo de biomassa para promover a torrefação do capim braquiária diminui com o aumento da eficiência do forno. Ou seja, se a eficiência do forno for de 50% ou 80%, o consumo de capim será de 159,466 kg (16%) ou 99,666 kg (10%). Nota-se que o consumo de biomassa nesse tratamento térmico é relativamente baixo, portanto, pode-se considerar que é uma prática viável para empresas deste setor. Assim, seria possível produzir e comercializar briquete de capim braquiária torrificado, com alto potencial energético e baixo teor higroscópico.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

O presente trabalho foi dividido basicamente em três etapas: na primeira analisou-se e definiu-se o potencial energético de briquetes de palha de capim braquiária desintegrado e triturado; na segunda, aplicou-se um tratamento térmico na biomassa, denominado torrefação, como alternativa para a valorização energética do produto padrão. Na terceira e última etapa foi desenvolvido um estudo térmico do processo de torrefação para definir o gasto energético para promover o tratamento térmico do capim padrão.

A caracterização e análise dos produtos padrão e torrificado foram realizadas por meio da análise imediata, densidade aparente, densidade à granel, poder calorífico, densidade energética e finalmente a perda de massa durante combustão da biomassa. Os resultados obtidos no presente trabalho foram comparados a valores disponíveis na literatura científica para diversos tipos de biomassa, dentre as quais se destacam: bagaço de cana, casca de arroz, eucalipto e lenha comercial.

Por meio da análise imediata do produto padrão obteve-se 8,827% para o teor de umidade, 72,808% para o teor de materiais voláteis, 7,588% para o teor de cinzas e 19,610% para o teor de carbono fixo. Para o poder calorífico superior e inferior, ambos em base seca, obtiveram-se experimentalmente, por meio de uma bomba calorimétrica 4184,167 kcal/kg e 3920,396 kcal/kg, respectivamente. Com relação ao poder calorífico superior e útil da amostra com 8,827% de umidade, encontrou-se 3872,889 kcal/kg e 3522,603 kcal/kg, respectivamente.

Em relação à influência da umidade no poder calorífico do produto padrão, verificou-se que o poder calorífico diminui com o aumento do teor de umidade na biomassa. No

presente trabalho, considerando a variação de umidade de 0 a 60%, verificaram-se variações de 4184,164 kcal/kg a 1776 kcal/kg e 3920,396 kcal/kg a 1216,465 kcal/kg para o poder calorífico superior e útil, respectivamente.

Verificou-se ainda que quanto maior o teor de umidade, maior será a densidade à granel. Para o produto padrão seco obteve-se 277,838 kg/m³, enquanto que em amostras padrão com 8,827% de umidade obteve-se 300,692 kg/m³. Além disso, com o processo de briquetagem do capim a densidade tem um aumento 3,668 vezes.

A densidade energética encontrada foi de 1164,547 Mcal/m³ para o produto padrão comercial com umidade de 8,827% e 3,668 vezes superior para o briquete de capim braquiária com mesmo teor de umidade.

O tratamento térmico de torrefação foi adotado na busca pela valorização energética do briquete. E diferença de tonalidade nas amostras com o aumento da temperatura e tempo de torrefação foi notada e mostrou que a tendência dos produtos torrificados é a de se aproximarem das características do carvão vegetal.

Em relação ao rendimento gravimétrico, notou-se que a torrefação à 220°C e 240°C proporcionou variações mais notáveis, em torno de 100% a 84,52% para 220°C e de 99,78% a 72,62% para 240°C.

Na análise da densidade à granel dos produtos torrificados não foram constadas variações quando comparada à densidade do produto padrão. Ou seja, o processo de torrefação praticamente não altera a densidade da biomassa.

A análise de higroscopicidade verificou-se que a torrefação do capim padrão seco reduz inicialmente o poder calorífico, devido à liberação de materiais voláteis. Com o aumento do tempo de aquecimento o poder calorífico aumenta, indicando reações de transformação que promovem o retorno dos gases para a estrutura do capim.

No caso do capim submetido à análise higroscópica, verifica-se que a amostra padrão seca absorve grande quantidade de umidade, cerca de 22%, o que proporciona uma redução em seu poder calorífico de aproximadamente 22%. Com o aumento do tempo de torrefação, verifica-se que após 30 min à 240°C, o capim padrão torrificado absorve uma quantidade menor de umidade, aproximadamente 13% e que seu poder calorífico se torna mais uniforme, variando apenas 4%. Tais características confirmam que o capim padrão se torna menos higroscópico quando submetido a um processo de torrefação adequado, no entanto, com a torrefação a 240°C e tempo de aquecimento de 30min, o produto final possui poder calorífico superior em base seca (3828,0kcal/kg) similar ao do produto padrão (3872,889kcal/kg) com teor de umidade de 8,827%.

Comparando-se a análise imediata do produto menos higroscópico com a do produto padrão, verificou-se que o teor de carbono aumentou em 20,42% e o teor de materiais

voláteis diminuiu em 4,24%. Tais características confirmaram que um processo de torrefação adequado agrega potencial energético ao capim braquiária.

Na avaliação do comportamento do capim braquiária na combustão observou-se que o briquete de capim e o capim padrão apresentam perda de massa semelhante durante o processo de combustão. Neste caso, conclui-se que a compactação do capim não tem influência em sua perda de massa durante a combustão. Ressalta-se que na combustão de ambos não foi detectada a presença de chama. Além disso, verificou-se uma grande quantidade gases que foram liberados durante todo o processo. Já o capim padrão torrificado apresenta maior perda de massa durante o processo de combustão, similar à combustão de briquete de folha de eucalipto desintegrado e triturado, biomassa de grande uso em caldeira e fornos industriais. Ressalta-se que na combustão do briquete de folha de eucalipto desintegrado e triturado e do capim padrão torrificado foi constatada a presença de chama. Além disso, destaca-se a pequena quantidade de gases liberados durante a combustão de ambos.

