

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS MADEIREIRO PARA
PRODUÇÃO DE PELLETS**

Rebecca Silva Alcantara

Goiânia, GO
Dezembro/2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS MADEIREIRO PARA
PRODUÇÃO DE PELLETS**

Rebecca Silva Alcantara

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Agronomia da
UFG, como requisito parcial para a
obtenção do título de Engenheira
Florestal.

Carlos Roberto Sette Júnior
(ORIENTADOR)

Goiânia, GO
Dezembro/2017

REBECCA SILVA ALCANTARA

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS MADEIREIRO PARA
PRODUÇÃO DE PELLETS**

Trabalho de Conclusão de Curso Defendido e Aprovado em ___/___/___,
pela Banca Examinadora constituída pelos membros:

Nota: _____ (_____)

Prof. Dr Carlos Roberto Sette Júnior (Orientador)
Membro UFG/ Escola de Agronomia

Prof. Dr. Matheus Peres Chagas
Membro UFG/Escola de Agronomia

Mse. Thammi Queuri Gomes da Cunha
Doutoranda – UFG/Escola de Agronomia

AGRADECIMENTOS

A minha amada mãe, Ana Boa da Silva. Mulher guerreira e minha força motriz que sempre me incentivou e se esforçou para oferecer o melhor aos seus filhos.

Ao meu irmão, Edwelton José da Silva, por sempre estar presente na minha vida como um irmão e pai mesmo com a distância física existente entre nós.

A todos os professores que contribuíram com minha formação em especialmente aqueles que sempre acreditaram em meu potencial.

Ao professor Carlos Roberto Sette Jr., por ter me orientado ao longo de toda a graduação, pelo apoio e suporte dado em diversos momentos do meu percurso acadêmico e pelo espírito jovial de trabalhar.

Aos amigos de vida que me acompanham a anos e também aos amigos Ceuzianos, que estiveram comigo ao longo deste cinco anos dividindo inúmeros aprendizados e até mesmo os últimos mirreiros das bolsas.

Aos companheiros de graduação no qual compartilhamos diversos momentos e experiências ao longo desse trajeto, especialmente a Roxane Magalhães, Talita Castro, Daniel Belarmino, Ygor França, Arthur Müller, Charles Brandão e Jéssica Elias.

Ao meu namorado e companheiro por todo apoio durante essa caminhada, por sempre acreditar em mim e me motivar diante das situações difíceis.

A Universidade Federal de Goiás por proporcionar boas condições para realização desta graduação e demais experiências ligadas ao curso de Engenharia Florestal.

E a todos que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

Os resíduos madeireiros são uma excelente alternativa bioenergética, com grande potencial para a produção de pellets. Dessa forma, foram selecionados, em serraria localizada na cidade de Goiânia/GO, resíduos do desdobro da madeira de *Rhodostemonodaphne dioica*, *Terminalia glabresces* e *Trattinnickia burserifolia* com o principal objetivo de avaliar o potencial da sua utilização por meio da determinação das características energéticas da biomassa (teor de cinzas, materiais voláteis, carbono fixo, poder calorífico, densidade energética) e físico-mecânicas dos pellets (comprimento, diâmetro, densidade aparente, a granel e energética, teor de umidade, durabilidade mecânica e teor de finos) e produzidos em laboratório, com os padrões de qualidade estabelecidos pelas normas internacionais de comercialização de pellets. A avaliação das características energéticas dos resíduos madeireiros indicou que a espécie *R. dioica* é a mais indicada para aplicações energéticas. É possível produzir pellets com os resíduos madeireiro das 3 espécies *T. burserifolia*, *T. glabrescens* e *R. dioica*. Todas as características dos pellets da *R. dioica* atenderam às especificações de qualidade exigidas nas normas internacionais de comercialização, exceto para o poder calorífico inferior.

Palavras – chave: Potencial energético; Densificação da biomassa; Aproveitamento da madeira.

ABSTRACT

Logging waste is an excellent bioenergy alternative, with great potential for pellet production. Thus, residues from the unfolding of the wood of *Rhodostemonodaphne dioica*, *Terminalia glabresces* and *Tratinickia burserifolia* were selected, in a sawmill located in the city of Goiânia / GO, with the main objective of evaluating the potential of its use by means of determination of the biomass energy characteristics (grain content, volatile matter, fixed carbon, calorific value, energy density) and physical-mechanical characteristics of the pellets (length, diameter, bulk density, bulk and energy content, moisture content, mechanical durability and fines content) laboratory, with the quality standards established by international pellet marketing standards. The evaluation of the energy characteristics of the wood residues indicated that the species *R. dioica* is the most suitable for energy applications. It is possible to produce pellets with the wood residues of the three species *T. burserifolia*, *T. glabrescens* and *R. dioica*. All characteristics of *R. dioica* pellets have met the quality specifications required by international marketing standards, except for the lower calorific value

Keywords: Potential energy; Biomass densification; Utilization of wood.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	MATERIAL E MÉTODOS	9
2.1	Coleta e preparo de amostras	9
2.2	Avaliação das características da biomassa.....	9
2.2.1	Densidade a granel	9
2.2.2	Poder calorífico superior	10
2.2.3	Poder calorífico inferior	10
2.2.4	Densidade energética	10
2.2.5	Análise imediata.....	11
2.3	Produção e avaliação dos pellets.....	12
2.4	Parâmetros comerciais de qualidade dos pellets.....	15
2.5	Análise estatística dos dados.....	17
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
3.1	Caracterização da biomassa	17
3.2	Características dos pellets	20
3.3	Classificação dos pellets de acordo com as normas de qualidade	23
4	CONCLUSÕES	27
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

1 INTRODUÇÃO

A comunidade internacional vem empreendendo esforços e ações para a redução da emissão de gases que agravam o efeito estufa, principalmente por meio da implementação de políticas que promovam a diversificação da matriz energética e que estimulem o uso de novas fontes de energia renováveis, em substituição ao uso de energias oriundas de combustíveis fósseis (BANERJEE et al., 2010; STAISS et al., 2011).

Dentro deste contexto, a biomassa é uma das fontes de energia renovável com maior potencial de desenvolvimento nos próximos anos, sendo apontada como uma das principais opções para diversificar a matriz energética e reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, colocando-a no foco da pesquisa mundial para a produção de energia renovável, como por exemplo, por meio do aproveitamento dos resíduos.

A biomassa florestal, para geração de energia, pode ser obtida na colheita, em tratamentos silviculturais, no processamento da madeira ou de florestas energéticas, que tem como finalidade o fornecimento de matéria prima para energia (SPANHOL et al., 2015)

Estima-se que no Brasil a produção de resíduos madeireiros e florestais no ano de 2016 foi de 17.194.000 metros cúbicos (FAO, 2017) e que aproximadamente 40-50% do volume de madeira serrada é transformado em resíduos (COUTO et al., 2004). Decorrente dos crescentes aumentos nos custos dos insumos energéticos, as indústrias têm procurado o aproveitamento dos resíduos industriais e florestais como fonte alternativa de energia (CHEN et al., 2009).

