

RODOLFO CARDOSO JACINTO

**PRODUÇÃO DE PELLETS PARA ENERGIA USANDO DIFERENTES RESÍDUOS DE
BIOMASSA AGRÍCOLAS E FLORESTAIS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, da Universidade de Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientadora: Profª. Dra. Martha Andreia Brand

Co-orientador: Prof. Dr. Alexandre Bayestorff da Cunha

Ficha catalográfica elaborada pelo(a) autor(a), com
auxílio do programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC

Cardoso Jacinto, Rodolfo
PRODUÇÃO DE PELLETS PARA ENERGIA USANDO
DIFERENTES RESÍDUOS DE BIOMASSA AGRÍCOLAS E
FLORESTAIS / Rodolfo Cardoso Jacinto. - Lages ,
2017.
80 p.

Orientadora: Martha Andréia Brand
Co-orientador: Alexsandro Bayestorff da Cunha
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado
de Santa Catarina, Centro de Ciências
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Florestal, Lages, 2017.

1. Pelletização. 2. Falha do pinhão. 3. Grimpa.
4. Poda da Macieira. 5. Pinus. I. Andréia Brand,
Martha. II. Bayestorff da Cunha, Alexsandro. ,
.III. Universidade do Estado de Santa Catarina,
Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Florestal. IV. Título.

RODOLFO CARDOSO JACINTO

PRODUÇÃO DE PELLETS PARA ENERGIA USANDO DIFERENTES RESÍDUOS DE BIOMASSA AGRÍCOLAS E FLORESTAIS.

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Florestal.

Banca examinadora

Orientador: _____

Prof. Dr^a.Martha Andréia Brand

Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro: _____

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho

Universidade Federal de Lavras

Membro: _____

Prof. Dr^a. Jeane de Almeida do Rosário

Universidade do Estado de Santa Catarina

Lages-SC, 21/02/2017

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi determinar os parâmetros técnicos para a compactação e a qualidade dos pellets produzidos a partir de diferentes tipos de biomassa florestal e agrícola residual. A escolha dos tipos de biomassa foi baseada no volume de produção dos resíduos das principais culturas agrícolas e florestais do Estado de Santa Catarina, e da importância econômica, social e ambiental dos mesmos para os segmentos que os produzem. Desta forma, foram caracterizadas as propriedades físicas, químicas e energéticas de quatro tipos de biomassas residuais agrícolas e florestais (maravalha de pinus, galhos de poda de macieira; falhas de pinhão; grimpa de araucária) que foram utilizadas para a produção dos pellets. Foram analisados 13 tratamentos no estudo, que consistiram de pellets produzidos com: 100% de pinus (P100), considerado como tratamento testemunha; 75% de pinus e 25% de um dos resíduos analisados (F25P75, quando o resíduo era a falha de pinhão, G25P75, para o tratamento contendo grimpa, e Pm25P75, quando o tratamento possuía poda de maça); 50% de pinus e 50% de outro componente analisado, sendo F50P50 (para falha de pinhão), G50P50 (grimpa) e Pm50P50 (poda de maça); misturas contendo 25% de pinus e 75% do outro resíduo analisado, sendo F75P25 (falha de pinhão), G75P25 (grimpa) e Pm75P25 (poda de maça) e os tratamentos homogêneos com 100% de falha (F100); 100% de grimpa (G100) e 100% de poda de maça (Pm100). Para cada tratamento foram estabelecidos os parâmetros ideais de temperatura, pressão e velocidade de compactação dos pellets produzidos em peletizadora piloto de laboratório. Estes parâmetros foram estabelecidos com base nas propriedades físicas e químicas das biomassas *in natura*, e também em função da qualidade do pellet obtido no processo, por meio de testes de compactação sucessivos. Após a produção dos pellets foi determinada a qualidade deste biocombustível por meio de suas propriedades físicas, mecânicas, químicas e energéticas. A partir dos resultados obtidos em laboratório, os pellets foram classificados com base nos critérios de qualidade da norma ISO 17225-2 para pellets de biomassa para geração de energia. Concluiu-se que os tratamentos F75P25, G75P25 G50P50 e G25P75 foram os únicos que atingiram qualidade para uso residencial e comercial. O tratamento com melhor qualidade para uso residencial e comercial foi o tratamento G25P75. Os tratamentos Pm100, Pm75P25, Pm50P50, Pm25P75 e G100 não conseguiram classificações médias em relação a ISO 17225-2 para nenhuma categoria de qualidade descrita na norma.

Palavras-chave: Falha do pinhão; Grimpa; Poda da Macieira; *Pinus*; Pelletização

ABSTRACT

The objective of the present work was to determine the technical parameters for the compaction and the quality of the pellets produced from different types of forest biomass and residual agricultural biomass. The choice of the types of biomass was based on the production volume of the main agricultural and forestry crops of the State of Santa Catarina, and the economic, social and environmental importsnse of the same for the segments that produce them. In this way, the physical, chemical and energetic properties of four types of agricultural and forest residual biomass (Pinus chip, apple pruning branches, pinyon faults and araucaria grimpa) were used to produce the pellets. Thirteen treatments in the study were analyzed, consisting of pellets produced with: 100% pinus (P100), considered as a control treatment; 75% pinus and 25% of one of the analyzed residues (F25P75, when the residue was pinion failure, G25P75, for the treatment containing grimpa, and Pm25P75, when the treatment had apple pruning); 50% of pine and 50% of other analyzed components, being F50P50 (for pinion failure), G50P50 (grimpa) and Pm50P50 (apple pruning); (F100P25), G75P25 (Grimpa) and Pm75P25 (apple pruning) and the homogeneous treatments with 100% of failure (F100); 100% grimpa (G100) and 100% apple pruning (Pm100). For each treatment was established for the ideal parameters of temperature, pressure and compaction of the pellets produced in laboratory pelletizer. These data were established based on the physical and chemical properties of biomasses in nature and also on the quality of the non-process obtained pellet by means of successive compaction tests. After production of the pellets a quality of this biofuel was determined by its physical, mechanical, chemical and energetic properties. From the results obtained in the laboratory, pellets were classified based on the quality criteria of ISO 17225-2 for biomass pellets for energy generation. It was concluded that the treatments F75P25, G75P25 G50P50 and G25P75 were the only ones that reached quality for residential and commercial use. The treatment with better quality for residential and commercial use was treatment G25P75. The treatments Pm100, Pm75P25, Pm50P50, Pm25P75 and G100 did not achieve average ratings in relation to ISO 17225-2 for any quality category described in the standard.

Keywords: Pinion failure; Weather vane; Prune Apple Tree; Pinus; pelletizing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Falhas de pinhão após a separação dos pinhões do estróbilo feminino da araucária (pinha).....	37
Figura 2- Coleta das grimpas de araucária na Fazenda da Epagri, em Lages – SC.	38
Figura 3- Galhos provenientes da atividade de poda das macieiras	38
Figura 4- Maravalha de pinus utilizada nos ensaios de peletização	39
Figura 5-Pellet de cada tratamento utilizado no experimento	41
Figura 6 - Peletizadora piloto laboratorial	42
Figura 7 - Matriz plana de peletização da peletizadora piloto de laboratório	43
Figura 8- Peletizadora piloto, locais de coleta dos parâmetros.	44
Figura 9- Medição da temperatura dos pellets após a saída da esteira de resfriamento	45
Figura 10- A= Pellet de qualidade A; B= Pellet de qualidade B; C= Finos.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Análises químicas e físicas realizadas nas matérias-primas <i>in natura</i>	40
Tabela 2 - Composição dos tratamentos utilizados no experimento	40
Tabela 3 - Parâmetros de peletização na fabricação de pellets com diferentes tipos de resíduos em peletizadora piloto	47
Tabela 4- Parâmetros de peletização na fabricação de pellets com diferentes tipos de resíduos em peletizadora piloto	47
Tabela 5- Análises físicas e químicas realizadas nos pellets.....	48
Tabela 6- Especificações técnicas de <i>pellets</i> segundo as normas da Organização Internacional de Padronização (ISO 17225-2) para as categorias de uso A (uso doméstico) e B (setor de serviços).....	49
Tabela 7- Especificações técnicas de <i>pellets</i> segundo as normas da Organização Internacional de Padronização (ISO 17225-2), para as categorias de uso I (Industrial).	49
Tabela 8 Propriedades Físicas dos resíduos <i>in natura</i>	51
Tabela 9- Propriedades Químicas dos resíduos	52
Tabela 10- Distribuição granulométrica dos resíduos <i>in natura</i>	54
Tabela 11- Granulometria das misturas contendo falha de pinhão e pinus (A) e do tratamento testemunha (P100)	55
Tabela 12- Granulometria das misturas contendo grimpa de araucária e pinus (B).....	56
Tabela 13- Granulometria das misturas contendo poda de maçã e pinus.....	57
Tabela 14- Densidade a granel média dos tratamentos em função das misturas de resíduos utilizadas no estudo	57
Tabela 15- Composição química imediata dos <i>pellets</i> contendo diferentes proporções de pinus, falha de pinhão, grimpa de araucária e poda de maça.	58
Tabela 16- Propriedades físicas e energéticas dos pellets contendo diferentes proporções de pinus, falha de pinhão, grimpa de araucária e poda de maça.	60
Tabela 17- Propriedades físicas e mecânicas dos <i>pellets</i> de qualidade A produzidos com diferentes proporções de pinus, falha de pinhão, grimpa de araucária e poda de maça	62
Tabela 18- Propriedades físicas de pellets produzidos com diferentes misturas de pinus e bambu	63
Tabela 19- Propriedades físicas e mecânicas dos <i>pellets</i> de qualidade B produzidos com diferentes proporções de pinus, falha de pinhão, grimpa de araucária e poda de maça.	63

Tabela 20– Inclusão dos pellets às categorias e qualidade da Norma ISO 17225-2	65
Tabela 21- Inclusão dos pellets às categorias e qualidade da Norma ISO 17225-2 para uso doméstico e comercial, segundo cada parâmetro de classificação	66
Tabela 22- Inclusão dos pellets às categorias e qualidade da Norma ISO 17225-2 para uso industrial, segundo cada parâmetro de classificação	67

LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM: American Society for Testing and Materials
CAV: Centro de Ciências Agroveterinárias
CF: Carbono fixo
CV: Coeficiente de variação
DB: Densidade básica
DG: Densidade a granel
DIN: Deutsches Institut für Normung
EN: European Standard
EPAGRI: Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
ha: Hectare
ISO: *International Organization for Standardization*
kg: Quilogramas
m³: Metros cúbicos
Mg: Megagramas
mm: Milímetro
N: Nilton
NBR: Norma Brasileira
PCL: Poder calorífico Líquido
PCS: Poder calorífico superior
SC: Santa Catarina
Tappi: Technical Association of the Pulp and Paper Industry
TC: Teor de cinzas
TET: Teor de extractivos totais
TL: Teor de lignina
TU: Teor de umidade
TV: Teor de volatéis
UDESC: Universidade do Estado de Santa Catarina

SUMÁRIO

1. Introdução	19
2. Objetivo	23
2.1 Objetivo geral	23
2.2 Objetivos específicos	23
3. Revisão bibliográfica.....	25
3.1. Fontes de Biomassa para geração de energia.....	25
3.2.Biomassa Florestal.....	25
3.2.1. Araucaria angustifolia.....	26
3.2.2. <i>Pinus</i> spp.....	28
3.3. Biomassa Agrícola.....	29
3.3.1 Cultura da Maçã.....	29
3.4. Geração de Energia a partir de biomassa	29
3.4.1. Compactados de Biomassa	30
3.4.1.1. Qualidade da Biomassa para produção de pellet	31
3.4.1.2. Parâmetros do processo produtivo que influenciam na qualidade dos pellets.....	34
4. Materiais e Métodos	37
4.1 Coleta do material	37
4.2 Preparação da biomassa para peletização	39
4.3 Análise da qualidade dos resíduos in natura.....	40
4.4. Produção dos Pellets	40
4.5. Parâmetros de peleização	46
4.6. Análises da qualidade dos pellets	48
4.7. Análise estatística	50
5. Resultados e discussões	51
5.1 Qualidade da Biomassa.....	51
5.2. Características físicas das misturas utilizadas para a produção dos pellets	55

5.4. Qualidade dos Pellets.....	58
5.5. Qualidade geral do Pellet segundo a ISO 17225-2	64
5.5.1 Qualidade parcial dos pellets de uso domestico/serviços segundo a ISO 17225-2	65
5.5.2 Qualidade parcial dos pellets de uso industrial segundo a ISO	66
6. Conclusão	69
7. Bibliografia.....	71

1 Introdução

Países de todo o mundo estão concentrando esforços para aumentar o uso de fontes de energias renováveis como opção atraente para alcançar a segurança energética futura (BANERJEE *et al.*, 2010). Aliado a isso, a comunidade internacional também vem empreendendo ações para a redução da emissão de gases que provocam o efeito estufa. Isso está sendo feito 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 menos poluentes, em substituição ao uso de energias oriundas de combustíveis fósseis (STAIISS; PEREIRA, 2011).