De uma forma geral, a combustão do briquete de folha de eucalipto e do capim padrão torrificado ocorreu de forma mais homogênea, enquanto que a combustão do produto padrão seco e com certo teor de umidade foi bastante heterogênea. Assim, conclui-se que o processo de torrefação realmente agregou potencial energético ao produto padrão, com impacto direto no briquete, aprimorando sua densidade energética, reduzindo sua higroscopidez, proporcionando uma combustão mais homogênea em caldeiras e fornos.

A partir de um balanço de energia e análise térmica do processo de torrefação, verificou-se que a energia necessária para promover a torrefação do capim braquiária à 240°C com tempo de aquecimento de 30min foi de 308,797kcal/kg. Neste caso, nota-se que o consumo de energia foi relativamente pequeno, portanto, pode-se considerar tal prática viável para empresas deste setor. Assim, seria possível produzir e comercializar briquete de capim braquiária torrificado, com alto potencial energético e baixo teor higroscópico.

Cabe salientar que diversas dificuldades foram encontradas no decorrer deste trabalho, dentre as quais são destacadas: dificuldades quanto à preparação das amostras do briquete de capim braquiária para a análise imediata, a construção e instrumentação da bancada de torrefação e as incertezas relacionadas à medição das temperaturas e pressão durante o tratamento térmico.

Na sequencia, são apresentadas as seguintes propostas para dar continuidade a este trabalho:

- Realizar a torrefação para temperaturas e tempos de aquecimento superior a 240°C e 40min. Assim, seria possível comprovar que o poder calorífico do

capim carbonizado pode ultrapassar o poder calorífico do produto padrão seco e comprovar que, após certa temperatura ou tempo de aquecimento, o produto se torna carvão vegetal com alto teor higroscópico;

- Realizar o processo de torrefação na empresa parceira deste projeto de pesquisa e gerar briquetes de capim braquiária torrificado;
- Comparar a combustão de briquetes torrificados em escala real com a de briquetes padrão;
- Definir o índice de combustão de amostras de briquete de capim braquiária padrão e de briquete de capim braquiária submetidos a diferentes tratamentos térmicos para avaliação de desempenho durante a queima. Tal índice também é utilizado para classificar e comparar a qualidade de diferentes briquetes durante a combustão;
- Realizar a análise de termogravimetria e comparar com o índice de combustão no capim padrão e torrificado;
- Analisar os gases e fumos provenientes da combustão do briquete de palha de capim braquiária padrão e torrificada para definir a proporção de ar/combustível que proporciona a melhor eficiência energética.
- Em relação à análise e balanço energético, deve-se aprimorar a bancada e o forno de torrefação para operar em regime permanente.
- Sugere-se finalmente aumentar o diâmetro da chaminé para se garantir escoamento laminar em seu interior. Por meio da análise do número do Reynolds, constatou-se que o diâmetro adotado neste trabalho é inadequado, pois o escoamento é caracterizado como turbulento, o que justifica o diferencial de pressão, apresentado na Fig. 5.8.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, I. C. N. **Potencial da Madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage Visando à Produção de Celulose Kraft.** 2010. 62f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM E711-87: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter,** 2004, 8 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM E775: Standard Test Methods for Total Sulfur in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel,** 2008, 4 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM E777: Standard Test Method for Carbon and Hydrogen in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel,** 2008, 5 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM E778: Standard Test Methods for Nitrogen in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel,** 2008, 5 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM E870-82: Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels,** 2006, 2 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM E871-82: Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels,** 2006, 2 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM E872: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels,** 2006, 3 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM E1755 – 01: Standard Test Method for Ash in Biomass,** 2007, 3 p.

AMODEI, J. **Avaliação do Processo de Carbonização da Empresa Saint Gobain Ltda** 2008. Monografia de Graduação – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro,

Seropédica. Disponível em: <http://www.if.ufrj.br/inst/monografia/Juliana_Amodei.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2012.

ASSIS, C. F. C. **Caracterização de Carvão Vegetal para sua Injeção em Altos Fornos a carvão vegetal de pequeno porte.** 2008. 113 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6922: Carvão Vegetal - Ensaios Físicos Determinação da Massa Específica (Densidade à Granel).** Rio de Janeiro, 1981. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 6923: Carvão Vegetal – Amostragem e Preparação da Amostra.** Rio de Janeiro, 1981. 15p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 8112: Carvão Vegetal - Análise Imediata - Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 1986. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 8633: Carvão Vegetal – Determinação do Poder Calorífico – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 1984. 13p.

BARCELLO, D. C. **Forno Container para Produção de Carvão Vegetal: Desempenho, Perfil Térmico e Controle de Poluição.** 2002. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

BERGMAN, P.C.A.; A.R. BOERSMA; J.H.A. KIEL; M.J. PRINS; K.J. PTASINSKI; F.J.J.G. JANSSEN. **Torrefaction for Entrained-flow Gasification of Biomass.** Petten, Netherlands: ECN-RX-04-029, 2004, Netherlands. 78-82p. Disponível em: <<http://www.ecn.nl/docs/library/report/2004/rx04029.pdf#page=78>> Acesso em: fev. 2013.

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.

BHATTACHARYA, S.C. **Fuel for Thought, Renewable Energy Word.** Renewable Energy World, Oxford, v. 7, n. 6, p. 122-130, 2004.

BORGNAKKE, CLAUS; SONNTAG, RICHARD E. **Fundamentos da Termodinâmica / Série Van Wylen.** Tradução da 7^a Edição Americana. São Paulo: Blucher, 2009. 661p.

BRAND, MARTHA A.; MUNIZ, G. I.; VALIN, M.; QUIRINO, WALDIR F. **Influência da Pressão e Material nas Propriedades de Briquetes de Biomassa Florestal.** 1º Congresso Brasileiro sobre Florestas Energéticas. 02 a 05 de junho, 2009. Belo Horizonte, Minas Gerais.

BRIANE, D.; DOAT, J. **Guide Technique de la Carbonisation: la Fabrication du Charbon de Bois.** Aix-en-Provence, ÉDISUD, 1985. 180p.