O Brasil é um dos maiores produtores agrícolas e florestais do mundo e a quantidade de biomassa residual representa um depósito de energia que pode ser aproveitado (DIAS et al., 2012). Atualmente existe legislação específica referente a passivos ambientais que exige a gestão adequada dos resíduos: lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), que reúne um conjunto de princípios, metas e ações adotados pelo Governo Federal objetivando a gestão integrada e o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos. Portanto, existe a necessidade de um destino correto dos resíduos gerados pelas indústrias madeireiras fazendo com que os produtores e envolvidos nessa cadeia produtiva busquem alternativas para sua utilização, como por exemplo, a geração de bioenergia através de materiais densificados como os pellets e briquetes.

O processo de compactação da biomassa, através da pelletização ou briquetagem, apresenta como vantagens a redução no volume físico do material devido a compactação, alto

valor e capacidade calorífica por volume, redução de custo com transporte, manuseio, estocagem, aumento da densidade aparente, homogeneização do material combustível (FERNÁNDEZ et al., 2013; GARCÍA et al., 2015).

A produção mundial de pellets apresentou um crescimento acelerado nos últimos anos, passando de 19 para 28 milhões de toneladas no período de 2012 a 2015 (FAO, 2017), principalmente devido ao aumento da demanda criada pelas políticas ambientais e metas de uso de bioenergia na Europa (DUCA et al., 2014). Segundo a Associação Brasileira de Indústria de Pellet (ABIPEL), no Brasil em 2015 haviam quinze indústrias de pellets de madeira, que totalizavam uma produção anual de apenas 80 000 toneladas por ano (QUENO, 2015). Portanto, apresenta-se exposta a oportunidade de integrar a tecnologia da produção de pellets, que envolve a produção de resíduos pelas serrarias e a demanda energética.

Diante deste exposto, esse trabalho propõe como objetivo, avaliar a potencial utilização de resíduos madeireiros provenientes do desdobro de 3 espécies, para o seu aproveitamento energético na forma de pellets: avaliar as características químicas, energéticas e físico-mecânicas, bem como a viabilidade técnica da produção de pellets por meio destes resíduos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Coleta e preparo de amostras

Foram coletados resíduos madeireiros provenientes de uma serraria no município de Goiânia. Estes resíduos foram oriundos do desdobro de três espécies florestais: *Trattinnickia burserifolia* Mart., *Rhodostemonodaphne dioica* (Mez) Rohwer e *Terminalia glabrescens* C. Mart. (respectivamente, breu amescla, louro preto e cuiarana). Estas espécies foram selecionadas por se constituírem nas principais espécies comercializadas (em volume de madeira) pela serraria.

Os resíduos foram submetidos a uma separação mecânica no agitador orbital de peneiras com batidas intermitentes, para a seleção da fração retida na peneira nº 24 internacional, com malha de 60 mesh.

2.2 Avaliação das características da biomassa

2.2.1 Densidade a granel

A biomassa separada na malha de 60 mesh foi utilizada para a determinação da densidade a granel, de acordo com a metodologia estabelecida na norma NBR 6922 (ABNT, 1981): relação da massa do material analisado e o volume conhecido de um recipiente (Equação 1).

$$DG = \frac{Ma}{Vr} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

DG = Densidade à granel (kg.m^{-3})

Ma = Massa da amostra (kg);

Vr = Volume do recipiente (m^3).

2.2.2 Poder calorífico superior

O poder calorífico superior foi determinado no Laboratório de Bioenergia e Materiais Lignocelulósicos da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. A análise foi feita por meio de uma bomba calorimétrica marca IKA WORKS, modelo C-200, conforme a Norma ASTM D5865-13.

2.2.3 Poder calorífico inferior

Uma forma de obtenção do PCI, segundo Brito (1992), é através da Equação 2: $PCI = PCS - 600 (9H/100)$, que exclui a interferência do vapor de água produzido na combustão do hidrogênio H presente no material em combinação com o oxigênio. Esta variável é considerada importante por apresentar o poder calorífico do material sem considerar a energia liberada para a vaporização da água.

$$PCI = PCS - 600 * (9U/100) \quad \text{Eq. 2}$$

Em que:

PCI= Poder calorífico inferior expresso em kcal.kg^{-1} ;

PCS = poder calorífico superior expresso em kcal.kg^{-1} ;

U= Umidade expressa em porcentagem.

2.2.4 Densidade energética

Foi calculada a densidade energética da biomassa, utilizando a densidade à granel (Eq. 1) e poder calorífico superior, conforme a Equação 3.

$$De = PCS * DG \quad \text{Eq. 3}$$

Em que:

De = Densidade energética expressa em Gcal.m^{-3} (valor convertido);

PCS = poder calorífico superior expresso em kcal.kg^{-1} ;

DG = Densidade a granel, expressa em kg.m^{-3} .

2.2.5 Análise imediata

Para a determinação da análise imediata, composta pelo teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, foi utilizada parte da fração retida na peneira de 60 mesh que foi seca (0%). Os ensaios de teor de voláteis e teor de cinzas foram realizados em cinco repetições, utilizando cadinhos de porcelana previamente calcinados.

O teor de voláteis foi baseado na norma ASTM E872-82. Em cada cadinho e tampa de massas conhecidas, foi colocado aproximadamente 1,0 g de material, sendo levado para a mufla a 900°C, permanecendo em seu interior durante três minutos com a porta da mufla aberta e nos próximos sete minutos com a porta fechada. Por fim o cadinho foi resfriado em dessecador por 30 minutos e pesado em temperatura ambiente. O teor de voláteis foi calculado conforme a Equação 4.

$$MV = \frac{M_i - M_f}{M_a} * 100 \quad \text{Eq. 4}$$

Em que:

MV: Teor de materiais voláteis da biomassa (%);

Mi: Massa inicial do cadinho + amostra (g);

Mf: Massa final do cadinho + amostra (g);

Ma: massa da amostra (g).

O teor de cinzas foi realizado conforme a norma ASTM D1102-84.34. Assim como no teor de voláteis, aproximadamente 1,0 g de biomassa foram adicionados em cada cadinho, sem tampa. O cadinho com a biomassa foi pré-queimado com auxílio de bico de Büsen até levantar chama e, logo após sua carbonização, foi colocado na mufla em 600 °C por seis horas. Posteriormente, foi resfriado em dessecador e pesado em temperatura ambiente, sendo o cálculo do teor de cinzas calculado pela Equação 5.

$$CZ = \frac{M_f - M_c}{M_a} * 100 \quad \text{Eq. 5}$$

Em que:

CZ: Teor de cinzas no carvão, em %;

Mf: Massa final do cadinho + amostra (g);

Mc: Massa do cadinho (g);

Ma: amostra inicial (g).

O teor de carbono fixo é uma medida indireta, dependente dos teores de materiais voláteis e teor de cinzas para sua determinação, obtido através da Equação 6.

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad \text{Eq. 6}$$

Em que:

CF = Teor de carbono fixo (%);

CZ = Teor de cinzas (%);

MV = Teor de materiais voláteis (%).