Segundo Brand (2007), além do apoio governamental para iniciativas neste sentido, as vantagens ambientais da utilização das energias renováveis em comparação com recursos não renováveis são maximizadas pelo crescente interesse por parte de empresas no uso destas fontes energéticas.

Dentro deste contexto, a necessidade de produção de energia barata, limpa e eficiente subordinada a urgência na otimização do uso dos recursos, coloca a biomassa no foco da pesquisa mundial para a produção de energia renovável, por meio do uso de seus resíduos.

Além disso, o uso da biomassa não vem se restringindo somente a produção de biocombustíveis líquidos, como o etanol e o biodiesel, mas também para biocombustíveis sólidos como lenha, briquetes e *pellets*. A importância deste recurso energético é potencializada quando seu uso se dá em substituição ao uso de combustíveis fosseis, como o óleo diesel, o carvão mineral, o gás natural ou mesmo quando em substituição à eletricidade oriunda de geração termoelétrica com uso de combustíveis fósseis. O uso da biomassa para a geração de energia, segundo Brand (2007), também é atraente economicamente, pois é complementação de renda tanto para quem vende quanto para quem compra e beneficia quando são utilizados os resíduos de biomassa.

Os resíduos de biomassa vegetal são recursos orgânicos com potencial para a geração de energia, podendo ser gerados espontaneamente na natureza ou como consequência da atividade humana. Na maioria dos casos, a sua disposição final representa um problema para a sociedade (ALFONSO *et al.*, 2009).

Dentro das fontes de biomassa vegetal, destacam-se os resíduos florestais e agrícolas. A biomassa residual florestal pode ser oriunda de plantios ou dos processos de transformação da madeira. Já a biomassa residual agrícola engloba culturas e processamentos da

agroindústria que também produzem resíduos com potencial energético, como por exemplo, a casca de arroz, palha de milho, bagaço de cana, soja, entre outros.

Nos processos produtivos agrícolas e florestais, a geração de resíduos se torna um desperdício de produção, visto que estes nem sempre são convertidos em uma nova fonte de renda para as empresas produtoras. Estes resíduos, em muitos casos, são mal manejados, sendo depositados em locais impróprios, gerando problemas ambientais graves, como o assoreamento de rios, a erosão de encostas e a diminuição da biodiversidade local.

Como o Brasil é um dos maiores produtores agrícolas e florestais do mundo, a quantidade de biomassa residual representa um depósito de energia que pode ser aproveitado (DIAS *et al.*, 2012). Atualmente a existência de legislação referente a passivos ambientais exige a gestão adequada dos resíduos. A 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, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotados pelo Governo Federal objetivando a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. Ou seja, existe a necessidade de um destino correto para os resíduos, fazendo com que os produtores e empresas envolvidas busquem alternativas de utilização deste tipo de material, como por exemplo, a transformação em energia.

Como resultado da atividade industrial, significativos volumes de resíduos de biomassa foram e continuam sendo gerados nas diferentes fases do processo de transformação da madeira (SIMIONI *et al.*, 2013).

Além dos plantios comerciais de *pinus*, em Santa Catarina, a *Araucaria angustifolia* continua sendo uma árvore muito importante, mas atualmente muito mais para pequenos agricultores pelo comércio das sementes e na composição da paisagem de pastos. A araucária produz dois resíduos, falha do pinhão e a grimpa, que podem aumentar a renda familiar dos pequenos produtores.

Outra importante cultura no estado de Santa Catarina é a da macieira, onde o estado é o maior produtor do Brasil. Segundo dados de 2014/15 da Associação Brasileira de Produtores de Maçã (ABPM, 2015) Santa Catarina produziu 52,6% do total de maçã produzido no país, em uma área de 17,582 hectares segundo o IBGE. Para manter os pomares saudáveis para a produção de maçã é necessário realizar a poda da árvore. Segundo Zandonadi (2013), no podar, uma macieira gera de 10-15 kg de resíduo, que são queimados inadequadamente no campo.

No entanto, a biomassa residual muitas vezes têm algumas características tais como tamanho heterogêneo das partículas, alto teor de umidade e baixa densidade energética, que

tornam a sua utilização como biocombustível sólido difícil (CASTELLANO *et al.*, 2015). Neste sentido, a compactação, por meio da produção de *pellets* constitui em tecnologia viável para obter baixo teor de umidade, biocombustível denso e uniforme e que pode ser utilizado em diferentes aplicações, incluindo fogões domésticos, caldeiras e centrais elétricas (LOUÇÃO, 2008; CASTELLANO *et al.*, 2015). Dentro do contexto energético, o uso de *pellets* de resíduos como uma alternativa de energia sustentável é um instrumento eficaz na luta contra as alterações climáticas (MOLA-YUDEGO, 2014).

Nos últimos anos, os *pellets* vêm se tornado importante combustível na produção de energia e calor em toda a Europa, América do Norte e mais recentemente na Ásia. Os *pellets* são considerados opção de combustível competitivo, uma vez que a densidade mais elevada deste recurso energético se traduz em redução dos custos de transporte e armazenamento. Estas vantagens podem ser usadas em áreas onde o custo de fornecimento eficiente é um desafio devido ao armazenamento e transporte a longas distâncias (LOUÇÃO, 2008; THEK, OBERNBERGER, 2010; DIAS *et al.*, 2012). A crescente demanda por *pellets* levou a maior número de usinas de peletização e maior capacidade de produção (PEKSA-BLANCHARD, 2007).

Além disso, eles apresentam menor teor de umidade e maior poder calorífico volumétrico, em comparação com a biomassa não transformada, maior eficiência energética, uniformidade, e menor ação poluidora. A ação poluidora é reduzida principalmente pela minimização na produção de fumaça e pelo maior controle da combustão nos equipamentos de aquecimento disponíveis no mercado, proporcionando assim maior eficiência de queima com menor emissão de monóxido de carbono. Finalmente, eles são fáceis de serem transportados, armazenados e podem ser obtidos a partir de diferentes matérias-primas, por conseguinte, são adaptáveis a diferentes locais e com matérias-primas alternativas (LOUÇÃO, 2008; THEK, OBERNBERGER, 2010; DIAS *et al.*, 2012).

Segundo Carvalho *et al.* (2013) a mobilização das novas tecnologias de transformação de lenhas, resíduos lenhosos, industriais e agrícolas num produto final de fácil manuseio, transporte, armazenamento e utilização, como é o caso dos *pellets*, constitui fator fundamental para o melhor uso da biomassa como alternativa aos combustíveis fósseis.

A produção de *pellets* de madeira tem aumentado consideravelmente ao longo dos últimos anos. Em 2006 a produção de *pellets* de madeira em todo o mundo, excluindo a Ásia, América Latina e Austrália, foi entre 6 e 7 milhões de toneladas, enquanto em 2010 a

produção dos mesmos países tinha aumentado para 14,3 milhões de toneladas. Assim, a produção cresceu mais de 100% nesse período (COCCHI *et al.*, 2011).

No Brasil, a produção de *pellets* é muito recente e resume-se a algumas pequenas unidades produtoras na Região Sul, fundamentalmente para o atendimento do mercado interno (NONEs, 2014). A produção de *pellets* ainda ocorre de forma desestruturada, sem qualquer padronização ou normatização, uma vez que o país não possui máquinas peletizadoras adequadas e nem normas oficiais para a produção de compactados de madeira (GARCIA, 2010; NONEs, 2014).

Porém, o país tem uma elevada disponibilidade de biomassa que o potencializa a ser um importante produtor de *pellets*, para o mercado internacional, além de atender uma promissora potencialidade do mercado interno.

Mundialmente, a maioria dos *pellets* é produzida a partir de serragem obtida da conversão da madeira na indústria. No entanto, as crises cíclicas no setor da construção civil e o grande crescimento da indústria de *pellets* nos últimos anos, principalmente na Europa e América do Norte, com desenvolvimento mais recente na Ásia, diminuiu a disponibilidade destas matérias-primas tradicionais. Por conseguinte, existe interesse crescente no estudo de novos materiais que podem ser adequados à peletização (COCCHI *et al.*, 2011; NUNES *et al.*, 2014).

Porém, é muito importante que os *pellets* de novos materiais atinjam os padrões de qualidade requeridos nos processos de produção de energia. Os parâmetros físicos de qualidade dos *pellets* como a durabilidade mecânica, densidade de partícula e densidade do biocombustível tem que ser controladas, bem como a sua composição química e desempenho energético (CASTELLANO *et al.*, 2015; NIEDZIÓŁKA *et al.*, 2015). Por isso, diferentes normas de qualidade têm sido desenvolvidas, principalmente em países europeus (CASTELLANO *et al.*, 2015).

A padronização das propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos *pellets* é fator de extrema importância, tanto para emissão de laudos de qualidade nacionais, que muitas vezes são requeridos pelos próprios consumidores, quanto para o mercado internacional, que investe cada vez mais na importação de *pellets*.

Portanto, estudos que envolvam o estabelecimento de parâmetros técnicos para a produção de *pellets* de alta qualidade; a utilização de diferentes tipos de biomassa para a produção de *pellets* e a análise da qualidade deste biocombustível com base em normas internacionais já instituídas são questões ainda pouco exploradas no Brasil, sendo, portanto, temas que requerem mais investigação e análise.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Determinar os parâmetros técnicos para a compactação e a qualidade dos *pellets* produzidos a partir de diferentes tipos de biomassa florestal e agrícola.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar as biomassas residuais agrícolas e florestais utilizadas para a produção dos *pellets* por meio de suas propriedades físicas, químicas e energéticas.
- Ajustar os parâmetros de compactação relacionados a produção de pellets produzidos a partir de diferentes tipos de biomassa, em peletizadora piloto de laboratório.
- Determinar a qualidade dos *pellets* produzidos a partir de diferentes tipos de biomassa por meio de suas propriedades físicas, mecânicas, químicas e energéticas.
- Classificar os *pellets* produzidos com base nos critérios de qualidade da norma internacionais ISO 17225-2.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. FONTES DE BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

Segundo Coelho (1982) biomassa é o conjunto de materiais orgânicos gerados por organismos autótrofos do reino vegetal (fitomassa) ou acumulados nos seres heterótrofos do reino animal (zoomassa). Os organismos fotossintéticos (autótrofos) são capazes de transformar a energia solar em energia química, mediante a atuação biogeoquímica dos cloroplastos contidos na clorofila das plantas. Essa energia é retida e acumulada nos espaços intermoleculares e é liberada em processos que envolvem oxidação, redução e hidrólise, que podem ser de natureza termoquímica, bioquímica e biológica.

A biomassa é responsável atualmente por pouco mais de 10% do consumo final de energia primária do planeta, cerca de 48 EJ/ano, fazendo dela a mais importante fonte de energia renovável utilizada. Evidentemente, o seu grau de utilização varia de país para país. Em média, a biomassa contribui com menos de 10% da oferta de energia primária em países industrializados (DE LUCENA TAVARES; TAVARES, 2015).

De forma geral, os combustíveis derivados da biomassa são denominados de biocombustíveis e podem ser classificados em: Biomassa Florestal, Agrícola e Agroindustrial e de Resíduos Urbanos (BRAND, 2010).

3.2 BIOMASSA FLORESTAL

A biomassa florestal possui características tais que permitem a sua utilização como fonte alternativa de energia, seja pela queima da madeira, como carvão, aproveitamento de resíduos da exploração e aproveitamento de óleos essenciais, alcatrão e ácido pirolenhoso (COUTO *et al.*, 2000). A biomassa Florestal inclui todo material orgânico produzidos pelas árvores, entre eles estão: o tronco, os ramos, as folhas, a casca e as raízes.

A utilização da biomassa florestal como fonte de energia contribui positivamente para a política energética brasileira, haja vista que é uma fonte limpa e renovável, permitindo assim a diminuição do consumo de combustíveis fósseis, nocivos ao meio ambiente (MIRANDA *et al.*, 2015).

3.2.1 Araucaria angustifolia

De acordo com Mantovani et al (2004), uma das principais florestas, de ocorrência natural, presente em Santa Catarina é a Floresta Ombrófila Mista, também conhecida como Floresta de Araucária e faz parte do bioma da Mata Atlântica.

Exemplo de biomassa florestal são os galhos, folhas, sementes e casca contidos na serrapilheira de uma floresta. Segundo Caldeira et al. (2007) a biomassa média estocada pela floresta ombrófila mista foi $250,90 \text{ Mg ha}^{-1}$, sendo deste $104,17 \text{ Mg ha}^{-1}$ de carbono orgânico, correspondendo a 41,52% da biomassa total. Desse total, a *Araucaria angustifolia* contribuiu com 23,14% da biomassa total gerada.

A espécie *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze é o principal componente da Floresta de Araucária. Pertencente à família Araucariaceae é a única espécie de seu gênero com ocorrência natural no Brasil (MANTOVANI et al., 2004).

Segundo a Indústria brasileira de árvore (IBÁ, 2015), a área ocupada pela *Araucaria angustifolia* no ano de 2014 era de 11.122 hectares no Brasil. Segundo Backes (1999) a área de ocorrência natural de *A. angustifolia* ocupava, no sul do Brasil, grande parte dos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Agrupamentos menores eram encontrados nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo.