BRICARBRAS. **Unidade de Produção de Carvão Vegetal.** Disponível em: <<http://www.bricarbras.com/carvaovegetal.php>>. Acesso em: 6 mai. 2013.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Usos Diretos e Propriedades da Madeira para Geração de Energia.** Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr052.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2013.

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G., VITAL, B. Rocha; BARCELOS, D. Câmara. **Construção de um Sistema de Queima de Gases da Carbonização para Redução da Emissão de Poluentes.** Cerne, Lavras, v. 16, Suplemento, p.115-124, jul. 2010.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática.** 3.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2009. 902p.

CIAMPI, G. J. SANTOS. **Desenvolvimento de um Calorímetro para a Determinação do Conteúdo Energético de Combustíveis Sólidos.** 1992. 84 p. Dissertação de Mestrado – Universidade de Campinas, Campinas.

COLOMBO, S. F. O; PIMENTA, A. S; HATAKEYAMA, K. **Produção de Carvão Vegetal em Fornos Cilíndricos Verticais: um Modelo Sustentável** Anais SIMPEP 2006.

DPC BIOMASSA. **Utilização Da Biomassa Na Indústria Siderúrgica** Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/Processo%20DPC%20de%20Carvoejamento%20-%20Sidney%20Pessoa.pps>> Acesso em 22 jul 2012.

FARINHAQUE, R. **Influência da Umidade no Poder Calorífico da Madeira de Bracatinga (*Mimosa scabrella, Benth*) e Aspectos Gerais da Combustão.** Curitiba: FUPEF, 1981. (Serie Técnica n°6).

FERNANDES, M. C. **Avaliação Tecno-Econômica da Gaseificação do Capim-Elefante para Eletrificação Rural.** 2000. 77p. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

FIGUEIRA JR, E. A. **Projeto Industrial para Aeração Automática de Leiras de Compostagem Orgânica.** 2012. 86f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

FIGUEIREDO, C. K. F. **Análise Estatística do Efeito da Pressão na Carbonização da Madeira de *Eucaliptus Grandis*.** 2009. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Brasília.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P.D. **Comportamento da Madeira a Temperaturas Elevadas.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v.9, n.4, p. 157-174, out./dez. 2009.

FILIPPETTO, D. **Briquetagem de Resíduos Vegetais: Viabilidade Técnico-Econômica e Potencial de Mercado.** 2008. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

FONSECA FELFI, FELIX ELIECER. **Melhoramento das Características Energéticas de Resíduos de Biomassa através da Torrefação.** 1999. 110 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

FONSECA FELFI, FELIX ELIECER. **Torrefação de Biomassa, Viabilidade Técnica e Potencial de Mercado.** [s.n.], 2003. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GOMES, B. L.; MARTELLI, F. H.; SILVA, W. T. L. **Caracterização Físico-Química e Morfológica de Biomassa de Capim-Elefante, Capim-Mombaça, Brachiaria, Sorgo-Embrapa e Bagaço de Cana-de-Acuçar.** III Symposium on Agricultural and Agroindustrial Waste Management. March 12-14, 2013. São Pedro, SP, Brazil.

GOMES, P. A; OLIVEIRA, J. B. **Teoria da Carbonização da Madeira.** In: PENEDO, W. R. (Comp.). **Uso da madeira para fins energéticos.** Belo Horizonte: CETEC, 1980. 158 p. (Série Publicações Técnicas, n.1).

GONÇALVES, J. E. **Avaliação Energética e Ambiental de Briquetes Produzidos com Rejeitos de Resíduos Sólidos Urbanos e Madeira de *Eucalyptus Grandis*.** 2010. 104 f. Tese de Doutorado - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

GONÇALVES, JOSÉ E.; SARTORI, MARIA M.; LEÃO, ALCIDES L. **Energia de Briquetes Produzidos com Rejeitos de Resíduos Sólidos Urbanos e Madeira de *Eucalyptus Grandis*.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, n.5, p.657-651, 2009.

INCROPERA, F. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa.** 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.643p.

LEB/FUPEF/UFPR - Laboratório de Energia de Biomassa da Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná conveniada com a Universidade Federal do Paraná. **Resultados Médios para Parâmetros Avaliados na Amostra de Carvão Vegetal (Briquete de Brachiaria).** Curitiba, 11 fev. 2009. 1p. Relatório Técnico (não publicado).

LIMA, E. ALVES; ABDALA, E. M.; WENZEL, A. APARECIDO. **Influência da Umidade no Poder Calorífico Superior da Madeira.** Comunicado Técnico 220 – ISSN 1514-5030. Dezembro de 2008. Colombo, Paraná.

LIPPEL. **Biomassa.** Disponível em: <<http://www.lippel.com.br/br/biomassa.html>>. Acesso em: 2 set. 2012a.

LIPPEL. **Secador Rotativo de Biomassa** Lippel. Disponível em: <<http://www.lippel.com.br/br/secadores-rotativos.html>>. Acesso em: 2 set. 2012b.

MATHWORKS. **Matlab Central: Ideal Air Properties.** [Online] 2012. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25030>>. Acesso em: 12 jul. 2012.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Matriz Energética Nacional 2030 / Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética.** Brasília, MME, EPE, 2007. p.354. Disponível em:

<http://www.mme.gov.br/spe/galerias/arquivos/Publicacoes/matriz_energetica_nacional_2030/MatrizEnergeticaNacional2030.pdf> Acesso em: set. 2012.

MME - Ministério de Minas e Energia. **Tabelas Completas: Poder Calorífico, Densidade e Fatores de Conversão - Série Histórica - 1970 a 2011.** Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html>. Acesso em: nov. 2012.

OLIVEIRA, R. L. M. **Instrumentação e Análise Térmica do Processo de Produção de Carvão Vegetal.** 2009. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. **Conceitos de Processo e Equipamentos de Secagem.** Campinas, mar. 2007. Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/manuais/concproceqsec_07.pdf> Acesso em: out. 2012.

PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; REZENDE, R. N.; ASSIS, C. O.; BALIZA, A. E. R. **Produção e Avaliação de Briquetes de Resíduos Lignocelulósicos.** Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v.31, n.66, p.103-112, abr/jun. 2011.

PINCELLI, A. L. P. M. S. **Características dos Resíduos da Colheita de Madeira de Eucalipto e Pinus, Submetidos ao Tratamento Térmico, com Foco na Aplicação Energética.** 2011. 126p. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PINHEIRO, G. F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J. T. **Densidade Energética de Resíduos Vegetais.** Disponível em: <<http://www.ufpa.br/gedae/BIOMASSAENERGIA2006.pdf>> Acesso em: dez. 2012.

PINHEIRO, P.C.C.; VIANA, E.; REZENDE, M. E. A.; SAMPAIO, R. S. **A Produção de Carvão Vegetal: Teoria e Prática.** 1.ed. Belo Horizonte: Edição do autor, 2006.

PROTÁSSIO, T. P.; ALVES, I. C. N., TRUGILHO, P. F., SILVA, V. O., BALIZA, A. E. R. **Compactação de Biomassa Begetal visando à Produção de Biocombustíveis Sólidos.** Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v.31, n.68, p. 273-283, 2011.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e Índice de Combustão de Briquetes de Carvão Vegetal.** Brasília: IBAMA, LPF, 1991. 18p. (Série Técnica, 13).

QUIRINO, W. FERREIRA; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. SILVA; AZEVEDO, A. C. SANTOS. **Poder Calorífico da Madeira e de Resíduos Lignocelulósicos.** Revista Biomassa & Energia, v.1, n.2, p. 173-182, 2004.

RENDEIRO, GONÇALO. **Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida.** (Soluções energéticas para a Amazônia). 1.ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. 193p.

REZENDE, M. E. **Tecnologia para Produção de Carvão Vegetal.** Seminário Interno CAF - CARBONIZAÇÃO. Itabirito, Minas Gerais, 2007.

ROCHA, E. P. A.; SOUZA, D. F.; DAMASCENO, S. M. **Estudo da Viabilidade da Utilização de Briquete de Capim como Fonte Alternativa de Energia para Queima em Alto Forno.** In: VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 27 – 30 jun. 2009. Uberlândia, MG, Brasil.

RODRIGUES, T. O. **Efeitos da Torrefação no Condicionamento de Biomassa para Fins Energéticos.** 2009. 71p. Dissertação de - Universidade de Brasília, Brasília.

SAMPAIO, R. MELLO, M. G. (org.) **Biomassa: Energia dos Trópicos em Minas Gerais –** Belo Horizonte: LabMídia, 2001, pg. 164. SBS. Sociedade Brasileira de Silvicultura. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br>> Acesso em: jan. 2010.

SANTOS, S. F. O. M. **Produção de Carvão Vegetal em Cilindros Metálicos Verticais: Alguns Aspectos Referentes à Sustentabilidade.** 2007. Dissertação de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa.

SILVA, C. A. **Estudo Técnico Econômico da Compactação de Resíduos Madeireiros para Fins Energéticos.** 2007. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas.

SILVA, D. A.; YAMAJI, F. M.; PADUA, F. A.; PIRES, A. A . F.; WANDERLEY, C. W. C. **Briquetes como Forma de Gestão dos Resíduos de Arborização Urbana.** 7º CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA. CENTRO DE EXPOSIÇÕES IMIGRANTES, 30 out. / 01 nov. 2012, São Paulo. Anais.

SILVA, D. A.; MULLER, B. V.; KUIASKI, E. C.; CUNHA, A. B. **Caracterização Energética do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage.** Disponível em: <<http://malinovski.com.br/CongressoFlorestal/Trabalhos/05-Silvicultura/SIL-Artigo-36.pdf>>. Acesso em: mar. 2013.

SILVA, S. F.; FERRARI, J. L. **Descrição Botânica, Distribuição Geográfica e Potencialidades de Uso da *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex. A. Rich) Stapf.** Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer – Goiânia, v.8, n.14, p.302. 2012.

SILVA, M. B.; MORAIS, A. S. **Avaliação Energética do Bagaço de Cana em Diferentes Níveis de Umidade e Graus de Compactação.** In XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável, 9, 13 a 16 de outubro de 2008, Rio de Janeiro – Rio de Janeiro – Brasil.

SOBRINHO, M. B. G.; VILAS BOAS, M. A.; ARAÚJO, S. O. GOMIDE, C. R.; CARNEIRO, A. C. **Produção de Briquetes a partir de Madeira Tratada Termicamente.** XIII EBRALEM - ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 23 a 25 de julho de 2012, Vitória.

SOUZA, M. M.; SILVA, D. A.; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R. C. **Estimativa de Poder Calorífico e Caracterização para Uso Energético de Resíduos da Colheita e do Processamento de *Pinus taeda*.** Revista Floresta, Curitiba, PR, v.42, n.2, p.325-334, abr./jun. 2012.

VALIN, M.; CASAGRANDE, N.; BRAND, M. ANDREA; BELLOTE, A. F. JURADO. **Estudo das Propriedades Físicas e Mecânica em Briquetes de Resíduos Celulósicos.** IX EVINCI. 20 a 21 de outubro de 2010. Colombo, PR, Brasil.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. **Perspectivas do Setor de Biomassa de Madeira para a Geração de Energia.** Papel e Celulose. BNDES Setorial 33, p.261-314. Disponível em: <http://www.bnDES.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bnDES_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3308.pdf>. Acesso em: mar 2013.

VILAS BOAS, M. A. **Efeito do Tratamento Térmico da Madeira para Produção de Briquetes.** 2011. 65f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

WALKER, ELIANA. **Estudo da Viabilidade Econômica na Utilização de Biomassa como Fonte de Energia Renovável na Produção de Biogás em Propriedades Rurais.** 2009. 107f. Dissertação de Mestrado – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

WHITE, F.M. **Mecânica dos fluidos.** 4.ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2002. 570p.