2.3 Produção e avaliação dos pellets

Os pellets das três espécies foram produzidos utilizando-se uma peletizadora do Laboratório de Bioenergia e Qualidade da Madeira da Universidade Federal de Goiás. Este equipamento é constituído de uma parte inferior provida de uma matriz com forma circular com orifícios de 6 mm de diâmetro e de uma superior com dois rolos com movimentos rotacionais, em torno do seu eixo e em volta da matriz. A parte inferior da matriz possui ainda uma lâmina que corta os pellets em comprimento médio padronizado de 20 mm. Para o processo de produção de pellets, o teor de umidade de dois quilogramas de biomassa de cada espécie foi ajustado a 20%, conforme recomendado pelo fabricante do equipamento.



Figura 1. Produção de pellets das três espécies.

Inicialmente, com o objetivo de determinar as dimensões médias, teor de umidade e densidade aparente individuais, 30 pellets de cada espécie foram selecionados aleatoriamente. O comprimento e o diâmetro foram medidos utilizando um paquímetro digital

e a massa inicial, após a produção considerada como tempo 0 horas e a final, após secagem em estufa a 103°C depois de estabilizada a massa.

O teor de umidade de cada pellet foi obtido através da equação 7 e de acordo com a norma ABNT NBR 14929 (ABNT, 2003).

$$U = \frac{Mi - Mf}{Mf * 100} \quad \text{Eq. 7}$$

Em que:

U: Teor de umidade (%);

Mi: Massa inicial (g);

Mf: Massa final (g).

A densidade aparente de cada pellet foi obtida através da equação 8, tendo sido determinado o volume individual pela equação 8.

$$V = \frac{\pi}{4 * d^2 * L} \quad \text{Eq. 8}$$

Em que:

V: Volume (cm³);

π : 3,1415;

d: diâmetro (cm);

L: Comprimento (cm).

$$D_{ap} = \frac{Mi}{V} \quad \text{Eq. 9}$$

Em que:

D_{ap}: Densidade aparente (g.cm⁻³);

Mi: Massa inicial (g);

V: Volume (cm³)

A densidade a granel dos pellets foi calculada pela razão entre a massa de pellet e o volume de um recipiente utilizando-se a equação 10. Os pellets foram colocados dentro de um recipiente, sendo posteriormente pesados usando uma balança digital de precisão e determinado o volume do recipiente medindo-se o seu comprimento e diâmetro.

$$D_g = \frac{M_p}{V_r} \quad \text{Eq. 10}$$

Em que:

D_g: Densidade a granel (g.cm⁻³);

M_p: Massa de pellet (g) ;

V_r: Volume do recipiente (cm³).

A durabilidade dos pellets foi determinada por perda de massa das amostras, conforme descrito por Toscano et al. (2013) e Liu et al. (2014) utilizando-se a equação 11. Vinte pellets de cada espécie foram pesados para a obtenção da massa inicial e levados a uma peneira vibratória, permanecendo por 10 minutos, a 80 rotações por minutos. Após este procedimento, os pellets foram novamente pesados e obtidos a massa final.

$$Dur = 100 - \frac{(M_{ip} - M_{fp})}{(m_i * 100)} \quad \text{Eq. 11}$$

Em que:

Dur: Durabilidade dos pellets (%);

M_{ip}: Massa inicial do pellet (g);

M_{fp}: Massa final do pellet (g).

O poder calorífico útil foi determinado por meio da equação abaixo:

$$PCU = PCI - 6 * U \quad \text{Eq. 12}$$

Em que:

PCU: Poder calorífico Útil (kcal.kg⁻¹);

U %: Teor de umidade em %.

PCI: Poder calorífico inferior (kcal.kg⁻¹).

A densidade energética dos pellets (equação 13) foi calculada multiplicando-se o poder calorífico útil da biomassa pela densidade aparente dos pellets.

$$Dep = PCU * Dap \quad \text{Eq. 13}$$

Em que:

Dep: Densidade Energética dos pellets expressa em Gcal.m⁻³ (valor convertido);

PCU: Poder calorífico Útil (kcal.kg^{-1});

Dap: Densidade aparente do pellet (g.cm^{-3}).

A determinação do teor de finos foi calculada utilizando o valor de durabilidade dos pellets, conforme a equação 14.

$$TF = 100 - Dur$$

Eq. 14

Em que:

TF: Teor de finos (%);

Dur: Durabilidade dos pellets (%).

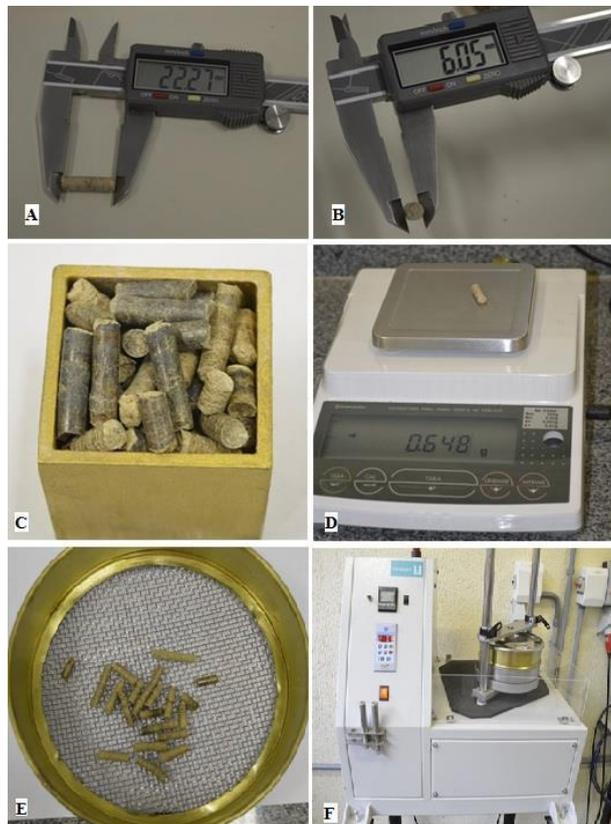


Figura 2. Mensuração do diâmetro e comprimento (A e B); densidade a granel (C), peso (D) e durabilidade (E e F) dos pellets.

2.4 Parâmetros comerciais de qualidade dos pellets

O principal mercado consumidor de pellets está localizado na Europa, sendo assim torna-se importante comparar se os valores obtidos estão de acordo com as normas

internacionais definidas pelos países consumidores. A norma Alemã DIN 51731/ PLUS, a austríaca ÖNORM M7135, a sueca SS 18 71 20 e a norma tratam da qualidade de pellets de madeira para usos não industriais e será utilizada para fins de comparação da qualidade dos pellets produzidos neste trabalho e serão utilizadas como parâmetro para a definição da qualidade dos pellets (Tabela 1 e 2).

Tabela 1. Especificações para pellets de madeiras produzidos na Alemanha e Áustria.