Em relação à Araucária, os produtos e usos mais importantes já estiveram associados à obtenção de madeira, incluindo madeira para serraria, usos energéticos (lenha) e fabricação de compensados, pasta mecânica e celulose. Os galhos e refugos, e especialmente o “nó de pinho” servem para lenha e combustível de caldeiras e os pinhões servem de alimento para o homem e animais (GUERRA et al., 2002).

Atualmente, em função das restrições de exploração madeireira os usos mais importantes estão associados ao pinhão (consumo familiar e coleta para comercialização; (VIEIRA DA SILVA E REIS, 2009) e lenha a partir dos galhos para uso nas propriedades agrícolas (GUERRA et al., 2002). Além disso, o uso do pinhão como alimento remonta um período anterior à chegada dos europeus na América (BITENCOURT E KRAUSPENHAR, 2006)

A produção de pinhão é uma atividade de grande importância econômica, que envolve a participação de homens, mulheres e crianças. Pode ser considerada a base da Agricultura Familiar; sendo, em alguns casos, a principal fonte de renda anual das famílias envolvidas nessa atividade. Porém, apesar dessa importância notável, a produção de pinhão nem sempre é bem remunerada e ocorre em condições de alto risco físico, principalmente para os

escaladores, que são os homens que sobem nas árvores para derrubar as pinhas no chão (NETO, 2010).

Quando há o envolvimento de mulheres e crianças na produção; geralmente, o trabalho destinado a elas é o transporte dessas pinhas do meio da floresta até o local de armazenamento e a separação do pinhão das falhas. Portanto, pode-se dizer que a produção de pinhão é uma atividade que envolve a família toda; que é pouco valorizada e que oferece grande risco a saúde e bem estar físico das pessoas envolvidas (NETO, 2010).

Segundo o IBGE (2013), referente a 2012, a quantidade produzida de pinhão foi de 8889 toneladas, gerando uma economia de R\$ 16.121.000. Segundo Mantovani *et al.* (2004) a produção de pinhão pode chegar a 160 kg.ha⁻¹.

No entanto, o pinhão é apenas um dos componentes do estróbilo feminino da araucária (pinha). Segundo Mantovani *et al.* (2004) em média, 41,8% do peso fresco dos estróbilos foram compostos por sementes, 50,7% por escamas estéreis e não fertilizadas (falhas) e 7,5% pelo eixo central do estróbilo.

Além da produção de pinhões, os galhos e as grimpas são utilizadas para energia como mencionado pelo Guerra *et al.* (2002). As grimpas são ramos secundários, finos e aciculados da *A. angustifolia*.

Schumacher (2004) quantificou a produção total de serapilheira no povoamento de *Araucaria angustifolia* com 17 anos de idade e alcançou 6,96 Mg/ha, sendo ela formada por 26,3% de galhos e 73,7% por acículas (grimpas). O mesmo autor, em 2012, quantificou a biomassa em um povoamento de *Araucaria angustifolia* de 27 anos e determinou o acúmulo de biomassa: madeira do tronco (51,05%), casca do tronco (14,07%), raiz (13%), galhos vivos (11,08%), galhos mortos (0,5%) e grimpas (8,06%) (SCHUMACHER, 2012).

No entanto, as grimpas não coletadas podem se tornar problema fitossanitário para os animais domésticos criados em sistemas extensivos de pastagem nativa. Evangelista (2014), encontrou grimpas nos pulmões de bovinos e equinos que pastam ao redor de florestas de *A. angustifolia*. As grimpas nos pulmões podem causar broncopneumonia purulenta, dificuldade respiratória, tosse, emagrecimento progressivo, as vezes com dificuldade de deglutição, ulcera nasal e hipertermia. A aspiração de corpo estranho é pouco relatada em animais de produção. Contudo a “grimpa” da araucária foi uma das principais causas de morte por dificuldade respiratória em bovinos na região serrana de Santa Catarina. Geralmente os bovinos morrem ou são sacrificados devido à agonia respiratória.

Nesse contexto, a espécie *A. angustifolia* tem potencial para fornecimento de biomassa florestal para geração de energia por meio da utilização dos resíduos da cadeia produtiva do pinhão (falhas do pinhão) e pelo uso dos galhos derivados da derrama natural da espécie (grimpas).

3.2.2 *Pinus* spp.

Em termos de floresta plantada, as espécies do gênero *Pinus* foram implantadas em substituição ao uso da Araucária e atualmente é a mais importante matéria-prima para a indústria de base florestal da região serrana sul de Santa Catarina.

Segundo a Indústria Brasileira de Árvore (IBÁ, 2015), a área ocupada com floresta de *Pinus* spp. no ano de 2014 era de 1.588.997 hectares no Brasil e Santa Catariana tinha 541.162 hectares. O consumo industrial da madeira de *Pinus* foi de 41,76 milhões de m³.

A madeira de *Pinus* é utilizada nas indústrias de transformação primária (serrarias e laminadoras), na indústria de painéis, celulose e papel, construção civil e para a fabricação de móveis. Neste contexto, são gerados na indústria os mais variados tipos de resíduos. Segundo Hüeblin (2001), os principais resíduos da indústria madeireira são: a) a serragem, originada da operação das serras, que pode chegar a 12% do volume total de matéria-prima; b) os cepilhos ou maravalhas, gerados pelas plainas, que podem chegar a 20% do volume total de matéria-prima, nas indústrias de beneficiamento; c) a lenha ou cavacos, composta por costaneiras, aparas, refilos, cascas e outros, que pode chegar a 50% do volume total de matéria-prima, nas serrarias e laminadoras.

De acordo com Da Costa *et al.* (2008) o rendimento da matéria-prima nas serrarias tem-se caracterizado por ser relativamente baixo, aumentando o volume dos resíduos produzidos, o que ocasiona uma forte tendência do uso destes mesmos e de madeiras de inferior qualidade para a produção de chapas aglomeradas.

Os resíduos de madeira traçam novo caminho, começam a deixar de ser problema para o meio ambiente, pois com o seu aproveitamento como fonte nobre de energia, trazem vantagens não só como alternativa energética, mas também ao meio ambiente (NASCIMENTO, 2010). Conforme Dal Farra e Esperancini (2005) são aproveitados para utilização direta em geração de energia térmica e as mesmas autoras comentam, além da vantagem desse processo, são as vantagens ambientais que minimizam os problemas decorrentes da disposição dos resíduos, que quando queimados geram problemas de poluição do ar.

Assim, os resíduos da cadeia produtiva da madeira na região de estudo, principalmente a biomassa oriunda da madeira de *Pinus* tem potencial para o uso na geração de energia.

3.3 BIOMASSA AGRÍCOLA

A biomassa agrícola, às vezes denominada de resíduos agrícolas, representa os subprodutos da produção agrícola, por exemplo, a palha de trigo restante após a colheita, o corte da palha de arroz na safra de grãos, ou o material restante após a colheita de colza, poda de vinhas, oliveiras e árvores de fruto, resíduos resultantes da produção de óleo, casca e sementes de oliva (ZHANG, 2015; NIEDZIÓŁKA *et al.*, 2015).

3.3.1 Cultura da Maçã

Segundo o IBGE (2016) a estimativa da produção de maçã no Brasil foi de 1.373.633 toneladas em 37.137 ha na safra 2013/2014. Santa Catarina é o estado que possui a maior área, 17.762 ha e teve produção de 629.437 toneladas em 2013/2014.

Á prática de condução e poda é fundamental em um pomar de macieira, influindo diretamente no crescimento e na produtividade das plantas. Essa prática visa o direcionamento dos ramos no sentido de melhorar sua distribuição ao longo do prolongamento do tronco, para formar uma estrutura sólida que possa sustentar uma carga grande de frutos durante a fase produtiva (EBERT, 1988).

Segundo Zandonadi (2013), cada macieira podada gera como produto final de sua poda uma quantidade que varia de 10 até 15 kg de madeira e aproximadamente 10416,6 kg por hectare.

Nesse contexto, o resíduo da atividade de poda da macieira pode ser constituir em uma importante fonte de biomassa para geração de energia na região produtora de maçã em Santa Catarina.

3.4 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOMASSA

Em todo o mundo, milhões de pessoas utilizam a biomassa como fonte de energia, principalmente nos países em vias de desenvolvimento (BHATTACHARYA, 2002). A biomassa é amplamente reconhecida como uma fonte de energia renovável e sustentável em

todo o mundo (MARIA, 2011). Porém, de acordo com Dias (2002), grande parte é utilizada em processos simples, poluidores e ineficazes em termos energéticos.

A biomassa em sua forma primária possui baixa densidade, o que dificulta o transporte e requer muito espaço de armazenamento, resultando no aumento dos custos, ao mesmo tempo possui baixo valor calórico por unidade de volume (NIEDZIÓLKA *et al.*, 2015; LIMA, 1988). A maioria dos resíduos contém elevada umidade, portanto parte da combustão é consumida para secar a própria biomassa (LIMA, 1988).

A utilização de resíduos (serragem, galhos, cascas, bagaço de cana, etc.) funciona como alternativa energética aos combustíveis sólidos convencionais (lenha e carvão). O modo mais simples de utilizar estes resíduos é a queima direta, porém este método traz algumas desvantagens como menor poder calorífico líquido, menor densidade e maior umidade.

Portanto, uma das alternativas de uso da biomassa para geração de energia que merece destaque é a compactação, onde partículas de biomassa podem ser compactadas na forma de pastilhas cilíndricas (MARIA, 2011). Algumas vantagens dos compactados de biomassa incluem a maior densidade e energia, a melhor propriedade de fluxo e armazenamento e menor desperdício de material (ADAPA, 2002).

Briquetagem e peletização são processos que convertem partículas de biomassa em biocombustível sólido de alta densidade que é fácil de transportar, tem alta eficiência de queima e baixa emissão de poluentes (MISHRA *et al.*, 1995).

3.4.1 Compactados de Biomassa

Os compactados de biomassa podem ser classificados em duas categorias: briquetes e pellets.

Briquetes têm tamanhos variáveis (por exemplo 25-85 mm), com densidades normalmente variando de 700 kg m^{-3} a 1200 kg m^{-3} , dependendo do material utilizado e das condições de produção. Briquetes são sensíveis à umidade e podem desintegrar-se quando exposto à água ou alta umidade. Durante a fase de combustão inicial, briquetes emitem grande quantidade de fumaça por causa de seu teor de material volátil elevado, resultando em gás combustível não queimado (FELFLI, 1998).

Garcia (2013) cita que os pellets de madeira geralmente são feitos com os resíduos da indústria madeireira tais como a serragem, maravalhas, aparas, cavacos, galhos, etc. Essa matéria-prima é processada nas plantas industriais estacionárias e, com alta pressão e

temperatura, são comprimidos no formato de pequenos cilindros de 6,0 a 10,0 mm de diâmetro, com até 30 mm de comprimento.

3.4.1.1 Qualidade da Biomassa para produção de pellet

Para a produção de pellets os parâmetros mais importantes relacionados as matérias-primas são o umidade, composição química (lignina e extractivos), tamanho da partícula, a densidade e o teor de cinzas.

A umidade pode ser considerado uma das características mais relevantes ao se utilizar materiais 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 (DE SOUZA, 2012).

O conteúdo de umidade da biomassa pode afetar a densificação de três maneiras: (a) pela diminuição da temperatura de transição vítreia (TUMULURU *et al.*, 2011); (b) promovendo a formação de pontes sólidas (TUMULURU *et al.*, 2011) e (GROVER, 1996; MANI, 2006; ORTIZ; 1996) e (c) através do aumento da área de contato de partículas por forças de Van der Waals (MANI, TABIL E SOKHANSANJ, 2003). O impacto do teor de umidade é diferente dependendo do tipo de biomassa a ser densificada (TUMULURU *et al.*, 2011) e além disso, um material lignocelulósico excessivamente seco atua como isolamento térmico que impede a transmissão de calor, um elemento-chave no processo de compactação (GROVER, 1996; MANI, 2006; ORTIZ, 1996).

Segundo Niedziółka *et al.* (2015), a biomassa proveniente de plantas que serão submetidas a compactação, por pressão, deve possuir umidade dentro do intervalo de 8-15%. Dias *et al.* (2012) e Niedziółka *et al.* (2015) citam que valores de umidade acima de 15% podem levar à quebra dos compactados ou à degradação biológica durante o transporte e armazenamento e é a principal causa na diminuição da qualidade dos pellets e do seu poder calorífico. Demirbas, Sahin-Demirbaş, e Hilal-Demirbaş (2004) mencionam que o aumento do umidade da madeira de 7% para 15% aumentou significativamente a resistência dos pellets. Monteiro *et al.* (2012) afirma que material bruto com conteúdo de água superior a 15% é difícil de peletizar.