ANEXO I

Algoritmo Computacional em Matlab®

```
%INÍCIO
%Programa Energia FTOR

function [Et]=torrefacao(Vo1,Vo2)
%Função Principal
clc
close all

%Lendo o Arquivo de Dados
load 'mod01.dat'; t=mod01(:,1);%tempo

[Pitot1]=varpressao1(Vo1); %Vazão Mássica Modo1
[Pitot2]=varpressao2(Vo2); %Vazão Mássica Modo2
[Ct]=ajusteentalpia(); %Correção Entalpia

[m1,E1]=torrefacaomod01(t,Pitot1,Ct);%Potência Modo 1
[m2,E2]=torrefacaomod02(t,Pitot2,Ct);%Potência Modo 2

%Gráfico Potência Modo1 e Modo2 versus tempo
figure(6);
hold on;
plot(t,m1.*E1,'s-r','MarkerSize',4);
plot(t,m2.*E2,'s-g','MarkerSize',4);
hleg6=legend('modo1 [kW]','modo2 [kW]'); grid on

E= (m1.*E1)-(m2.*E2); %Potência [kW]

Et=trapz(t,E); %Energia[kJ]

%Gráfico Potência versus tempo
figure(7);
hold on;
plot(t,E,'s-r','MarkerSize',4);
hleg7=legend('energia torrefação [kJ]'); grid on

function [m,E]=torrefacaomod01(t,Pitot1,Ct)
%Função Modo 1
%Lendo o Arquivo de Dados
load 'mod01.dat';

%Gráfico Pitot1 versus tempo
figure(1);
hold on;
plot(t,Pitot1,'s-r','MarkerSize',4);
hleg1=legend('Variação Pressão1 [Pa]'); grid on

%Regressão Pressão
coefpressao=polyfit(t,Pitot1,2);
```

```

Pitot_Equacao=polyval(coefpressao,t);

%Gráfico Regressão Pressão versus tempo
figure(1);
hold on;
plot(t,Pitot_Equacao,'s-r','MarkerSize',4);
hleg1=legend('Variação Pressão [Pa]'); grid on

Pitot= Pitot_Equacao;

%Massa Específica do Ar
Tch= modo1(:,5)+273.15;
ro= 91.992e+03./(287*Tch); %Pressão Uberlândia = 91.992e+03Pa

%Velocidade do Ar
V=sqrt(abs(2*Pitot./ro));
Diam= 26.0e-03;

%Vazão Mássica
m= ro.*V*(pi*Diam^2/4);

%Gráfico Vazão Mássica versus tempo
figure(2);
hold on;
plot(t,m,'s-r','MarkerSize',4); grid on
hleg3=legend('Vazão Mássica 1[kg/s]');

%Entalpia de Entrada e Saída [kJ/kg]
Te= modo1(:,3)+273.15; he=polyval(Ct,Te);
Ts= modo1(:,4)+273.15; hs=polyval(Ct,Ts);

%Gráfico Entalpias verus tempo
figure(3);
hold on;
plot(t,he, 's-r','MarkerSize',4);
plot(t,hs,'o-b','MarkerSize',3);
hleg4=legend('he [kJ/kg]', 'hs [kJ/kg]'); grid on

E= he-hs;

%Energia Total Imposta ao Sistema
corrente= modo1(:,7); tensao= modo1(:,8);
Qe= tensao.*corrente*100/22000;

%Gráfico Calor Fornecido versus tempo
figure(4);
hold on;
plot(t,Qe, 's-r','MarkerSize',4); grid on
hleg5=legend('Potência Fornecida [kW]');

%Gráfico Temperaturas versus tempo
Tchi=modo1(:,2); Te=modo1(:,3); Ts=modo1(:,4);
figure(8);
hold on;
plot(t,Tchi, 's-b','MarkerSize',4);
plot(t,Te, 's-g','MarkerSize',4);
plot(t,Ts, 's-r','MarkerSize',4); grid on

```

```

hleg9=legend('Temperatura Chicana [°C]', 'Temperatura Entrada [°C]', 'Temperatura Saída [°C]');

function [m,E]=torrefacaomodo2(t,Pitot2,Ct)
%Função Modo 2
%Lendo o Arquivo de Dados
load 'modo2.dat';

%Gráfico Pitotl versus tempo
figure(1);
hold on;
plot(t,Pitot2,'s-b','MarkerSize',4);
hleg1=legend('Variação Pressão2 [Pa]'); grid on

%Regressão Pressão
coefpressao=polyfit(t,Pitot2,2);
Pitot_Equacao=polyval(coefpressao,t);

%Gráfico Regressão Pressão versus tempo
figure(1);
hold on;
plot(t,Pitot_Equacao,'s-b','MarkerSize',4);
hleg1=legend('Variação Pressão2 [Pa]'); grid on

Pitot= Pitot_Equacao;

%Massa Específica do Ar
Tch= modo2(:,5)+273.15;
ro= 91.992e+03./ (287*Tch); %Pressão Uberlândia = 91.992e+03Pa

%Velocidade do Ar
V=sqrt(abs(2*Pitot./ro));
Diam= 26.0e-03;

%Vazão Mássica
m= ro.*V* (pi*Diam^2/4);

%Gráfico Vazão Mássica versus tempo
figure(2);
hold on;
plot(t,m,'s-b','MarkerSize',4); grid on
hleg3=legend('vazão mássica [kg/s]');

%Entalpia de Entrada e Saída [kJ/kg]
Te= modo2(:,3)+273.15; he=polyval(Ct,Te);
Ts= modo2(:,4)+273.15; hs=polyval(Ct,Ts);

%Gráfico Entalpias verus tempo
figure(3);
hold on;
plot(t,he, 's-g','MarkerSize',4);
plot(t,hs, 'o-m','MarkerSize',3);
hleg4=legend('he [kJ/kg]', 'hs [kJ/kg]'); grid on

E= he-hs;