Especificações	Alemanha			Áustria
	Unidade	DIN 51731/ PLUS		ÖNORM M7135
		HP2	HP3	Madeira
Diâmetro	mm	6 a 10	3 a 7	4 a 20
Comprimento	mm	15 a 30	10 a 15	máx.100
Densidade granel	a g.cm ⁻³	> 0,60		> 0,60
Finos < 3mm	%	máx. 1		máx. 1
Densidade aparente	g.cm ⁻³	1,0 a 1,4		≥ 1,0
Teor de umidade	de %	< 12		≤ 12
Teor de cinzas	%	< 1,5		≤ 0,50
PCI	kcal.kg ⁻¹	4179,8 a 4657,5		≥ 4299,23
Enxofre	%	< 0,08		≤ 0,04
Nitrogênio	%	< 0,30		≤ 0,30
Cloro	%	< 0,03		≤ 0,02
Aditivos	%	< 2		máx. 2 (natural)
Durabilidade	%	≥ 95,0		≥ 95,0

HP2 e HP3: classificação como HP (Holz pellets) que vai da classe 1 a 5 de acordo com o diâmetro e comprimento dos pellets. Neste trabalho são apresentadas apenas 2 classes desta norma.

Tabela 2. Especificações para pellets de madeiras produzidos na EUA e Suécia

Especificações	Unid.	EUA				Suécia		
		Recomendações PFI				SS 18 71 20		
		SP	P	S	U	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Diâmetro	mm	6,35 a 7,25				máx. 4	máx. 5	máx. 6
Comprimento	mm							
Densidade granel	a g.cm ⁻³	0,640 a	0,608 a		> 0,60	≥ 0,50		
		0,736	0,736					
Finos < 3mm	%	≤ 0,50				≤ 0,8	≤ 1,5	
Densidade aparente	g.cm ⁻³	1,0 a 1,4						
Teor de umidade	%	≤ 6	≤ 8	≤ 10		≤ 10	≤ 12	
Teor de cinzas	%					≤ 0,7	≤ 1,5	
PCI	Kcal.kg ⁻¹					≥ 4036,5		
Enxofre	%					≤ 0,08	indicar	
Nitrogênio	%							

Cloro	%	< 0,3	≤ 0,03	indicar
Aditivos	%	nenhum		
Durabilidade	%	≥ 97,5	≥ 95,0	Indicar

PFI: Pellets Fuel Institute; Classificação dos pellets em: SP: Super Premium, P: Premium, S: Standard, U: Utilitário

2.5 Análise estatística dos dados

Na análise estatística dos resultados foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado com três tratamentos (espécies) e aplicado o programa JMP (SAS INSTITUTE, 1997), sendo aferidos os “outliers” e heterogeneidade da variância. Para os resultados utilizou-se a análise de variância (ANOVA) verificando o efeito da espécie, sendo aplicado o teste de Tukey, ajustado a 95% de probabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização da biomassa

Os resultados da análise química imediata e de poder calorífico da biomassa são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Química imediata da biomassa e poder calorífico das espécies.

Espécie	CZ (%)	MV (%)	CF (%)	PCS (kcal.kg⁻¹)	PCI (kcal.kg⁻¹)
<i>R. dioica</i>	0,3 ^b (1,4)	81,4 ^b (0,2)	18,2 ^b (0,4)	5285,5 ^a (0,17)	4961,8 ^a (0,17)
<i>T. glabrescens</i>	1,6 ^a (1,9)	77,4 ^c (0,1)	21,1 ^a (0,3)	4739,1 ^b (0,04)	4415,1 ^b (0,04)
<i>T. burserifolia</i>	1,6 ^a (0,0)	83,2 ^a (0,1)	15,2 ^c (0,8)	4711,8 ^c (0,16)	4387,8 ^c (0,18)

Médias seguidas de desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância. CZ: teor de cinzas, MV: teor de materiais voláteis, CF: carbono fixo, PCS: poder calorífico superior, PCI: poder calorífico inferior.

Para os teores de cinzas, houve diferença estatística segundo o teste de Tukey a 5% de probabilidade, no qual *T. glabrescens.* e *T. burserifolia* obtiveram maiores médias, sendo que o *R. dioica* apresentou média de 0,3%. Medeiros et al. (2014) relatam que teores de cinzas elevados na madeira podem provocar danos em fornalhas e em outros equipamentos em que ela é utilizada como fonte de energia.

De acordo com Sturion et al. (1988), o teor de cinzas é a fração mineral existente na madeira que permanece com resíduo após a combustão da biomassa, variando de 0,5 a mais de 5%. Esse é um dos fatores que contribuem para a indicação das três espécies,

principalmente o *R. dioica* na produção de energia, pois segundo Nhuchhen et al. (2014) altos teores de cinzas são indesejáveis, já que reduzem o poder calorífico superior, são prejudiciais aos processos de queima, pois causam incrustações nas câmaras de combustão, corrosão de tubulações e demais equipamentos, além da geração de resíduos.

Teores de cinza acima de 3,0% para madeira e 10% para outras biomassas são indesejáveis em combustíveis lignocelulósicos (Oberberger & Thek, 2010). De acordo com Jenkins et al. (1998), para cada 1% no teor de cinza, há redução de cerca de $47,8 \text{ kcal.kg}^{-1}$ no poder calorífico da biomassa, o que, provavelmente, explica os menores PCS para as espécies *T. glabrescens* e *T. burserifolia*, conforme observado na Tabela 3.

Com relação as espécies *T. glabrescens*. e *T. heptaphyllum* que apresentaram alto teor de cinzas, é recomendada o estudo que busque a realização de mistura para redução desse teor. Em trabalho desenvolvido por Rodriguez et al. (2017) os briquetes produzidos com resíduos de pinhão manso e a parti da mistura com bagaço de cana de açúcar em diferentes porcentagens demonstraram que a adição do bagaço da cana de açúcar reduziu o teor de cinzas. Scatolino et al. (2017) também obtiveram resultados positivos em seus estudos, onde os mesmos ressaltam que o incremento de serragem de *Eucalyptus sp.* em pellets produzidos com resíduos de soja reduziu o teor de cinzas de 26,72% para 14,03%.

Os teores médios de materiais voláteis foram de 77,4% para *T. glabrescens.*, 83,2% para *T. burserifolia* e 81,4% para *R. dioica*, sendo estatisticamente diferentes entre si e semelhante as valores de espécies madeireiras mais comumente utilizadas para fabricação de pellets, como as do gênero *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.* Segundo Arantes et al. (2013) a quantidade de materiais voláteis na biomassa lenhosa é geralmente alta, variando entre 65 e 85% e está relacionado à queima no processo da carbonização, sendo esta mais rápida quanto maior o teor de voláteis. Os teores de voláteis estão dentro da faixa comumente observada para outras espécies florestais, conforme apontado por Sette Jr et al. (2016) para *E. urograndis* um valor de 82,2%.

A madeira de *T. glabrescens* apresentou o maior teor de carbono fixo com 21,1% e o menor teor de materiais voláteis 77,4%. Os teores de matérias voláteis e carbono fixo na madeira encontrados neste trabalho também estão de acordo com Brito e Barrichelo (1982), que preconizam, em termos gerais, teores de materiais voláteis entre 75% a 85% e de carbono fixo entre 14% a 25%. Segundo esses autores, combustíveis com alto teor de carbono fixo devem ter queima mais lenta, implicando maior tempo de residência destes dentro dos queimadores quando comparados com outros compostos que tenham menor teor de carbono fixo.

Os valores médios do poder calorífico superior variam entre 4711,8 a 5285,5 kcal.kg⁻¹, apresentando diferença significativa entre as espécies. O *R. dioica* apresentou um melhor desempenho com relação as demais espécies. Quirino et al. (2004) estudando espécies do cerrado encontrou valor de poder calorífico para a espécie *Trattinickia burserefolia* de 4606 kcal.kg⁻¹, corroborando ao valor obtido neste trabalho.