Li e Liu (2000) descobriram que a umidade ótima de aproximadamente 8% foi recomendado para produzir briquetes de alta densidade a partir de casca de árvore, resíduos de serraria, aparas de madeira, feno de alfafa, alfafa fresca, e grama. Já para madeira de faia os

teores de umidade de 6-10% são ideais (STELTE, 2011), para madeira de oliveira é 5% (CARONE, 2011), e para madeira de pinho é de 6-8% (NIELSEN *et al.*, 2009).

Mani (2006) e Ortiz (1996) analisaram a sua influência e determinaram que, com um teor superior a 50% (base úmida), a umidade tornou impossível a formação de um agregado ligado a partir de resíduos lenhosos da silvicultura.

Com base nas informações anteriormente mencionadas pode-se constatar que, dependendo do tipo de matéria-prima e do processo de compactação existe, uma faixa de umidade na qual o material pode ser briquetado ou peletizado adequadamente. Umidade em excesso pode provocar explosões devido à formação de vapor, mas a matéria-prima muito seca dificulta os mecanismos de ligação entre as partículas. Diversos estudos recomendam que o valor ótimo de umidade deve estar entre 5 e 10% (DIAS *et al.*, 2012).

Além da umidade outra propriedade da biomassa que contribui para ligação dos materiais é o teor de lignina (DÜCK, 2013) e a quantidade de extrativos presentes na biomassa.

Segundo Barrichelo e Brito (1985), os extrativos são componentes accidentais que não fazem parte da estrutura química da parede celular. Incluem elevado número de compostos, sendo que a maioria são solúveis em água quente, álcool, benzeno e outros solventes orgânicos neutros. Apresentam baixo ou médio peso molecular, exceto alguns como, por exemplo, os taninos.

De acordo com Pettersen (1984), a presença de alguns desses componentes influencia a resistência ao ataque de fungos e insetos, a coloração, o odor, a permeabilidade, a densidade e a dureza da madeira. Podem constituir até 8% do peso seco de madeiras normais de espécies de clima temperado, podendo chegar a até 20% em madeiras normais de espécies de clima tropical.

A lignina é um polímero natural que atua como ligante entre as fibras de celulose em plantas vivas (BERGHEL *et al.*, 2013). Segundo YU *et al.* (2017) a lignina é um polímero de rede aleatória, tridimensional composta por unidades ligadas de fenilpropano tornando-o mais difícil de se decompor e também desempenha papel de ligação entre as hemiceluloses e celulose dentro da parede da célula.

A compactação do material é garantida pela lignina que está contida na própria madeira e permite a produção do pellet sem o uso de colas ou ligantes (DÜCK, 2013). De acordo com Kaliyan e Morey (2009), a lignina atua como um agente de ligação *in situ* no material. Em temperaturas elevadas, a lignina amolece e ajuda o processo de ligação.

Bradfield e Levi (1984) citam que a durabilidade do pellet diminuiu com valores de 34% para o conjunto do conteúdo de lignina e extractivos.

Quanto à granulometria, segundo Dias *et al.* (2012), a matéria-prima ideal deve ser composta por uma mistura de partículas de vários tamanhos, sendo que a medida máxima depende do tipo de material e do diâmetro da matriz da prensa. Geralmente é aceitável uma dimensão entre 8 e 10 mm, enquanto grandes prensas com matrizes de 125 mm aceitam partículas de até 15 mm. O tamanho inicial das partículas influencia também a densidade final dos compactados. Matéria-prima de baixa dimensão de partículas resulta em compactados mais densos, mas requer pressões e temperaturas muito elevadas para aglomerar as partículas sem adição de ligantes (ERIKSSON; PRIOR, 1990).

O tamanho das partículas é um influenciador importante da durabilidade do pellet. Geralmente, quanto mais fina a moagem, tanto maior será a durabilidade (KALIYAN; MOREY, 2009). Segundo o mesmo autor, partículas finas costumam aceitar mais umidade que partículas grandes e, portanto, são submetidas a grau mais elevado de condicionamento. MacBain (1966) cita que as partículas grandes são pontos de fissuras que causam rachaduras e fraturas nos pellets.

Mani (2006), Samson (2000) e Jannasch (2001) descobriram que a dureza do pellet aumentou moderadamente como a diminuição do tamanho das partículas. O tamanho da malha variou entre 3,2 e 2,8 mm. Olsson (2002) e MacMahon (1982) destacaram a importância de evitar a utilização de partículas grandes, pois isso faz com que o pellet não quebre tão facilmente. O menor tamanho das partículas aumenta a ligação das partículas, até valor de 0,5 mm. A partir deste tamanho em diante, o processo torna-se mais difícil (MANI, 2006).

O rastreio é necessário para separar finos residuais a partir dos pellets acabados antes de ensacamento. Finos e fragmentos coletados de triagem são devolvidos para o secador ou peletizador. Se o teor de finos exceder 3% do produto que sai do processo de triagem, há problema com a matéria-prima ou o processo de peletização tem que ser corrigido (CAMPBELL, 2007).

Uma mistura de diferentes tamanhos de partículas melhora a qualidade do pellet porque a mistura de partículas promove a ligação com e sem espaços interparticulares (GROVER, 1996; KOMAREK, 1991).

Quanto à densidade a granel da biomassa, o baixo valor desta propriedade é um dos principais fatores limitantes para sua utilização na geração de energia em escala comercial

(TUMULURU, 2016). Por isso a peletização é um processo que efetivamente aumentar a densidade da biomassa celulósica (ZHANG, 2016).

Materiais vegetais em geral têm densidades baixas, devido à sua estrutura porosa, variando de 40 a 150 kg / m³ para biomassa agrícola (ADAPA, 2002; LARSSON, 2008) e 320-720 kg/m³ para a maioria das espécies de madeira comercializadas (Simpson, 1999).

Segundo Obernberger e Thek (2004) e Zhang (2016), a peletização aumenta a densidade da biomassa a partir de um valor inicial de 40-200 kg/m³ para uma densidade final de 600-800 kg/m³.

Considerando a propriedade de densidade, de acordo com Leaver (1970), quanto maior for a densidade do material, maior é a sua resistência à compressão, o que requer a aplicação de pressão aumentada, a fim de atingir o mesmo grau de compactação.

Com relação as cinzas, segundo Kraiem (2016), altos teores de nitrogênio e materiais inorgânicos limitam a comercialização de pellets agroindustriais. Pellet de alta qualidade, geralmente utilizados no aquecimento doméstico, devem conter menos do que 0,7% e 1% de cinzas (KOFMAN, 2007).

As cinzas de madeira contêm não só as concentrações de óxidos de vários elementos (Ca, Mg, Fe, Na, K, etc.) provenientes do combustível em si, mas também compostos orgânicos que se formam durante o processo de combustão incompleta, por exemplo, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (ORECCHIO, 2016). Os elementos das cinzas podem ser assimilados pelo corpo humano através da inalação direta, ingestão e absorção dérmica de contato, e representam potenciais efeitos adversos sobre a saúde dos seres humanos (FAIZ, 2009).

3.4.1.2 Parâmetros do processo produtivo que influenciam na qualidade dos pellets

Para a produção de pellets os parâmetros mais importantes são a temperatura, pressão, umidade, dimensões das partículas, densidade.

A temperatura, em conjunto com a umidade, é o fator que tem o efeito mais significativo sobre o processo de compactação. A aplicação de calor a um material agregado durante a sua formação confere uma maior coesão, exigindo pressão mínima para se obter a densidade desejada. A hipótese que explica a ação da temperatura baseia-se na característica da lignina. As temperaturas entre 80 ° C e 200 ° C, dependendo dos materiais, a lignina se torna mais suave e apresenta propriedade termoplástica (VAN DAM, 2004). Após

arrefecimento, leva a ligação mais forte entre as partículas e funciona como cola termoplástica (ORTIZ, 1996).

O calor é gerado durante a peletização devido ao atrito entre as partículas e o material e as paredes da peletizadora. Serrano *et al.* (2011) estudaram a distribuição de calor numa prensa de peletização e descobriram que, sob operação em condições estáveis, a temperatura da matriz é de cerca de 90 ° C, enquanto a temperatura da biomassa é de cerca de 70°C. Nielsen et al. (2009) relataram que o processo de peletização gera calor que mantém a temperatura de funcionamento da matriz a 110-130°C. A temperatura ótima para compactação está próxima de 100°C, neste ponto a lignina plastifica, atuando assim como aglutinante natural entre as partículas (SILVA, 2007).

Sob alta pressão, os componentes de ligação naturais, tais como amido, proteínas, lignina, e pectina nas matérias-primas ou biomassa são espremidos para fora das partículas, que contribuem para a ligação inter-partícula (KALIYAN; MOREY, 2009).

A pressão de compactação varia de acordo com a prensa peletizadora, prensas com maior pressão consomem mais energia. Assim, a pressão de compactação e a temperatura durante o processo de peletização devem ser suficientes para que haja boa compactação da biomassa e os pellets produzidos atendam às exigências do mercado (SILVA, 2007).

A pressão de compactação usada para obter os pellets varia entre 110 e 250 N/mm², de acordo com as características das espécies de madeira (LEAVER, 1984). A densidade do pellet aumenta com a quantidade de material comprimido e as pressões geradas durante o processo. A retração do material, e, portanto, a densidade do pellet, é menor à medida que o comprimento do material obtido aumenta. A energia específica não é afetada pela quantidade comprimida (O'DOGHERTY, 1984).

Após o processo de peletização, de acordo com Tumuluru (2014), a umidade da biomassa reduz em cerca de 5-10% (base úmida) com base nas condições do processo de peletização.

No processo produtivo do pellet, 12% da biomassa são utilizadas como combustível para a secagem e 3% são perdidos durante o processo de fabricação, como consequência apenas 85% da matéria prima é efetivamente transformada em pellets, sendo assim para a produção de 1 tonelada de pellets são necessárias 1,15 toneladas de biomassa (Serrano, 2009).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 COLETA DO MATERIAL

Os materiais utilizados para o presente estudo foram a falha do pinhão, obtida a partir do estróbilo feminino da *A. angustifolia* coletada na cidade de Urubici - Santa Catarina em setembro de 2015 (Figura 1); as grimpas, que são as acículas da *A. angustifolia*, que foram coletadas no município de Lages-SC na fazenda da EPAGRI em maio de 2016 (Figura 2); a poda da macieira, que são ramos podados da macieira para a condução da planta, coletada no município Urubici-SC em setembro de 2015 (Figura 3); e a maravalha de *Pinus spp.* doada pela empresa Madepar no município de Lages-SC (Figura 4).

Figura 1 - Falhas de pinhão após a separação dos pinhões do estróbilo feminino da araucária (pinha).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Figura 2 - Coleta das grimpas de araucária na Fazenda da Epagri, em Lages – SC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Na região de estudo, as grimpas são recolhidas pelos agricultores e normalmente deixadas em pilhas no campo ou queimados para a eliminação deste resíduo prejudicial à saúde dos animais criados nas pastagens nativas da região.

A falha do pinhão vem do processo de separação do pinhão da pinha, esse resíduo não tem uma utilização específico nas propriedades onde é gerado. Normalmente as falhas são amontoadas perto dos galpões ou próximo a casa dos agricultores que praticam a coleta do pinhão. A falha em sua grande maioria é queimada, mas pode ser utilizada como adubo ou na produção de artesanato.

Figura 3 - Galhos provenientes da atividade de poda das macieiras.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

O resíduo proveniente da condução dos pomares da maçã, poda da maçã, geralmente são empilhados e queimados, para que esses galhos não apodreçam perto dos pomares e possam causar problemas fitossanitários.

Figura 4 - Maravalha de pinus utilizada nos ensaios de peletização.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

4.2 PREPARAÇÃO DA BIOMASSA PARA PELETIZAÇÃO

A poda da maçã foi moída em moinho de martelo industrial, da marca LIPPEL, com abertura de tela de 6 mm. A grimpa foi moída no mesmo moinho, porém utilizando abertura de 10 mm. A maravalha de pinus veio da indústria com o tamanho das partículas adequado ao processo de peletização.

A falha do pinhão foi moída em duas diferentes aberturas do moinho de martelo. Para a falha do pinhão utilizada nos tratamentos F25P75 e F50P50 utilizou-se abertura de 6 mm e para os tratamentos F100 e F75P25 foi utilizada a abertura de 10 mm. Foram utilizadas diferentes aberturas, pois os tratamentos com maior quantidade de falha de pinhão (F100 e F75P25) não peletizaram com as partículas geradas a partir da abertura de 6 mm.

4.3 ANÁLISE DA QUALIDADE DOS RESÍDUOS IN NATURA

Para a caracterização física, química e energética foi utilizado o material *in natura* que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida em peneira de 60 mesh. As análises químicas e energéticas realizadas foram: composição química imediata, poder calorífico superior e líquido, extractivos totais e lignin; as análises físicas foram: umidade, densidade básica e densidade a granel (Tabela 1). A densidade a granel foi determinada tanto para a matéria-prima *in natura* quanto para a mistura dos tratamentos.

Tabela 1 - Análises químicas e físicas realizadas nas matérias-primas *in natura*.