```

```

%Energia Total Imposta ao Sistema
corrente= modo2(:,7); tensao= modo2(:,8);
Qe= tensao.*corrente*100/22000;

%Gráfico Calor Fornecido versus tempo
figure(4);
hold on;
plot(t,Qe, 's-b', 'MarkerSize',4); grid on
hleg5=legend('Potência Fornecida [kW]');

%Gráfico Temperaturas versus tempo
Tchi=modo2(:,2);
Te=modo2(:,3);
Ts=modo2(:,4);
figure(9);
hold on;
plot(t,Tchi, 's-m', 'MarkerSize',4); grid on
plot(t,Te, 's-y', 'MarkerSize',4); grid on
plot(t,Ts, 's-k', 'MarkerSize',4); grid on
hleg8=legend('Temperatura Chicana2 [°C]', 'Temperatura Entrada2
[°C]', 'Temperatura Saída2 [°C]');

function [Pitot]=varpressao1(Vo1)
%Função Vazão Mássica Modo 1
load 'modo1.dat';%Lendo o Arquivo de Dados
Pitot=modo1(:,6);
Pitot= Pitot-Vo1;
Pitot= 1000.0*Pitot; %Diferencial de Pressão em Pascal

function [Pitot]=varpressao2(Vo2)
%Função Vazão Mássica Modo 2
load 'modo2.dat';%Lendo o Arquivo de Dados
Pitot=modo2(:,6);
Pitot= Pitot-Vo2;
Pitot= 1000.0*Pitot; %Diferencial de Pressão em Pascal

function [Ct]=ajusteentalpia()
%Função Correção Entalpia
T=linspace(-70,340,2000); T=T+273.15; h = IdealAir(T, 'T', 'h');
%Regressão Linear para Minimizar o Erro Entalpia no IdealAir --> 345 a
370°C
Ct=polyfit(T,h,2);

%FIM

```

Função Auxiliar IdealAir (MATHWORKS, 2012)

```

function var=IdealAir(xi,prop1,prop2,unit)
% =====
%
% This program interpolates air properties following the Ideal Gas Law from
% the gas table A22 and A22e in the textbook Fundamentals of Engineering
% Thermodynamics by Moran, Shapiro (6th edition)
%
% Input parameters explained:
% xi: The known parameter, related to property prop1. Can be a single
% integer or a 1-dimensional matrix
% prop1: The known property, related to xi
% prop2: The unknown quantity searched for, related to output desired

```

```

% unit: unit system used, either 'si' for SI units or 'eng' for english
% units. This is OPTIONAL! Leave blank for SI units.
%
% Properties valid for prop1 and prop2
% prop* | units (si) | units (eng) | Description
% -----
% T     | K          | R          | Temperature
% h     | kJ/kg      | Btu/lbm    | Enthalpy
% u     | kJ/kg      | Btu/lbm    | Internal Energy
% pr    | -          | -          | Relative Pressure
% vr    | -          | -          | Relative Volume
% so    | kJ/(kg*K) | Btu/(lbm*R) | Entropy
%
% Examples of the program in use:
% Input: IdealAir(2.5,'so','h')
% Output: h = 664.0107
%
% Input: IdealAir([632,1100,1987],'T','so','eng')
% Output: so = 0.63853   0.77422   0.93023
%
% Written by Jared Miller for Professor Kevin Cole
% Last modified: August 14, 2009
% -Added "load *.mat" function in place of excel reading
% -Made units optional, default to si
%
% =====
%Checks to see the units asked for, then opens the file with appropriate
%units. If the units are undefined, the program defaults to SI units.
unittest=exist('unit','var');
if unittest==0
    load a22si.mat x
else
    if strcmp(unit,'si')==1
        load a22si.mat x
    elseif strcmp(unit,'eng')==1
        load a22eng.mat x
    else
        error('Units not specified correctly. Valid entries: si,eng (lower
case) or leave blank for default si')
    end
end
temp=x;

%Check to see which properties are being asked for and then picks the right
%range for x and y.
if strcmp(prop1,'T')==1
    x=temp(:,1);
elseif strcmp(prop1,'h')==1
    x=temp(:,2);
elseif strcmp(prop1,'pr')==1
    x=temp(:,3);
elseif strcmp(prop1,'u')==1
    x=temp(:,4);
elseif strcmp(prop1,'vr')==1
    x=temp(:,5);
elseif strcmp(prop1,'so')==1
    x=temp(:,6);
else

```

```

    error('Prop1 not specified correctly. Valid entries: T,h,u,pr,vr,so
(case sensitive)')
end
if strcmp(prop2,'T')==1
    y=temp(:,1);
elseif strcmp(prop2,'h')==1
    y=temp(:,2);
elseif strcmp(prop2,'pr')==1
    y=temp(:,3);
elseif strcmp(prop2,'u')==1
    y=temp(:,4);
elseif strcmp(prop2,'vr')==1
    y=temp(:,5);
elseif strcmp(prop2,'so')==1
    y=temp(:,6);
else
    error('Prop2 not specified correctly. Valid entries: T,h,u,pr,vr,so
(case sensitive)')
end

%checks to see that xi lies within the valid range of x
xmax=max(x);
xmin=min(x);
ximax=max(xi);
ximin=min(xi);
if ximax>xmax
    str = num2str(xmax);
    str2 = num2str(ximax);
    error([prop1,' value ',str2,') is too large. Maximum ',prop1,' value
is ',str])
elseif ximin<xmin
    str = num2str(xmin);
    str2 = num2str(ximin);
    error([prop1,' value ',str2,') is too small. Minimum ',prop1,' value
is ',str])
end

%Interpolates using built-in MATALB interpolate function, interp1
IdealAir=interp1(x,y,xi);

%displays on screen (optional step)
%disp([prop2,' = ',num2str(IdealAir)]);
%var=num2str(IdealAir);
var=IdealAir;

```

ANEXO II

Tabela A.1 – Arquivo Experimental (Modo 1.dat)