O poder calorífico superior de todas as espécies é adequado à utilização para a produção de energia, principalmente da *R. dioica* que além de possuir o maior poder calorífico superior (5285,5 kcal.kg⁻¹) entre as espécies estudadas neste trabalho, apresentou também um baixo teor de cinza (0,3%). Sendo que estas duas propriedades são consideradas favoráveis para a produção de pellets e para aplicação energética mostrando, portanto, o potencial energético da *R. dioica*.

De acordo com Quirino et al. (2004) o poder calorífico pode ser influenciado pela umidade e por sua constituição química, principalmente lignina e extrativos por esses possuírem menos oxigênio em sua composição, quando comparados aos polissacarídeos presentes na holocelulose, os quais apresentam estruturas pouco complexas e um número menor de ligação C-C, tendo dessa forma maior tendência à degradação térmica. Logo, torna-se necessária a realização de análises de teor de lignina e extrativos na biomassa das espécies estudadas para avaliar a influência destes sobre o poder calorífico.

Tabela 4. Densidade a granel e energética da biomassa.

Espécies	Densidade à granel (g.cm⁻³)	Densidade energética (Gcal.m⁻³)
<i>R. dioica</i>	0,22 b (1,82)	1,18 b (1,98)
<i>T. glabrescens</i>	0,48 a (1,29)	2,29 a (1,30)
<i>T. burserifolia</i>	0,19 b (2,44)	0,91 b (2,58)

Médias seguidas de desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

A densidade a granel é muito importante para quantificar volumes de produtos com formas irregulares, pois fornece informações que poderão ser úteis para a logística e transportes dos mesmos, já que considera os espaços vazios entre uma partícula e fornece dados reais dos volumes para o transporte (GARCIA et al., 2012).

A densidade a granel das 3 espécies foi estatisticamente diferente. Verificou-se que a *T. glabrescens*. apresentou um valor superior quando comparada as demais espécies, tal

valor pode ser explicado pela granulometria da biomassa, que ao ser coletada apresentava extremamente fina. A densidade a granel e energética (Tabela 4) possuem uma relação direta entre si: a espécie *T. glabrescens*. apresentou a maior média entre as espécies estudadas para a densidade energética, correspondendo a $2,29 \text{ Gcal.m}^{-3}$, seguida da espécie *R. dioica* com $1,18 \text{ Gcal.m}^{-3}$ e *T. burserifolia* com $0,91 \text{ Gcal.m}^{-3}$.

A baixa densidade energética da biomassa em relação ao petróleo e o carvão mineral implica em altos custo de transporte e armazenamento (COUTO et al., 2004). Nesse sentido, a pesquisa e o desenvolvimento de técnicas visando uma maior concentração de energia por unidade de volume, como na peletização, são fundamentais para o aumento do uso da biomassa como fonte energética (FREITAS, 2016).

3.2 Características dos pellets

Os resultados das análises de caracterização dos pellets são apresentados na Tabela 5 e 6 e representam a média aritmética da medição de 30 pellets para cada variável.

Tabela 5. Diâmetro, comprimento, teor de umidade e poder calorífico útil dos pellets.

Espécies	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Umidade (%)	PCU (kcal.kg ⁻¹)
<i>R. dioica</i>	6,0 a (0,01)	20,0 b (0,10)	7,9 a (0,02)	4957,1 a (0,00)
<i>T. glabrescens</i> .	6,0 a (0,01)	18,4 b (0,16)	5,7 b (0,18)	4412,2 b (0,00)
<i>T. burserifolia</i>	5,9 a (0,01)	22,5 a (0,13)	7,6 a (0,05)	4384,0 c (0,00)

Médias seguidas de desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância. PCU: Poder Calorífico Útil

Os diâmetros médios encontrados nas diferentes amostras apresentam valores com pouca variação (5,9-6,0 mm), sem diferença estatística entre as espécies. Segundo Liu et al. (2014) a uniformidade das dimensões dos pellets é um importante fator na combustão do material, tem sido constatado por Päivi (2001) que a taxa de combustão é mais uniforme em pellet mais finos do que nos de maiores diâmetros, principalmente em fornos pequenos. A *T. burserifolia* foi à espécie que apresentou o valor de diâmetro de 5,9 mm.

Quanto ao comprimento médio das amostras, os resultados mostraram que não houve diferença significativa entre os *pellets* das espécies *R. dioica* e *T. glabrescens*., e apenas a *T. burserifolia* com 22,5 mm, se diferiu das demais. Porém, a diferença apresentada para este item pode ser ajustada regulando-se a matriz pelletizadora e assim obtendo

resultados que não devem diferir entre si, independente das características intrínsecas das espécies estudadas.

A biomassa utilizada para a produção dos pellets teve o seu teor de umidade ajustado para 20% (base úmida), conforme recomendação do fabricante da pelletizadora, uma vez que a presença de água no material favorece a transferência de calor, e conseqüentemente, a ligação entre as partículas durante a compactação (QUIRINO et al., 2012).

A redução do teor de umidade da biomassa das três espécies estudadas durante o processo de fabricação dos pellets foi na ordem de 12% para *T. burserifolia* e *R. dioica* e a *T. glabrescens* teve uma redução de umidade de 14%, atingindo valores de 5,7% a 7,9% após a compactação. A redução da umidade para pellets promove um aumento significativo em sua resistência mecânica, diminuindo a geração de finos durante o transporte e armazenamento. Além disso, dificulta a ocorrência e degradação por microrganismos decompositores da madeira quando armazenados por longos períodos de tempo (LIU et al., 2014).

Considerando que os pellets não serão comercializados com teor de umidade de 0%, o poder calorífico útil deve ser obtido e considerado como parâmetro de qualidade dos materiais densificados. Os valores de PCU para as três espécies variou de 4384,0 a 4957,1 kcal.kg⁻¹, confirmam a influência do teor de umidade da biomassa nesta variável, com redução do poder calorífico, quando considerado os 5-8% dos pellets. A água presente na biomassa é um dos fatores de maior influência sobre a liberação de energia, com alta correlação negativa entre o poder calorífico e o teor de umidade.

Houve diferença significativa entre as espécies para a variável poder calorífico útil, onde o *R. dioica* se destacou apresentando maior valor 49571 kcal.kg⁻¹ e conseqüentemente menor teor de cinzas 0,3%. Essa correlação negativa entre o poder calorífico e cinzas também foi encontrada para a espécie pau rainha, guariúba e cadeiro por Trugilho et al. (1991) e por Machado (2015) para a espécie cedro.

Na Tabela 6 é possível observar que os valores médios de densidade a granel dos pellets foram 0,67 g.cm⁻³ para *T. glabrescens*. e *T. burserifolia* e 0,73 g.cm⁻³ para *R. dioica*. Mani et al. (2006) ressaltou que a densidade é fortemente afetada pela força de compressão, tamanho da partícula e conteúdo de água. Protásio et al. (2015) relata a importância da biomassa lignocelulósica e da máquina utilizada no processo de compactação, pois são fatores decisivos na qualidade e desempenho energético dos biocombustíveis produzidos.