Análise	Norma	Repetições
Análise imediata	ASTM 1762 (ASTM, 2007)	3
Poder Calorífico Superior e Líquido	DIN 51900 (DIN, 2000)	3
Teor de extractivo Totais	Tappi T 204 cm-97 (TAPPI, 1997)	4
Lignina	NBR 7989 (ABNT, 2010)	4
Umidade	NBR 14929 (ABNT, 2003)	3
Densidade básica	Método hidrostático	3
Densidade a Granel*	NBR 6922 (ABNT, 1981)	5
Teste de granulometria* ¹	EN 15149-1 (EN,2010)	3

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

*NOTA: A norma foi modificada. Foi utilizando um Becker de 4,5 litros, e não um Becker de 5 litros, sendo aumentado o número de repetições para 5.

*¹NOTA: A norma foi modificada. Foi utilizada peneira de 3,25 mm ao invés de 3,25 mm conforme especificado na norma.

4.4 PRODUÇÃO DOS PELLETS

A mistura dos tratamentos foram realizados manualmente, usando peso final de 35 e 75kg dos materiais para realização dos tratamentos. A composição dos tratamentos utilizada no experimento está descrita na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição dos tratamentos utilizados no experimento (Continua).

Tratamento	Proporções de mistura dos resíduos analisados	PA (kg)
F100	Falha 100%	75
F75P25	Falha 75% + Pinus 25%	75
F50P50	Falha 50% + Pinus 50%	75
F25P75	Falha 25% + Pinus 75%	75

Tabela 2 - Composição dos tratamentos utilizados no experimento (Conclusão).

Tratamento	Proporções de mistura dos resíduos analisados	PA (kg)
G100	Grimpa 100%	75
G75P25	Grimpa 75% + Pinus 25%	75
G50P50	Grimpa 50% + Pinus 50%	75
G25P75	Grimpa 25% + Pinus 75%	75
Pm100	Poda da maçã 100%	35
Pm75P25	Poda da maçã 75% + Pinus 25%	35
Pm50P50	Poda da maçã 50% + Pinus 50%	35
Pm25P75	Poda da maçã 25% + Pinus 75%	35
P100	Pinus 100% (Testemunha)	75

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Nota: PA= Peso do tratamento em kg utilizado no processo de pelletização

A Figura 05 mostra as amostras de pellet de cada tratamento.

Figura 5 - Pellet de cada tratamento utilizado no experimento.

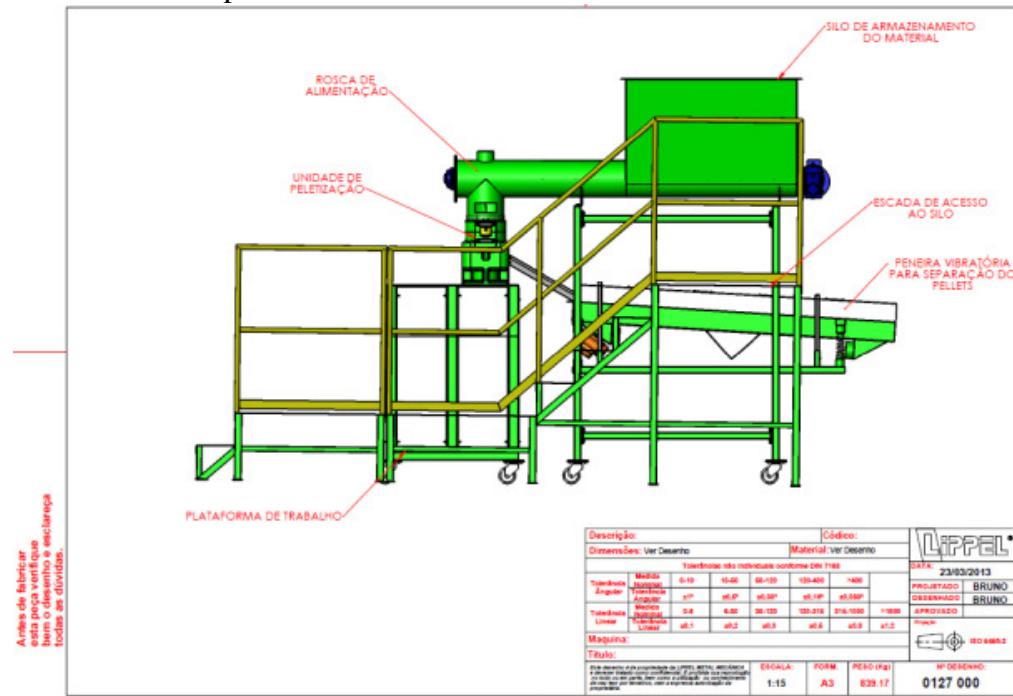
Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A peletização foi realizada em peletizadora piloto de laboratório (Figura 6) com as seguintes características:

- Capacidade máxima de peletização de 400 kg/hora, com variação na produção em função da densidade do material e a taxa de alimentação;

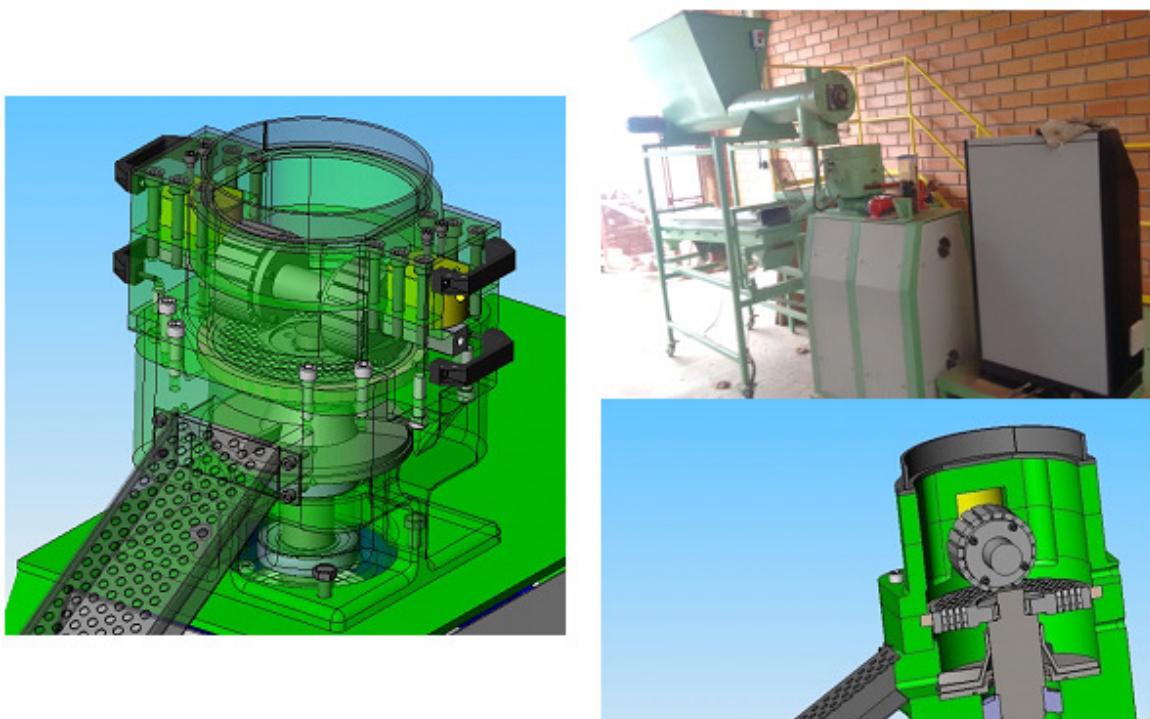
- Variador de frequência na alimentação do motor elétrico que move a matriz de peletização, visando o ajuste da velocidade de rotação da matriz. A leitura no painel de controle é feita por meio da intensidade da corrente elétrica do motor (Ampère);
- Variador de frequência no motor do silo de alimentação da biomassa, permitindo controle da taxa de alimentação. A leitura no painel de controle é feita em rotações por minuto (rpm);
- Variador de frequência no motor da esteira vibratória, que permite maior ou menor tempo de resfriamento dos *pellets*. A leitura da frequência no painel de controle é feita em Hertz (Hz);
- Flexibilidade no uso de diferentes espessuras de matrizes até a espessura máxima de 30 mm;
- Dois conjuntos de sensores de temperatura. Um antes da entrada da biomassa na matriz peletizadora e outro na área de peletização da matriz. A leitura no painel de controle é feito em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$);
- Matriz plana de peletização (Figura 6);
- Duas saídas na esteira de resfriamento. A primeira saída para pó, a segunda para pellets médios e pequenos (qualidade B) e os pellets de qualidade A são coletados no final da esteira de resfriamento.

Figura 6 - Peletizadora piloto laboratorial.



Fonte: Lippel, 2014.

Figura 7 - Matriz plana de peletização da peletizadora piloto de laboratório.



Fonte: Lippel, 2014. Elaborado pelo autor 2016.

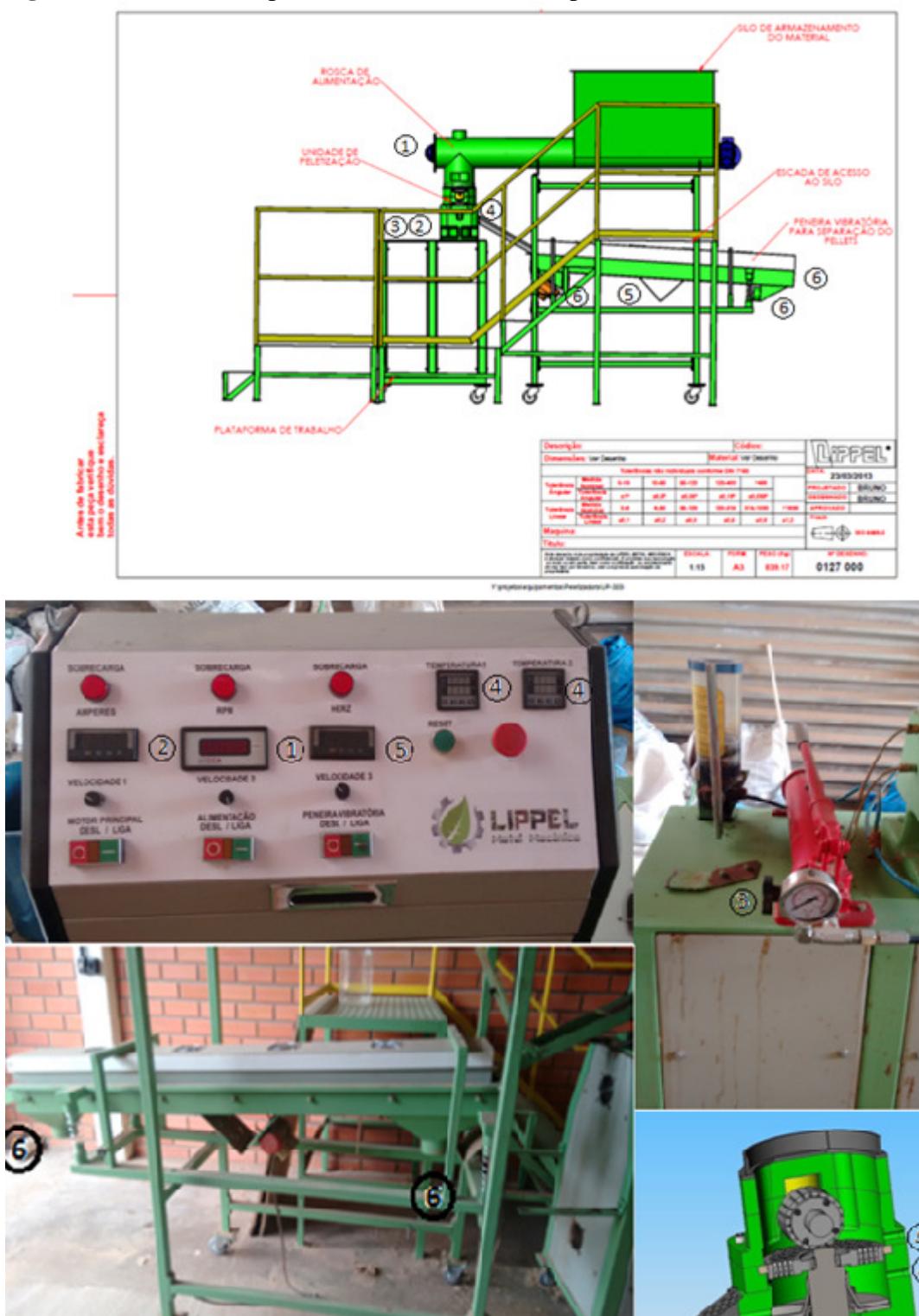
Para a produção de pellet de cada tratamento do experimento, a máquina foi aquecida previamente utilizando-se pinus para peletização. Quando a temperatura de 80°C foi atingida o processo de peletização de cada tratamento foi iniciado.