Tempo	Tchi	Te	Ts	Tch	Pitot	Corrente	Tensão
0	33,249	33,258	30,935	26,622	1,226412	0,016809	108,3754
26	44,073	46,387	42,976	36,794	1,242868	1,706436	105,7898
52	55,165	72,038	50,138	43,613	1,24352	1,697906	105,5039
78	66,469	87,71	56,95	50,651	1,244086	1,697522	105,603
104	77,297	102,695	63,513	56,958	1,246327	1,693363	105,5765
130	87,203	115,695	67,607	61,674	1,248906	1,693686	105,5686
156	94,532	125,3963	73,204	66,06	1,246301	1,700437	105,6931
182	104,493	135,596	78,931	71,273	1,245433	1,696942	105,7543
208	110,277	145,943	80,489	73,432	1,247001	1,696795	105,8135
234	116,291	154,6	84,511	77,117	1,248789	1,711365	105,3537
260	122,355	164,95	88,721	80,072	1,244785	1,696166	105,4346
286	130,985	175,95	93,94	84,111	1,244785	1,696263	105,486
312	133,73	180,562	93,822	85,053	1,249579	1,692685	105,2215
338	141,217	189,656	100,12	88,772	1,245926	1,696153	105,648
364	148,683	197,935	104,89	92,037	1,244358	1,696158	105,7173
390	156,533	207,749	109,547	95,134	1,24612	1,694331	105,804
416	164,195	217,448	114,226	98,838	1,24704	1,69335	105,7187
442	171,663	225,847	118,632	101,581	1,245835	1,694836	105,7413
468	178,934	234,143	122,827	104,871	1,247338	1,693358	105,6847
494	186,279	241,973	127,174	107,865	1,245122	1,689164	105,5642
520	193,011	248,776	131,148	110,875	1,245977	1,690787	105,6189
546	199,686	256,19	135,209	113,76	1,247312	1,688078	105,4038
572	206,134	262,216	139,121	116,764	1,24818	1,68932	105,3961
598	212,235	268,355	143,22	118,876	1,247908	1,690095	105,4371
624	218,227	274,095	146,838	121,826	1,247727	1,691922	105,7453
650	223,921	279,925	150,455	124,285	1,247688	1,692641	105,7396
676	229,373	284,97	153,809	126,6	1,245964	1,690795	105,6233
702	234,899	289,758	157,317	128,843	1,247299	1,691913	105,6148
728	239,763	294,372	160,74	130,97	1,247727	1,693978	105,6845
754	244,577	299,261	163,755	132,578	1,250551	1,693328	105,7721
780	249,522	303,23	166,952	135,444	1,246159	1,691621	105,7162
806	253,943	307,349	170,008	137,517	1,246457	1,692689	105,8309
832	258,304	311,395	172,929	138,99	1,247286	1,693367	105,7392
858	262,717	315,391	175,76	140,493	1,247182	1,693462	105,7286
884	266,662	319,174	178,575	142,299	1,246949	1,694693	105,6872
910	270,754	322,746	181,226	143,611	1,245628	1,690596	105,6982

Tabela A.1 – Arquivo Experimental (Modo 1.dat) (continuação)

936	274,467	325,807	183,86	144,631	1,247519	1,689779	105,7284
962	278,041	329,069	186,584	146,742	1,247066	1,689985	105,4929
988	281,663	332,311	189,141	148,834	1,248776	1,68977	105,552
1014	285,167	335,218	191,574	150,747	1,246664	1,690464	105,7149
1040	288,492	338,245	193,789	151,823	1,246638	1,688392	105,4656
1066	291,787	340,789	196,184	152,908	1,248647	1,688525	105,478
1092	294,744	343,657	198,478	154,292	1,248841	1,689073	105,4522
1118	297,749	346,152	200,552	155,512	1,247817	1,688921	105,5224
1144	300,721	348,692	202,615	157,348	1,248828	1,689929	105,7017
1170	303,599	351,213	204,941	157,993	1,250448	1,690234	105,6232
1196	306,555	353,398	206,884	159,535	1,249865	1,690921	105,6658
1222	309,169	355,887	208,777	160,234	1,247856	1,689816	105,5599
1248	311,705	357,653	210,868	161,423	1,248517	1,68737	105,3935
1274	314,349	360,159	212,783	161,975	1,247662	1,688644	105,7557
1300	316,775	362,057	214,533	163,302	1,250668	1,689526	105,7685
1326	319,28	364,085	216,314	164,381	1,246923	1,688455	105,4456
1352	321,412	365,939	218,285	165,383	1,249256	1,686549	105,4963
1378	323,776	367,956	219,746	166,744	1,247144	1,686471	105,3997
1404	325,885	369,662	221,484	166,809	1,24866	1,682902	105,3379
1430	328,236	371,553	223,308	168,638	1,248906	1,687259	105,5387
1456	330,239	373,103	224,876	169,356	1,248789	1,689012	105,5302
1482	332,151	374,813	226,106	171,134	1,252236	1,687771	105,6291
1508	334,053	376,25	227,782	171,432	1,250616	1,685429	105,3283
1534	336,028	377,807	229,095	172,142	1,2498	1,686685	105,4031
1560	337,929	379,384	230,54	173,15	1,248426	1,687992	105,4346
1586	339,575	381,01	231,877	173,92	1,250046	1,688336	105,5997
1612	341,495	382,386	233,496	175,618	1,249735	1,691803	105,7716
1638	343,13	383,906	234,696	175,862	1,249903	1,691287	105,7496
1664	344,875	385,233	236,066	176,059	1,251899	1,692277	105,849
1690	346,522	386,834	237,167	176,789	1,249955	1,688826	105,791
1716	348,199	388,112	238,647	177,448	1,25107	1,692598	105,8229
1742	349,796	389,432	239,722	178,6	1,249696	1,692461	105,7695
1768	351,535	390,963	241,088	178,894	1,249644	1,688702	105,7982
1794	353,162	392,182	242,151	180,143	1,250694	1,689833	105,4745

Tabela A.2 – Arquivo Experimental (Modo 2.dat)