Tabela 6. Densidade a granel, aparente e energética, durabilidade e teor de finos dos pellets.

Espécie	Densidade a granel (g.cm⁻³)	Densidade aparente (g.cm⁻³)	Densidade Energética (Gcal.m⁻³)	Durabilidade (%)	Teor de finos (%)
<i>R. dioica</i>	0,73a (0,02)	1,24a (0,27)	6,17a (0,05)	99,99a (0,00)	0,01a (1,38)
<i>T. glabrescen.</i>	0,67b (0,04)	1,29a (0,28)	5,67b (0,06)	99,99a (0,00)	0,01a (1,73)
<i>T. burserifolia</i>	0,67b (0,01)	1,19a (2,37)	5,22c (0,05)	99,99a (0,00)	0,01a (0,20)

Médias seguidas de desvio padrão. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

A densidade aparente de cada pellet variou de 1,19 a 1,24 g.cm⁻³, sem diferenças significativas. No trabalho de Pastre (2002), analisando 38 tipos diferentes de *pellets*, encontrou valores de densidade a granel na faixa de 0,52 a 0,64 g.cm⁻³, sendo estes valores inferiores aos encontrados neste trabalho, representando portanto o potencial energético das espécies estudadas.

Observando os resultados, verifica-se uma diferença significativa entre as espécies, sendo que os pellets da *R. dioica* apresentam maior densidade energética, de 6,17 Gcal.m⁻³. De acordo com Sette Jr (2016), o aumento da densidade energética é função do incremento de densidade da biomassa após a compactação, evidenciando a importância da peletização no aproveitamento de materiais lignocelulósicos para a produção de bioenergia, pela maior concentração de energia por unidade de volume.

Sette Jr (2016) encontrou valores de densidade energética de 6,36 Gcal.m⁻³ para *E. urograndis* e neste trabalho foi encontrado um valor próximo a este, mostrando portanto, mais um bom indicativo do desempenho energético da *R. dioica*.

A durabilidade mecânica indica a capacidade dos pellets em suportar a desintegração física, que levam a formação de pó devido a impactos mecânicos durante armazenamento e transporte (TUMULURU, 2014). Kaliyan e Morey (2009) concluíram que o tamanho das partículas, a composição química, principalmente o teor de lignina e umidade da matéria-prima, além da temperatura e pressão de peletização, influenciam na durabilidade mecânica dos pellets.

Os finos são partículas com dimensões inferiores a 3,0 mm geradas na desintegração dos pellets, de acordo com a norma DIN 51731. A quantidade de finos gerados não diferiu significativamente entre as espécies. O teor médio de finos foi de 0,01 % para *R. dioica* e 0,00% para as demais espécies. Pellets produzidos sob condições que não favorecem

a compactação da biomassa, com baixa temperatura de peletização, umidade da matéria-prima inferior à ideal, baixo teor de lignina, baixa velocidade dos roletes ou tamanho insuficiente dos canais de compressão causam a maior geração de finos (TUMULURU et al., 2011).

3.3 Classificação dos pellets de acordo com as normas de qualidade

Conforme a Tabela 7, podemos classificar os pellets das espécies *R. dioica*, *T. glabrescens*. e *T. burserifolia* em respectivamente HP3, HP2 e HP2 de acordo com a norma alemã, em Super Premium, Premium e Premium conforme a norma americana e em Grupo 3 segundo a norma sueca.

Tabela 7. Qualidade dos pellets de madeira de acordo com as normas consideradas neste estudo.

Norma	Classe	Matéria Prima	Diâmetro	Comprimento	Densidade a granel	Densidade Aparente	Finos	Teor de Umidade	Cinza	Poder Calorífico Inferior	Enxofre	Nitrogênio	Cloro	Durabilidade
Alemanha DIN 51731	HP2	<i>R. dioica</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	O	O	O	✓
	HP2	<i>T. glabrescens</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	O	O	O	✓
	HP3	<i>T. burserifolia</i>	✓	X	✓	✓	✓	✓	X	✓	O	O	O	✓
Áustria ÖNORM M7135		<i>R. dioica</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	O	O	O	✓
	Madeira	<i>T. glabrescens</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	O	O	O	✓
		<i>T. burserifolia</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	O	O	O	✓
EUA PFI	P	<i>R. dioica</i>	X	V	✓	✓	V	✓	V	V	V	V	O	✓
	SP	<i>T. glabrescens</i>	X	V	✓	✓	V	✓	V	V	V	V	O	✓
	P	<i>T. burserifolia</i>	X	V	✓	✓	V	✓	V	V	V	V	O	✓
Suécia SS 18 71 20	Grupo 3	<i>R. dioica</i>	✓	V	✓	V	V	✓	✓	✓	V	V	V	V
	Grupo 3	<i>T. glabrescens</i>	✓	V	✓	V	V	✓	X	✓	V	V	V	V
	Grupo 3	<i>T. burserifolia</i>	✓	V	✓	V	V	✓	X	✓	V	V	V	V

X: Característica não atendida; ✓: Característica atendida; O: Teste não realizado; V: Valor não estabelecido pela norma.

Para os parâmetros diâmetro e comprimento observa-se que as normas alemã e austríaca são mais exigentes, enquanto a norma americana e a sueca estabelecem apenas valores para o diâmetro, não exigindo, portanto, valores para a variável comprimento. Na norma americana para a variável diâmetro é estabelecido um intervalo de 6,35 a 7,25 mm e as medidas encontradas neste trabalho para as diferentes espécies não atendem a este requisito.

Comparando os resultados de diâmetro e comprimento obtidos com o exigido pelas normas europeias de qualidade, constata-se a conformidade dos pellets de *R. dioica* e *T. glabrescens* atendendo aos requisitos da norma DIN51731, (1996), SS 18 71 20 e ÖNORM M7135, (2000), enquanto os pellets de *T. burserifolia* atende apenas os critérios da norma ÖNORM M7135 e SS 18 71 20 que possuem uma menor exigência.

Os pellets de *T. burserifolia* atendem ao item diâmetro da norma DIN51731, no entanto, estes não obedecem aos critérios estabelecidos pelo item comprimento conforme a classificação feita com base nas dimensões de diâmetro e comprimento, onde pellets com diâmetro entre 3 a 7 mm devem possuir um comprimento de 10 a 15 mm e essa espécie apresentou um valor de diâmetro de 5,9 mm e comprimento de 22,5 mm que não confere com os critérios estabelecidos de nenhuma classe, porém conforme o diâmetro médio obtido dos pellets provenientes dessa espécie, a mesma foi classificada como HP3.

Com relação ao item densidade a granel dos pellets todas as espécies atenderam as exigências, no qual as normas alemã e austríaca inferem um valor mínimo de $0,60 \text{ g.cm}^{-3}$, e a americana estabelecem dois intervalos, que conforme observado na Tabela 2, classificam os pellets em Super Premium, Premium, Standard e Utilitário. Os pellets estudados se enquadram no primeiro intervalo de $0,640$ a $0,736 \text{ g.cm}^{-3}$, classificando os como Super Premium e Premium.