Durante o processo de peletização foram acompanhados e anotados os seguintes parâmetros:

- 1 – Velocidade da rosca de alimentação no silo de biomassa (rotações por minuto - rpm) (Figura 8);
- 2 – Intensidade da corrente elétrica do motor da matriz peletizadora (Ampère – A) (Figura 8);
- 3 – Pressão de compactação dos rolos compactadores sobre a matriz plana (Bar) (Figura 8);
- 4 – Temperatura nos sensores antes e após a matriz de compactação (°C) (Figura 8);
- 5 – Frequência (vibração/oscilação) da esteira de resfriamento dos pellets (Hertz – Hz) (Figura 9).
- 6 - Massa dos pellets de qualidade A, B e finos (Figura 8).

A Figura 8 demonstra onde foi coletado e onde sai cada parâmetro coletado.

Figura 8 - Peletizadora piloto, locais de coleta dos parâmetros.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A temperatura dos pellets, que saiam da mesa vibratória, era medida com auxílio de um medidor de infravermelho, conforme demonstrado na figura 9.

Figura 9 - Medição da temperatura dos pellets após a saída da esteira de resfriamento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A intensidade da corrente elétrica foi utilizada para o cálculo da potência nominal do motor (P), por meio da equação 2:

Equação 2: Intensidade da corrente elétrica:

$$P = U \times I$$

Onde:

P = Pôtencia média em Watt (W)

U = Tensão em Volt (V)

I = Corrente em Ampére (A)

Em cada tratamento, os parâmetros de peletização foram sendo ajustados até a obtenção de pellets com qualidade visualmente adequada. Os parâmetros foram medidos a cada 10 minutos durante o tempo total de peletização que variou de 60 a 90 minutos. Com base nas leituras feitas durante a peletização foram obtidos os valores médios de cada parâmetro por tratamento analisado.

Após o aquecimento da máquina e alimentação do silo com o material de cada tratamento, o primeiro parâmetro a ser controlado foi a pressão. A pressão inicial utilizada foi sempre de 150 Bar. Com a pressão ajustada, se iniciava o ajuste da velocidade da rosca de alimentação da biomassa. Estes dois parâmetros (pressão e velocidade de alimentação) foram ajustados até que o funcionamento da matriz e os pellets fossem produzidos com qualidade

visual aceitável, com base no comprimento e manutenção da compactação do pellet após saída da esteira de resfriamento.

Caso o material em análise não peletizasse com pressão de 150 Bar, a mesma era reduzida de 10 em 10 Bar. Em cada redução da pressão dos rolos de compactação, a velocidade de alimentação da biomassa e a velocidade da matriz também foram alteradas, reduzindo ou aumentando em função da qualidade do pellet.

A vibração da esteira de resfriamento foi sempre deixada na vibração máxima. Houve variação entre alguns tratamentos devido a quebra do suporte onde ficava o motor de vibração, após a manutenção do suporte a vibração aumentou.

Os finos foram as partículas pequenas que caíram na primeira saída da esteira de resfriamento, os pellets de qualidade B foram os pellets menores que caíram na segunda saída e os pellets de qualidade A foram os maiores que saíram no final da esteira de resfriamento.

Após a produção, os pellets foram levados para a câmara climatizadora, umidade relativa do ar de 65% e temperatura de 22°C, e deixados esfriar por um dia. Com os pellets frios, o recipiente foi lacrado para evitar a alteração da umidade, para posterior análise.

Figura 10 - A= Pellet de qualidade A; B= Pellet de qualidade B; C= Finos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

4.5 PARÂMETROS DE PELEIZAÇÃO

O tempo de coleta dos dados no processo de pelletização variou de 60 a 90 minutos. Esta variação foi em função das diferenças nas velocidades da alimentação, materiais e quantidade de biomassa utilizados no processo.

Os valores médios dos parâmetros de tempo de coleta, temperatura média da matriz, temperatura de saída da matriz, temperatura do pellet na saída B, obtida através do

infravermelho, temperatura do pellet na saída A, obtida através do infravermelho, estão apresentados na Tabela 3

Tabela 3 - Parâmetros de peletização na fabricação de pellets com diferentes tipos de resíduos em peletizadora piloto.

Tratamento	TC (minuto)	TM (°C)	TS (°C)	TPB (°C)	TPA (°C)
F100	70	95,36	89,01	40,88	44,06
F75P25	90	82,37	75,37	35,85	40,22
F50P50	60	100,43	89,16	57,07	54,40
F25P75	60	89,90	76,53	52,10	50,03
G100	70	94,03	80,95	26,39	29,09
G75P25	80	96,39	83,84	30,42	33,94
G50P50	70	88,78	78,49	48,79	44,79
G25P75	70	95,70	79,26	59,19	47,64
Pm100	60	83,50	76,13	43,57	47,50
Pm75P25	60	80,29	74,04	43,24	46,06
Pm50P50	60	85,07	78,47	42,94	45,90
Pm25P75	60	91,94	79,49	43,97	43,16
P100	60	86,57	73,09		

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Legenda: TC= Tempo de coleta; TM= Temperatura média da matriz; TS= Temperatura de saída da matriz; TPB= Temperatura do pellet na saída B, obtida através do infravermelho; TPA= Temperatura do pellet na saída A, obtida através do infravermelho

Os valores médios de potência do motor da matriz de compactação, frequência (vibração/oscilação) da esteira de resfriamento e velocidade da esteira de alimentação da biomassa utilizados para produção dos pellets estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de peletização na fabricação de pellets com diferentes tipos de resíduos em peletizadora piloto (Continua)

Tratamento	Pressão (Bar)	P (Watt)	F (Hz)	VA (rpm)
F100	100-120	5401	59,4	169,75
F75P25	110	5039	59,5	177,3
F50P50	150	4869	50,54	527,43
F25P75	150	4196	50,53	505,71
G100	100	4532	59,6	254,75
G75P25	110	4532	59,6	295,56
G50P50	110	4707	56,54	285,75

Tabela 4- Parâmetros de peletização na fabricação de pellets com diferentes tipos de resíduos em peletizadora piloto (Conclusão)

Tratamento	Pressão (Bar)	P (Watt)	F (Hz)	VA (rpm)
G25P75	150	4983	53,4	451,88
Pm100	80	4017	59,6	139,43
Pm75P25	90	3974	59,6	161,57
Pm50P50	100	4348	59,6	149,86
Pm25P75	110	4408	59,6	200,43
P100	110	4826	52,77	492,14

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Nota 1: P = potência média do motor da matriz de compactação; F = frequência (vibração/oscilação) da esteira de resfriamento (Hertz); VA = velocidade da esteira de alimentação da biomassa (rotações por minuto)

4.6 ANÁLISES DA QUALIDADE DOS PELLETS

As análises da qualidade dos pellets realizadas podem ser visualizadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Análises físicas e químicas realizadas nos pellets.

	Análise	Norma	Repetições
Análises Físicas	Dimensões dos <i>pellets</i>	EN 16127	100g
	Densidade a Granel	NBR 6922	5
	Densidade da unidade	EN 16127	100g
	Durabilidade*	EN 15210-1	4
	Teor de Finos*	EN 15210-2	4
	Umidade	NBR 14929	3
Análises Químicas	Poder Calorífico Superior	DIN 51900	3
	Análise imediata	ASTM 1762	3

NOTA: * Norma modificada. A peneira utilizada foi de 3,35mm e não de 3,15mm com indicado na norma. O tempo do ensaio foi aumentado para 20minutos com velocidade de 25±2 RPM durante 500 voltas, diferente do tempo de 10 minutos com 50±2rpm, conforme a norma.

Para as propriedades químicas, os pellets foram moídos em moinho de faca de bancada. Após a moagem, a amostra foi peneirada com auxílio das peneiras de 40 e 60 mesh. O material utilizado para as análises químicas teve granulometria de 60 mesh.

Os valores das propriedades obtidos em laboratório para os *pellets* foram comparados com os parâmetros existentes na Norma ISO 17225-2, que estão descritos nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Especificações técnicas de *pellets* segundo as normas da Organização Internacional de Padronização (ISO 17225-2) para as categorias de uso A (uso doméstico) e B (setor de serviços).

Especificação	ISO 17225-2							
	A1		A2		B			
T (mm)	$\emptyset = 6\pm 1$ ou 8 ± 1	$3,15 < L \leq 40$	$\emptyset = 6\pm 1$ ou 8 ± 1	$3,15 < L \leq 40$	$\emptyset = 6\pm 1$ ou 8 ± 1	$3,15 < L \leq 40$		
DA (kg/m³)	≥ 600		≥ 600		≥ 600			
TU (%)	$\leq 10,0$		$\leq 10,0$		$\leq 10,0$			
TC (%)	$\leq 0,7$		$\leq 1,2$		$\leq 2,0$			
PCL (MJ/kg)	$\geq 16,5$		$\geq 16,5$		$\geq 16,5$			
DU (%)	$\geq 97,5$		$\geq 97,5$		$\geq 96,5$			
FINOS (%)	$\leq 1,0$		$\leq 1,0$		$\leq 1,0$			

Fonte: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2014.

Legenda: T = tamanho dos pellets com relação ao comprimento (L) e diâmetro (\emptyset); DA = densidade aparente ou a granel; TU = umidade na base úmida; TC = teor de cinzas; PCL = poder calorífico líquido; DU = durabilidade e FINOS: teor de finos.

Tabela 7 - Especificações técnicas de *pellets* segundo as normas da Organização Internacional de Padronização (ISO 17225-2), para as categorias de uso I (Industrial).

Especificação	ISO 17225-2							
	I1		I2		I3			
T (mm)	$\emptyset = 6\pm 1$ ou 8 ± 1	$3,15 < L \leq 40$	$\emptyset = 6\pm 1$ ou 8 ± 1 ou 10 ± 1	$3,15 < L \leq 40$	$\emptyset = 6\pm 1$ ou 8 ± 1 ou 10 ± 1	$3,15 < L \leq 40$	10 ± 1 ou 12 ± 1	$3,15 < L \leq 40$
DA (kg/m³)	≥ 600		≥ 600		≥ 600			
TU (%)	$\leq 10,0$		$\leq 10,0$		$\leq 10,0$			
TC (%)	$\leq 1,0$		$\leq 1,5$		$\leq 3,0$			
PCL (MJ/kg)	$\geq 16,5$		$\geq 16,5$		$\geq 16,5$			
DU	97,5 a 99,0		97,0 a 99,0		96,5 a 99,0			
FINOS (%)	$\leq 4,0$		$\leq 5,0$		$\leq 6,0$			

Fonte: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2014.

Legenda: T = tamanho dos pellets com relação ao comprimento (L) e diâmetro (\emptyset); DA = densidade aparente ou a granel; TU = umidade na base úmida; TC = teor de cinzas; PCL = poder calorífico líquido; DU = durabilidade e FINOS: teor de finos.

4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado. Os dados obtidos para cada tipo de biomassa foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5 % de probabilidade de erro, utilizando programa *Sisvar* (FERREIRA, 1998).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 QUALIDADE DA BIOMASSA

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados relativos as propriedades físicas dos resíduos *in natura*.

Tabela 8 - Propriedades Físicas dos resíduos *in natura*.

Resíduos	TU (%)	DB (g/cm ³)	DG (g/cm ³)
Grimpa	15,31 c	0,280 b	0,164 a
Falha do Pinhão	58,23 a	0,293 b	0,167 a
Maravalha de <i>Pinus</i>	14,63 c	0,222 c	0,087 c
Poda da macieira	32,14 b	0,367 a	0,141 b
Média	30,30	0,291	0,140
CV (%)	2,53	9,19	8,55

Nota: TU= Umidade a base umidade recém chegado do campo; DB= densidade Básica; DG= densidade a Granel. CV= coeficiente de variação

Nota 2: Letras iguais na coluna indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de médias de Scott-Knott a um nível de probabilidade de 0,05.

Considerando que a grimpa é agrupada em pilhas pelos pecuaristas para evitar a ingestão das mesmas pelo gado e que estas ficam no campo, sujeitas as condições climáticas, sem cobertura, a umidade foi baixo e adequado a geração de energia mesmo na forma *in natura* em processos de combustão, por exemplo.

Ferreira *et al.* (2016) encontrou valores de umidade para galhos de *P.taeda*, em um povoamento com idade de 10 a 14 anos, variando entre 40-45%. O valor baixo da umidade da grimpa pode ser explicado pelo tempo que estes galhos ficam em campo aberto e com alto índice de insolação, fazendo com que a biomassa perca umidade.

Da mesma forma que a grimpa, a maravalha de *Pinus* teve baixo umidade por ser derivada de processo industrial onde a madeira é previamente seca em estufa para posterior processamento e conversão em portas. Estes dois resíduos foram estatisticamente iguais, e os demais diferiram dos demais.

As falhas de pinhão apresentaram a maior umidade, pois a granulometria e forma deste resíduo, quando armazenado em pilhas, não favoreceram a perda da umidade. Assim, este resíduo requer secagem prévia para o processo de peletização.

Buratto *et al.* (2015), encontrou para maravalha de pinus e para a falha do pinhão valores de umidade de 14,33% e 53,86% respectivamente, similares aos observados neste trabalho.

A poda da maçã apresentou alta umidade, pois a coleta foi realizada logo após a operação de poda realizada nas árvores frutíferas, sendo que o material não passou por prévia estocagem, o que poderia reduzir a umidade. Neste sentido, a poda da maçã nestas condições de coleta também necessita de secagem para a realização do processo de peletização.