Tempo	Tchi	Te	Ts	Tch	Pitot	Corrente	Tensão
0	30,476	30,046	28,909	26,026	1,227371	0,017729	107,6056
26	35,401	48,375	36,165	32,536	1,249126	1,70282	104,8977
52	46,709	76,082	43,91	40,132	1,249877	1,69255	104,9594
78	57,58	93,532	50,926	46,71	1,249048	1,690423	105,0574
104	68,381	109,759	57,497	53,027	1,245615	1,687535	105,0052
130	79,254	124,998	63,769	59,272	1,246949	1,688605	104,9243
156	89,688	139,437	69,754	64,718	1,249385	1,689673	105,0263
182	99,851	152,911	75,587	70,06	1,246496	1,688824	105,1177
208	109,919	165,04	81,245	75,17	1,24656	1,686605	105,0923
234	115,657	170,08	82,787	77,081	1,250525	1,683501	104,805
260	124,406	179,192	89,664	81,658	1,248608	1,687992	104,8517
286	132,997	188,26	94,69	86,077	1,250772	1,685658	104,7279
312	141,188	197,908	99,367	90	1,24796	1,682055	104,7931
338	149,059	207,387	104,115	93,638	1,248362	1,682655	104,8166
364	156,783	216,424	108,653	97,358	1,248115	1,681308	104,7129
390	164,311	224,315	113,153	100,394	1,250033	1,679065	104,6099
416	171,508	232	117,39	103,402	1,247364	1,680963	104,6906
442	178,29	238,942	121,702	106,138	1,246897	1,679895	104,7453
468	185,103	245,751	125,672	108,879	1,249683	1,681815	104,8593
494	191,475	252,068	129,643	111,002	1,249787	1,682419	104,7854
520	197,814	258,296	133,509	114,153	1,247571	1,685119	105,0663
546	203,816	263,985	137,081	117,38	1,249411	1,68422	105,1185
572	209,56	269,521	141,113	119,706	1,25037	1,689439	105,219
598	215,252	274,756	144,532	122,093	1,251588	1,687463	105,1865
624	220,649	279,552	148,065	124,656	1,251251	1,687305	105,2794
650	225,865	284,155	151,714	126,635	1,251134	1,686235	105,2436
676	230,683	288,341	154,91	129,579	1,249748	1,686222	105,1648
702	235,502	292,624	158,223	131,688	1,250525	1,687346	105,1538
728	239,912	296,401	161,345	134,29	1,250888	1,686499	105,1079
754	244,168	300,267	164,228	135,644	1,252054	1,684932	105,0892
780	248,277	303,863	167,188	137,507	1,252171	1,685827	105,1434
806	252,362	307,515	169,74	138,652	1,249217	1,684807	105,1352
832	256,154	311,015	172,555	140,585	1,251342	1,686945	105,1247
858	259,916	314,431	175,045	142,078	1,252598	1,685706	105,1644
884	263,529	317,446	177,345	144,221	1,250188	1,685918	105,1963
910	266,913	320,516	180,236	145,279	1,248374	1,686161	105,2442
936	270,288	323,365	182,707	147,298	1,25059	1,681745	104,9441
962	273,757	325,265	184,931	148,682	1,251834	1,682044	104,8999
988	276,911	327,83	187,229	149,749	1,250836	1,682235	104,9859
1014	278,07	330,256	187,925	150,611	1,249515	1,685	105,0237
1040	280,9	331,236	190,44	151,686	1,251342	1,682313	105,0833
1066	283,598	332,261	192,59	153,499	1,251627	1,68397	105,1289

Tabela A.2 – Arquivo Experimental (Modo 2.dat) (continuação)

1092	286,531	335,115	194,509	154,621	1,253713	1,688499	105,3371
1118	289,222	337,749	196,613	155,367	1,249981	1,687355	105,2718
1144	292,104	340,127	198,464	156,861	1,251523	1,686549	105,2968
1170	294,625	342,532	200,317	158,746	1,251899	1,687366	105,4833
1196	297,317	345,11	202,285	159,661	1,251691	1,685708	105,3561
1222	299,952	346,937	204,051	161,041	1,249826	1,68446	105,2215
1248	302,43	349,094	206,051	162,459	1,254646	1,688583	105,2988
1274	304,834	351,105	207,896	163,322	1,252313	1,68747	105,4733
1300	307,193	353,094	209,699	164,699	1,253907	1,689432	105,5703
1326	309,576	355,23	211,289	165,127	1,253182	1,691246	105,6035
1352	311,89	356,881	212,867	166,293	1,251925	1,689558	105,5202
1378	313,98	358,974	214,393	167,385	1,253117	1,691866	105,7377
1404	316,293	360,676	215,986	168,157	1,253778	1,692032	105,6696
1430	318,165	362,468	217,504	169,352	1,251834	1,690017	105,5152
1456	320,306	364,157	218,912	170,377	1,253726	1,689718	105,5222
1482	322,271	365,741	220,486	171,147	1,252767	1,688345	105,5183
1508	324,4	367,644	221,757	172,12	1,253039	1,691324	105,6257
1534	326,376	369,065	223,069	173,072	1,254114	1,69468	105,7785
1560	328,302	370,646	224,795	174,243	1,253829	1,691965	105,5787
1586	330,04	372,169	225,955	174,612	1,253791	1,691502	105,7715
1612	331,775	373,493	227,352	175,556	1,254801	1,69335	105,8236
1638	333,629	375,036	228,613	176,848	1,253531	1,69049	105,5766
1664	335,422	376,605	230,09	177,574	1,254685	1,688919	105,5423
1690	337,149	377,778	231,39	178,391	1,254516	1,690518	105,6514
1716	339,049	379,088	232,565	178,969	1,254399	1,689944	105,5776
1742	340,513	380,335	233,725	179,17	1,255799	1,693126	105,7377
1768	342,066	381,536	234,943	180,071	1,253829	1,691753	105,823
1794	343,86	382,841	236,002	180,482	1,255151	1,692132	105,7297