Os padrões normativos de qualidades dos pellets, no que se refere à densidade aparente, apontam valores maiores ou iguais a $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$ (ÖNORM M7135) e entre $1,0$ e $1,40 \text{ g.cm}^{-3}$ (DIN 51731), estando os pellets de *R. dioica*, *T. glabrescens*. e *T. burserifolia* e de acordo com o recomendado pelas normas européias. As normas americanas e suecas não estabelecem valores para este parâmetro, mostrando mais uma vez menos exigentes que as demais normas abordadas neste trabalho.

Para a variável durabilidade é exigido pelas normas de qualidade na Alemanha (DIN 51731, 1996), Suécia (SS 18 71 20), Áustria (ÖNORM M7135, 2000) e americana (Recomendações do PFI), um valor de durabilidade maior ou igual a 95% para os pellets produzidos de madeira. Os pellets dos diferentes resíduos estão em conformidade com as

normas europeias estabelecidas, todos apresentaram valores superiores a 99% e não apresentaram diferenças significativas, visto que ambos apresentaram valores semelhantes como observado na Tabela 6.

Para o teor de finos todas as espécies atenderam ao exigido pelas diferentes normas e Os teores de umidades estão dentro dos níveis ótimos de acordo com o exigido nas normas de qualidade DIN 51731 (1996), Recomendações do PFI, SS 18 71 20 e ÖNORM M7135.

Os pellets das espécies *T. burserifolia* e *T. glabrescens* não atenderam ao indicador porcentagem de teor de cinzas das diferentes normas, sendo o máximo valor 1,5% estabelecido pelas normas alemã e sueca. Além do teor de cinzas a *T. burserifolia* também não atende a diretriz comprimento da norma alemã, mas tal fator pode ser explicado pela não regulagem da matriz pelletizadora. Já a *R. dioica* apresentou um valor de teor de cinzas que atende a todas as normas indicando, portanto um boa característica para uso energético.

A *R. dioica* apresentou boas características para a fabricação de pellets, atendendo a todos os parâmetros da norma ÖNORM M7135, e além de atender a todos os requisitos os pellets possuem um elevado poder calorífico inferior e uma alta densidade a granel. Em relação à diretriz não cumprida de poder calorífico inferior pela norma alemã, cujo valor médio deve estar compreendido entre 4179,8 a 4657,5 kcal.kg⁻¹, pode se dizer que mesmo não atendendo a este único critério da norma, por meio dos resultados obtidos pode-se afirmar que *R. dioica* apresenta vantagem neste item em comparação as demais espécies estudadas, já que altos valores de poder calorífico oferecem uma maior quantidade de energia.

Segundo a norma alemã DIN 51735 (Deutsches Institut Für Normung, 1996), independente da classe os pellets devem apresentar no máximo 1,5% de cinzas na sua constituição química. A norma austríaca ÖNORM M 7135 (Österreichisches Normungsinstitut, 2000) também é rigorosa quanto ao teor de cinzas dos pellets produzidos com madeira, e estabelece o valor máximo de 0,5%, e a norma sueca SS 18 71 20 (Swedish Standards Institute, 1999) define, para os pellets do grupo 1, o valor máximo de 0,7% de cinzas. Dessa forma, apenas as espécie *R. dioica* atendeu a todas as normativas internacionais quanto a este requisito. Com relação as normas americanas, nenhum valor é estabelecido para o teor de cinzas, portanto, acredita-se que as espécies aqui estudadas atendem aos critérios desta.

Foi observado que apenas as espécies *T. burserifolia* e *T. glabrescens*. atendem ao requisito de poder calorífico estabelecido pela norma DIN 51731 (PCI entre 4179,8 a 4657,5 kcal.kg⁻¹). O valor obtido para o *R. dioica* foi o superior ao estabelecido pela norma, portanto

não sendo permissível sua exportação para a Alemanha, no entanto ela poderia ser utilizada em países como a Áustria que exigem maior qualidade ($PCI \geq 4299,23 \text{ kcal.kg}^{-1}$) e na Suécia ($PCI \geq 4036,5 \text{ kcal.kg}^{-1}$). Apesar do poder calorífico do *R. dioica* não estar dentro dos critérios estabelecidos pela norma, considera-se que quanto maior o poder calorífico, melhor a qualidade dos combustíveis, refletindo, portanto em um bom desempenho considerando os termos energéticos.

Em síntese os pellets não atendem a todos os critérios das normas avaliadas neste trabalho, com exceção dos pellets provenientes da espécie *R. dioica* que atenderam a todos os critérios das normas austríaca e sueca. As demais espécies possuem algumas características inapropriadas com relação às normas europeias, sendo elas: diâmetro, comprimento e teor de cinzas. Para o enquadramento dos pellets das espécies *T. glabrescens* e *T. burserifolia* às normas internacionais, no que se refere ao diâmetro e ao comprimento, é necessário o ajuste da pelletizadora para produzir pellets nas dimensões exigidas e em relação ao teor de cinzas, a adição de pequenas porcentagens de outros materiais lignocelulósicos com baixos teores de cinzas, como por exemplo, a madeira de eucalipto, seria suficiente para o atendimento.

Para complementar as análises realizadas neste estudo, sugere-se a determinação dos teores de enxofre, nitrogênio e cloro, parâmetros exigidos para comercialização dos pellets de madeira no mundo.

4 CONCLUSÕES

A avaliação das características energéticas dos resíduos madeireiros indicou que a espécie *R. dioica* é a mais indicada para aplicações energéticas e as demais também apresentam bom potencial para uso energético.

É possível produzir pellets com os resíduos da biomassa das espécies *T. burserifolia*, *T. glabrescens* e *R. dioica*.

Todas as características dos pellets da *R. dioica* atenderam às especificações de qualidade exigidas nas normas internacionais de comercialização, exceto para o poder calorífico inferior e diâmetro das normas alemãs e americanas respectivamente.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPEL – **Associação Brasileira das Indústrias de Pellets**. Disponível em:

<<http://www.abipel.com.br/media/5468/ABIPEL-maio-2013.pdf>>. Acesso em: 20 de novembro de 2017.

ARANTES, M.D.C.; TRUGILHO, P.F.; SILVA, J.R.M.; ANDRADE, C.R. Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* w. Hill ex maiden x *Eucalyptus urophylla* S. t. Blake. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 423-431, jul./set. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6922**. Carvão vegetal - Ensaios físicos - Determinação da massa específica – Densidade a granel. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14929**. Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. 2003.

ASTM D293-96(2010). Standard Test Method for Sieve Analysis of Coke, ASTM International, West Conshohochken, PA, 2010.

ASMT D5865-13, Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM E872-82 (2013), Standar test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels, ASTM International, Phyladelphia, 2013.

ASTM D1102 – 84(2013), Standard Test Method for Ash in Wood, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

BANERJEE, S. et. al. Commercializing lignocellulosic bioethanol: technology bottlenecks and possible remedies. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 4, n. 1, 77-93, 2010.

BIZZO, W. A. **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Campinas: Unicamp, 2003.

Disponível em: <<http://ww.fem.unicamp.br/~672/GEVAP4.pdf>>. Acesso em: 14 de novembro de 2017.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Carvão vegetal de madeira de desbaste de Pinus**. Circular Técnica IPEF, Piracicaba, v. 146, p. 1-12, jun. 1992.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm> Acesso em 20 de novembro de 2017.