Considerando o processo de peletização, segundo Garcia (2008), a matéria-prima a ser peletizada não pode conter umidade maior do que 17% (base úmida).

Quanto à densidade básica, todos os materiais analisados apresentaram baixos valores. A maravalha do *pinus* teve o menor valor para densidade básica (DB). A grimpa e a falha do pinhão possuíram densidades básicas iguais estatisticamente e a poda da maçã o maior valor médio.

A baixa densidade a granel dos materiais justifica a importância do processo de peletização para o aumento da densidade energética destes resíduos de biomassa.

Na densidade a granel, a grimpa e falha continuaram sendo estatisticamente iguais, porém com maiores valores em relação à poda da maçã. A menor densidade a granel foi observada para o pinus, mantendo o mesmo comportamento da densidade básica.

Os resultados para as propriedades químicas dos resíduos estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades Químicas dos resíduos

Resíduo	CF	TV	TC	PCS	PCL	TET	TL
	(%)	(%)	(%)	(kcal/kg)	(kcal/kg)	(%)	(%)
Grimpa	21,72 a	70,37 b	7,91 a	4644 a	3565 a	19,95 a	42,16 a
Falha do Pinhão	24,70 a	72,95 b	2,35 b	4668 a	1432 c	7,55 d	41,91 a
Maravalha de Pinus	18,91 b	80,63 a	0,46 c	4704 a	3643 a	10,09 c	26,01 c
Poda da macieira	17,54 b	79,21 a	3,25 b	4841 a	2872 b	13,72 b	29,26 b
Média	20,72	75,79	3,49	4714	2878	5,21	34,90
CV (%)	8,46	2,04	19,99	2,43	3,68	12,83	3,31

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Nota 1: CF= Teor de carbono fixo; TV= Teor de materiais Voláteis; TC= Teor de cinzas; PCS= Poder Calorífico Superior; PCL=Poder Calorífico Líquido(com base na umidade da Tabela 5); TET= Teor de Extrativos Totais; TL= Teor de Lignina.

Nota 2: Letras iguais na coluna indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de médias de Scott-Knott a um nível de probabilidade de 0,05.

A falha do pinhão apresentou o maior teor de carbono fixo, isso indica que terá maior queima na parte solida da matéria, fazendo com que a queima seja mais demorada, entre os materiais, indicando que comparativamente aos demais resíduos teria quantidade maior da massa do combustível queimando na forma sólida, porém foi estatisticamente igual à grimpas e maior que o pinus e poda de maça que foram também estatisticamente iguais. Peng (2013) encontrou valores para madeira de pinus um pouco abaixo do encontrado neste trabalho, 16,8%.

O comportamento do teor de materiais voláteis foi o mesmo que o teor de carbono entre os resíduos, no entanto de forma inversa, visto que são variáveis inversamente proporcionais. O teor de materiais voláteis indica a queima do material na parte gasosa, quanto maior o teor de materiais voláteis mais rápido será a queima do material.

O teor de cinzas foi mais alto para as grimpas e estatisticamente diferente dos demais resíduos. A falha do pinhão e poda da maça e menor apresentaram valores estatisticamente iguais e a maravalha de pinus o menor valor, que difere dos demais resíduos. Este último resíduo não possui casca, pois a mesma já foi removida no processamento industrial anterior da madeira. Já as grimpas são galhos com folhas, que quando vivos participam do processo fotossintético da planta, reservando maior quantidade de minerais, que compõe as cinzas após o processo de combustão. Da mesma forma, os galhos da maça e as falhas também tem maiores teores de cinza que a madeira de pinus por serem componentes das plantas envolvidos na fotossíntese, no primeiro caso, e na proteção das sementes no segundo caso.

Considerando o processo de peletização, são desejados baixos teores de cinzas, próximos aos observados para o pinus, colocando os demais materiais em desvantagem para este uso, considerando que a norma ISO 17225-2 limita o teor de cinzas a 3% para os pellets das categorias menos restritivas em relação à qualidade.

O poder calorífico superior foi estatisticamente igual para todos os resíduos, sendo que pode-se considerar como referencial o poder calorífico do pinus, que é a biomassa mais comumente utilizada para a produção de pellets no Brasil e no mundo.

O poder calorífico líquido, sendo função da umidade do resíduo, confirma o baixo potencial energético das falhas de pinhão no caso do uso *in natura*, sem prévio tratamento. Como também confirma o potencial do uso da grimpas como energético, mesmo sem prévio tratamento, pois o seu poder calorífico líquido foi estatisticamente igual à maravalha de pinus.

Como destacado por Berghel *et al.* (2013), Yu *et al.* (2017), Dück (2013) e Bradfield e Levi (1984), o teor de lignina e extractivos presente na biomassa é fundamental para a ligação

interna e empacotamento das partículas durante o processo de peletização. Assim, maiores teores de lignina e extractivos são positivos para o processo de peletização.

A quantidade de extractivos variou bastante entre os tipos de biomassa avaliadas, com o maior valor observado para a grimpá e o menor valor para as falhas. Os valores da poda e maravalha foram os mais próximos entre si, mas diferentes estatisticamente.

Quanto ao teor de lignina os valores mais altos e similares entre si foram obtidos para a grimpá e falhas, e o menor valor para o pinus. Assim, com base somente na composição química dos resíduos, o melhor comportamento esperado na peletização deveria ser da grimpá e falhas do pinhão.

Os resultados da distribuição granulométrica dos materiais *in natura* estão apresentados na tabela 10.

Tabela 10 - Distribuição granulométrica dos resíduos *in natura*.

Peneiras (mm)	Resíduos				
	G	F1	F2	P	Pm
≥31,5	0,1 b	0 b	0 b	0,3 a	0 b
≥16	0,2 a	0,1 a	0,3 a	0,5 a	0,0 a
≥8	0,4 b	0 b	0,0 b	6,6 a	0,1 b
≥3,35	27,2 a	1,6 e	16,0 b	11,3 c	5,6 d
Base	72 a	98,3 a	83,7 b	81,4 b	94,2 a

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Nota 1: A unidade dos resultados são em porcentagem (%). G = grimpá; F1= falha do pinhão moída a 5mm; F2= falha do pinhão moída a 10mm; P= Pinus; Pm= Poda da maçã

Nota 2: Letras iguais na linha indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de médias de Scott-Knott a um nível de probabilidade de 0,05.

A maravalha de pinus, em teste preliminar, apresentou a melhor granulometria para o processo de peletização, sendo tomada como base para os outros materiais. A primeira granulometria obtida para a falha do pinhão (F1) não permitiu a peletização adequada do material. Nas misturas que tiveram 75% ou maior quantidade de falhas, não ocorreu a pelletização devido à alta quantidade de finos partículas com dimensões inferiores a 3,35 mm, uma vez que o vão entre o rolo compressor e a matriz da pelletizadora é de 3mm.

Constatou-se no processo de peletização que a granulometria ideal para peletização em prensa com matriz plana foi de valores próximos ou inferiores a 80% de partículas com dimensões menores que e 3,35 mm, mas valores superiores a 5% de partículas acima de 3,35 mm.

De acordo com a norma ISO 17225-2 (ISO, 2014), para a produção de pellet de biomassa, o material utilizado têm de ser triturado de modo a que pelo menos 97% das partículas que compõem o material deve possuir partículas de tamanho abaixo de 3,35 mm, porém foi observado neste trabalho que uma melhor variação e distribuição no tamanho das partículas melhora o comportamento da peletização da biomassa.

5.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS MISTURAS UTILIZADAS PARA A PRODUÇÃO DOS PELLETS

Os valores da granulometria das misturas de cada tratamento estão demonstrados nas tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11 - Granulometria das misturas contendo falha de pinhão e pinus (A) e do tratamento testemunha (P100).

Peneiras (mm)	Tratamento				
	F100	F75P25	F50P50	F25P75	P100
≥31,5	0,0 b	0,0 b	0,0 b	0,0 b	0,3 a
≥16	0,3 a	0,5 a	0,1 a	0,2 a	0,5 a
≥8	0,0 c	2,0 b	1,2 b	7,2 a	6,6 a
≥3,35	16,0 a	17,5 a	10,0 b	7,5 c	11,3 b
Base	83,7 c	80,0 d	88,6 a	85,1 b	81,4 d

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Nota 1: As unidades dos resultados são em porcentagem (%).

Nota 2: Letras iguais na linha indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de médias de Scott-Knott a um nível de probabilidade de 0,05.

A realização da mistura alterou a granulometria em todos os tratamentos, sendo que somente as partículas com tamanho entre 16 a 31,4 mm foram semelhantes estatisticamente em todos os tratamentos.

De forma geral, o aumento da proporção de pinus diminuiu a quantidade de partícula entre 3,35 mm a 7,99 mm e aumentou a quantidade de partículas entre 8 mm a 15,99 mm. Não alterou a proporção de partículas maiores que 31,5 mm e não houve um comportamento padrão para os finos (menores que 3,35 mm).

Cada tratamento apresentou um comportamento particular, sendo que nenhum ficou próximo do tratamento com 100% de pinus (testemunha), considerado como o parâmetro de granulometria adequada à peletização. Excetuando a testemunha, a mistura que proporcionou

a maior distribuição das partículas dentro das granulometrias analisadas, foi o tratamento F75P25.

Os tratamentos F100 e F75P25 tiveram que ser moídos em uma peneira com vão maior (10 mm), já que no vão de 6mm não permitiu a politização dos tratamentos, devido ao alto teor de finos.

Tabela 12 - Granulometria das misturas contendo grimpa de araucária e pinus (B).

Peneiras (mm)	Tratamento				
	G100	G75P25	G50P50	G25P75	P100
≥31,5	0,1 a	0 a	0 a	0 a	0,3 a
≥16	0,2 a	0,1 a	0 a	0 a	0,5 a
≥8	0,4 b	1,3 b	0,8 b	0,3 b	6,6 a
≥3,35	27,2 a	22 b	19,4 b	20,1 b	11,3 c
Base	72 b	76,6 a	79,8 a	79,6 a	81,4 a

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Nota 1: A unidade dos resultados são em porcentagem (%).

Nota 2: Letras iguais na linha indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de médias de Scott-Knott a um nível de probabilidade de 0,05.

A realização da mistura de grimpa e pinus alterou a granulometria de forma menos significativa comparativamente a mistura falha de pinhão e pinus. Todos os tratamentos foram estatisticamente semelhantes para a porcentagem de partículas acima de 16 mm; todos os tratamentos contendo grimpa foram iguais entre si e diferentes do P100 para o tamanho das partículas entre 8 a 15,99 mm e todos os tratamentos contendo pinus foram iguais entre sim para o teor de finos (partículas menores que 3,35 mm) e diferentes do tratamento G100 (100% de grimpas).

Portanto, a inclusão do pinus aumentou a proporção de finos nas misturas, mas não afetou a quantidade de partículas entre 8 a 15,99 mm. Além disso, houve a tendência de redução da quantidade de partículas entre 3,35 a 7,99 mm com o aumento da proporção de pinus na mistura. Exetuando a testemunha, a mistura que proporcionou a maior distribuição das partículas dentro das granulometrias analisadas foi o tratamento G75P25.

Os três tratamentos contendo diferentes proporções de misturas de grimpa e pinus (G75P25; G50P50 e G25P75) forma iguais entre si para todos os tamanhos de partículas, mas diferentes em pelo menor uma granulometria, comparada aos tratamentos com 100% de pinus ou grimpa.

A Tabela 13 apresenta a granulometria das misturas contendo poda da maçã e *pinus*.

Tabela 13 - Granulometria das misturas contendo poda de maçã e *pinus*.

Peneiras (mm)	Tratamento				
	Pm100	Pm75P25	Pm50P50	Pm25P75	P100
≥31,5	0 c	0 c	0 c	0,9 a	0,3 b
≥16	0 a	0,7 a	0,7 a	0,5 a	0,5 a
≥8	0,1 c	2,2 c	4,3 b	2,1 c	6,6 a
≥3,35	4,4 b	8,1 b	14,8 b	23,3 a	11,3 b
Base	94,3 a	89,0 a	80,3 b	73,6 c	81,4 b

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Nota 1: A unidade dos resultados são em porcentagem (%).

Nota 2: Letras iguais na linha indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de médias de Scott-Knott a um nível de probabilidade de 0,05.

A realização da mistura alterou a granulometria em todos os tratamentos, sendo que somente as partículas com tamanho entre 16 a 31,4 mm foram semelhantes estatisticamente em todos os tratamentos.

De forma geral, o aumento da proporção de *pinus* diminuiu a quantidade de partícula abaixo 3,35 mm (finos) e aumentou a quantidade de partículas entre 3,35 a 7,99 mm. Os tratamentos de Pm100 e Pm75P25 foram iguais entre sim em todas as granulometrias, enquanto o tratamento Pm50P50 foi o mais próximo da testemunha (P100), apresentando a mistura com maior distribuição das partículas dentro das granulometrias analisadas, excetuando a testemunha.