BRITO, J.O., BARRICHELO, L.E.G; ESALQ-USP; Aspectos Técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis; **In: 2º Seminário de Abastecimento Energético Industrial com Recursos Florestais**; p.101-137; São Paulo; 1982.

CHEN, L.J.; XING, L. & HANA, L. (2009) - Renewable energy from agro-residues in China: solid biofuels and biomass briquetting technology. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n. 9, p. 2689-2695.

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

DIAS, J. M. S. et. al. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Brasília: **Embrapa Agroenergia**, 2012.

DUCA, D.; RIVA, G.; PEDRETTI, E. F.; TOSCANO, G. Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certifications. **Fuel** n. 135, p. 9-14, 2014.

ESCOBAR, J. F.; COELHO, S. T. O Potencial dos pellets de madeira como energia no Brasil. **Jornal Biomassa BR**, v. 3, n. 12, p.9-14, Jan/Fev, 2014.

FAO – **Forest products statistics**. Global Forest Products Facts and Figures, 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/forestry/statistics/80938/en/>>. Acesso em: 23 de novembro de 2017.

FAO. **Forestry Production and Trade**. Disponível em:<<http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>>. Acesso em: 05 de dezembro de 2017.

FERNÁNDEZ, R.G. et al. Influence of physical properties of solid biomass fuels on the design and cost of storage installations. *Waste Management*, v. 33, pp. 1151-1157, 2013

FREITAS, P. C. Avaliação da qualidade de briquetes e pellets de clones de Eucalipto e espécies de Bambu. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, p. 89, 2016.

GARCÍA, M.; A.; RODRIGUEZ, M. L.; SERRANO, B. F.; DIAZ, L.F.; ZAMORANO, M. Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees. *Fuel Process. Technol.* v. 129, p.1–7, 2015.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Caracterização energética de pellets de madeira. In: 7 Congresso Internacional de Bioenergia, São Paulo, 2012. **Anais**. São Paulo: 2012, 6p.

JENKINS, B.; BAXTER, L.; MILES JR, T.; MILES, T. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 54, n. 1, p. 17-46, 1998.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass & Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 337-359, 2009.

LIU, Z. G.; QUEK, A.; BALASUBRAMANIAN, R. Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars. **Applied Energy**, v. 113, p. 1315-1322, 2014.

MANI, S.; TABIL, L.G.; SOKHANSANJ, S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. **Biomass and Bioenergy**, v.30, p.648-654, 2006.

MACHADO, M.P.O. Quantificação de resíduos do processamento de cinco espécies comerciais amazônicas e análise do potencial energético. Brasília: Universidade de Brasília, p. 58, 2015.

MEDEIROS P. N No, OLIVEIRA L, PAES J.B. Relações entre as características da madeira e do carvão vegetal de duas Espécies da Caatinga. **Floresta e Ambiente** v. 21,p.484-493, 2014.

MOUTINHO, V. H. P; ROCHA, J.J.M; AMARAL, E.P; SANTANA L.G.M. ÁGUIAR, O.J.R. Propriedades Químicas e Energéticas de Madeiras Amazônicas do Segundo Ciclo de Corte. **Floresta e Ambiente** 2016; 23(3):443-449.

MOBINI, M.; SOWLATI, T.; SOKHANSANJ, S. A simulation model for the design and analysis of wood pellet supply chains. *Applied energy*, v. 111, p. 1239-1249, 2013.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. **The pellet handbook: The production and thermal utilisation of pellets**. London: Earthscan,p. 593, 2010.

NHUCHHEN, D. R.; BASU, P.; ACHARYA, B. A. Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. **International Journal of Renewable Energy & Biofuels**, v. 2014, p. 56, 2014.

OLIVEIRA E. Características anatômicas, químicas e térmicas da madeira de três espécies de maior ocorrência no Semi- Árido Nordestino . Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 2003.

PASTRE, O. Analysis of the technical obstacles related to the production na utilisation of fuel pellets made from agricultural residues. *EUBIA*, 2002, 107p.

PEREIRA, B. L. C. Propriedades de pellets: biomassa, aditivos e tratamento térmico [Dissertação]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 74p, 2014.

QUENO, L. R. M. Produção de Pellets de Madeira no Brasil: Estratégia, Custo e Risco de Investimento [Tese].Brasília: Universidade de Brasília, DF, 145p, 2015.

QUIRINO, W. F.; PINHA, I. V. O.; MOREIRA, A. C. O.; SOUZA, F.; TOMAZELLO FILHO, M. Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. **Sci. For**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 525-536, dez. 2012.

QUIRINO, W.F.; VALE, A.T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V.L.S.; AZEVEDO, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. *Biomassa & Energia*, Brasília, v.1, n.2, p.173-182, 2004.

PROTÁSIO, T. P. et al. Caracterização energética de pellets in natura torreficados produzidos com madeira residual de Pinus. *Pesquisa Florestal Brasileira (Online)*, v. 35, p. 435-442, 2015.

ROCHA M.F.V. Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia [dissertação]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 2011.

RODRIGUES, W. D. M.; EVANGELISTA, A. W.; SETTE Jr. C. R.; JÚNIOR, J. A.; SILVA, M. F. Producción de briquetas con resduos de cáscara de piñon manso (*Jatropha curcas*) y bagazo de caña de azúcar. *BOSQUE* v. 38, n.3, p. 529-535, 2017.

STAISS, C.; PEREIRA, H. **Biomassa Energia Renovável na Agricultura e no Setor Florestal** Instituto Superior de Agronomia, Portugal, Revista Agros n. 01 pp. 21-28, 2001

SETTE JR, C. R. et al. Production and characterization of bamboo pellets. **Bioscience jornal**, Uberlândia, v. 32, n. 4, p. 992-930, jul. 2016.

SCATOLINO, M. V. Option for Generation of Sustainable Energy: Production of Pellets Based on Combination Between Lignocellulosic Biomasses. *Waste Biomass Valorization*, 2017.

SPANHOL, A.; N., D.L.; K, F.J.B. & BRAND, M.A. Qualidade dos pellets de biomassa florestal produzidos em Santa Catarina para a geração de energia. *Revista Floresta*, vol. 45, p. 833 -844, 2015..

STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; CHEMIN, M. S. Qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. *Boletim de pesquisa florestal - Unidade Regional de Pesquisa Florestal*, Curitiba, PR, n.16, p. 55-59, 1988

TOSCANO, G.; RIVA, G.; PEDRETTI, E. F.; CORINALDESI, F.; MENGARELLI, C.; DUCA, D. Investigation on wood pellet quality and relationship between ash content and 40 the most important chemical elements. **Journal Biomass and Bioenergy**, v. 56, p. 317-322, 2013.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. da.; FRAZÃO, F. J. L.; REGAZZI, A. J. Caracterização de espécies nativas e exóticas amazônicas e do carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa n.2, p p. 144-152, 1991.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T.; HESS, J. R.; KENNEY, K. L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683-707, 2011.

TUMULURU, J. S. Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover. **Biosystems Engineering**, v. 119, p. 44-57, 2014.