A Tabela 14 apresenta valores médios de densidade a granel das misturas.

Tabela 14 - Densidade a granel média dos tratamentos em função das misturas de resíduos utilizadas no estudo (Continua).

Tratamento	DG kg/m ³
F100	0,167 a
F75P25	0,146 b
F50P50	0,119 d
F25P75	0,104 e
G100	0,164 a
G75P25	0,145 b

Tabela 14- Densidade a granel média dos tratamentos em função das misturas de resíduos utilizadas no estudo (Conclusão).

Tratamento	DG kg/m ³
G50P50	0,126 c
G25P75	0,108 e
Pm100	0,141 b
Pm75P25	0,138 b
Pm50P50	0,104 e
Pm25P75	0,084 f
P100	0,087 f

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Nota 2: Letras iguais na coluna indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de médias de Scott-Knott a um nível de probabilidade de 0,05.

Pode-se observar que os tratamentos com maior porcentagem de maravalha de *Pinus spp.* tiveram menor densidade a granel. De forma geral, a inclusão do pinus na mistura diminuiu a densidade a granel, sendo que, quanto maior a proporção de pinus, menor é a densidade a granel da mistura.

5.4 QUALIDADE DOS PELLETS

Os valores médios das características químicas dos *pellets* estão apresentadas na tabela 15.

Tabela 15 - Composição química imediata dos *pellets* contendo diferentes proporções de pinus, falha de pinhão, grimpá de araucária e poda de maçã (Continua).

Tratamento	CF (%)	TV (%)	TC (%)
F100	26,31 a	71,05 c	2,64 b
F75P25	25,26 a	73,25 b	1,49 c
F50P50	24,89 a	73,38 b	1,73 c
F25P75	21,76 b	77,33 a	0,91 d
G100	21,85 b	74,91 b	3,24 a
G75P25	21,00 b	77,20 a	1,80 c
G50P50	20,50 b	78,28 a	1,22 d
G25P75	20,26 b	78,98 a	0,76 d
Pm100	19,10 b	78,68 a	2,27 b
Pm75P25	20,53 b	77,83 a	1,67 c

Tabela 15 - Composição química imediata dos *pellets* contendo diferentes proporções de pinus, falha de pinhão, grimpa de araucária e poda de maçã (Conclusão).

Tratamento	CF (%)	TV (%)	TC (%)
Pm50P50	19,98 b	78,86 a	1,16 d
Pm25P75	20,40 b	79,33 a	0,38 d
P100	22,28 b	76,85 a	0,87 d
Média	21,84	76,61	1,55
Cv(%)	6,15	1,89	28,18

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Nota 1: CF= Teor carbono fixo; TV= Teor de Voláteis; TC= Teor de cinzas; Cv = coeficiente de variação (%)

Nota 2: Letras iguais na coluna indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de médias de Scott-Knott a um nível de probabilidade de 0,05.

Com relação à porcentagem e carbono fixo, os valores variaram de 19,10% (Pm100) a 26,31% (F100). Os tratamentos contendo falha de pinhão até a proporção de mistura de 50% (F100; F75P25 e F50P50), tiveram os maiores valores para esta propriedade, foram estatisticamente iguais entre si e diferentes de todos os demais tratamentos, formando dois grupos de similaridade.

A inclusão do pinus na mistura teve mais influência no teor de carbono fixo dos tratamentos contendo falha, pois este material *in natura* teve maior teor de carbono fixo que o pinus. Para este resíduo, a inclusão do pinus diminui o teor de carbono fixo dos tratamentos. Para a grimpa e poda de maçã a inclusão do pinus não alterou significativamente o teor de carbono fixo.

Para o teor de voláteis, os valores variaram de 71,05% (F100) a 79,33% (Pm25P75). Com exceção do tratamento G100, todos os demais contendo grimpa e poda de maçã e o tratamento com 25% de falha e 75% de pinus (F25P75) foram estatisticamente iguais. O tratamento F100, de menor valor, foi diferente de todos os demais. A inclusão do pinus na mistura aumentou o teor de voláteis nos tratamentos contendo falhas e grimpas, mas não demonstrou comportamento definido para poda de maçã, provavelmente pelo fato do teor de voláteis de poda de maçã ser mais próximo do valor do pinus.

O alto teor de cinzas é prejudicial para a qualidade dos pellets, sendo que segundo a ISO 17225-2, o teor de cinzas máximo admitido para o uso menos restritivo (industrial) é igual ou inferior a 3%. Os teores de cinzas dos tratamentos variaram de 0,38% (Pm25P75) a 3,24% (G100). Este último foi diferente estatisticamente de todos os demais tratamentos.

Os tratamentos homogêneos F100 e Pm100 foram estatisticamente iguais entre si. Também foram semelhantes as misturas contendo 75% de pinus e o tratamento com 50% de

pinus e 50% de falha de pinhão (F50P50). Já os tratamentos contendo pelo menos 50% até 75% de pinus, com exceção do F50P50, foram semelhantes entre si e com o tratamento com 100% de pinus, tendo os menores valores de teor de cinzas, demonstrando a influência positiva da mistura no pinus nos resíduos analisados para redução do teor de cinzas dos pellets.

A Tabela 16 apresenta os valores médios das propriedades físicas e energéticas dos pellets produzidos com diferentes tipos de materiais e misturas.

Tabela 16 - Propriedades físicas e energéticas dos pellets contendo diferentes proporções de pinus, falha de pinhão, grimpa de araucária e poda de maçã.

Tratamento	TUap (%)	TUdp (%)	PCS (cal/g)	PCL (cal/g)
F100	23,87 a	8,09 e	4668 b	3944 b
F75P25	24,60 a	10,88 b	4712 b	3845 b
F50P50	14,00 f	8,56 d	4869 a	4105 a
F25P75	13,18 f	7,51 e	4895 a	4182 a
G100	19,78 c	11,84 a	5065 a	4108 a
G75P25	21,81 b	8,33 e	4900 a	4145 a
G50P50	18,97 c	7,64 e	4824 a	4111 a
G25P75	15,15 e	9,33 d	4847 a	4044 a
Pm100	18,07 d	10,47 c	4526 b	3699 b
Pm75P25	17,04 d	7,72 e	4555 b	3862 b
Pm50P50	17,39 d	9,78 c	4619 b	3817 b
Pm25P75	15,55 e	9,09 d	4665 b	3892 b
P100	13,16 f	9,94 c	4703 b	3884 b
Média	17,92	9,16	4758	3972
Cv(%)	3,14	5,42	2,23	2,62

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Nota 1: TUap= umidade antes da peletização; TUdp= umidade após a peletização; PCS= Poder Calorífico Superior; PCL=Poder Calorífico Líquido; Cv = coeficiente de variação (%).

Nota 2: Letras iguais na coluna indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de médias de Scott-Knott a um nível de probabilidade de 0,05.

A umidade das misturas de cada tratamento, antes da peletização variou significativamente entre os materiais analisados. Isso porque, para cada matéria-prima a umidade foi sendo ajustado até a obtenção do valor adequado para que a peletização ocorresse.

Desta forma, os tratamentos F100 e F75P50, com maior quantidade de falhas na mistura somente peletizaram com umidade superior a 23%, sendo estes dois tratamentos estatisticamente iguais entre si. Da mesma forma, os tratamentos contendo maior quantidade de grimpas e poda de maça, bem como os tratamentos homogêneos destes materiais também necessitaram de maior conteúdo de umidade para a peletização ocorrer. O pinus (P100) foi o tratamento com menor umidade requerido para peletização, sendo que o aumento da proporção de pinus nas misturas contribui para a redução da umidade para peletização em todos os materiais testados.

Pode ser observado que os materiais com maior teor de lignina, falha e grimpa, precisaram de maior umidade para ocorrer a peletização de forma satisfatória, isso porque a maior umidade diminui a temperatura necessária para a lignina alcançar a de transição vítreia.

Alguns teores de umidade foram superiores aos recomendados pela literatura, pois segundo Garcia (2008), a matéria-prima a ser peletizada não pode conter umidade maior do que 17% (base úmida). A grimpa e a falha do pinhão tiveram a umidade no acondicionamento próximos a 15%. Nesta umidade, o material não peletizou, sendo adicionada água até atingir valores superiores a 23%, quando o processo de peletização ocorreu.

Independente da umidade inicial da matéria-prima, a umidade dos pellets é reduzido até teores de umidade entre 8 a 12%, com variação significativa entre os tratamentos analisados não parecendo haver influência da inclusão do pinus na mistura.

Para o poder calorífico superior foram formados dois grupos de similaridade. Os tratamentos contendo poda de maça e os contendo falha na composição homogênea (F100, Pm100) e com 75% de falha de pinhão foram estatisticamente semelhantes entre si e com P100. Já os tratamentos contendo grimpa e os F50P50 e F25P75 formaram o segundo grupo com poder calorífico superior maior. Não houve influência da inclusão do pinus nas misturas nas variações observadas para o poder calorífico.

O poder calorífico líquido (PCL) teve o mesmo comportamento do poder calorífico superior (PCS), demonstrando que o PCS teve maior influência no PCL que a umidade, em função deste último ser baixo.

A Tabela 17 apresenta os valores médios das propriedades físicas e mecânicas dos *pellets* de qualidade A produzidos com diferentes proporções de pinus, falha de pinhão, grimpa de araucária e poda de maça.

Tabela 17 - Propriedades físicas e mecânicas dos *pellets* de qualidade A produzidos com diferentes proporções de pinus, falha de pinhão, grimpa de araucária e poda de maçã.

TRATAMENTO	CP (mm)	ϕ (mm)	Dun (g/cm ³)	Du (%)	Finos (%)	DG (g/cm ³)
F100A	22,09 d	6,03 e	1,31 a	98,84 c	1,18 d	0,658 b
F75P25A	29,32 b	6,08 d	1,21 c	99,24 b	0,76 e	0,688 a
F50P50A	21,93 f	6,07d	1,24 b	98,95 c	1,05 d	0,676 b
F25P75A	18,56 h	6,11 c	1,21 c	98,83 c	1,18 d	0,708 a
G100A	23,28 d	6,18 b	0,97 f	96,69 d	1,33 c	0,548 d
G75P25A	26,68 c	6,25 a	0,52 g	99,52 a	0,48 f	0,616 c
G50P50A	18,78 h	6,22 a	1,17 d	99,04 b	0,97 e	0,690 a
G25P75A	18,81 h	6,21 a	1,21 c	99,21 b	0,80 e	0,600 c
Pm100A	30,00 a	6,09 d	1,06 e	98,57 d	1,45 c	0,506 e
Pm75P25A	22,32 e	6,14 c	0,97 f	98,60 d	1,42 c	0,558 d
Pm50P50A	20,36 g	6,08 d	1,16 d	97,81 e	2,24 b	0,552 d
Pm25P75A	23,08 d	6,13 c	1,02 e	95,33 f	4,91 a	0,554 d
P100A	14,93 i	6,16 b	1,15 d	98,75 d	1,27 c	0,656 b
Média	22,38	6,14	1,09	98,57	1,47	0,616
Cv(%)	1,25	0,4	2,7	0,17	12,45	2,43

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Nota 1: CP = comprimento do pellet; ϕ = diâmetro do pellet; Dun = densidade da unidade; Du = durabilidade; Finos = teor de finos; DG = densidade a granel; Cv = coeficiente de variação (%)

Nota 2: Letras iguais na coluna indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de médias de Scott-Knott a um nível de probabilidade de 0,05.

Houve grande variação entre os tratamentos em relação ao comprimento dos pellets, com valores entre 14,98 mm (P100) a 30 mm (Pm100), não havendo tendência de aumento ou redução do comprimento dos pellets em função da mistura utilizada na fabricação dos pellets. Com relação ao diâmetro, apesar da análise estatística indicar variação entre os tratamentos. As diferenças de diâmetro observadas na prática não interferem na qualidade dos pellets visto que a abertura dos orifícios de peletização da matriz é de 6 mm.

A densidade da unidade variou muito entre os tratamentos, sendo observados valores entre 0,52 g/cm³ até 1,31 g/cm³. Não foi verificada a influência da mistura na variação da densidade da unidade nos tratamentos.

Para a durabilidade e teor de finos, os tratamentos apresentaram grande variação entre si, com valores entre 95,33% a 99,52% e 0,48% a 4,91%, respectivamente. Não foi observada uma tendência clara da influência da mistura ou do material utilizado para a produção dos pellets nestas propriedades.

Para a densidade a granel, os valores mais altos e próximos dos pellets de pinus foram os feitos com falha de pinhão. Os pellets feitos com poda de maça tiveram as menores densidades a granel. Para todos os materiais analisados, a mistura do pinus contribuiu para o aumento da densidade a granel do produto final.

A mesma tendência foi observada por Liu (2016) no estudo em que o autor analisou a qualidade dos pellets da mistura de bambu com pinus, conforme pode ser observado na tabela 18. Neste mesmo trabalho, o autor observou ainda que o teor de finos dos materiais sem mistura foi menor que os teores de finos das misturas. Porém, esta tendência não foi observada com os pellets de falha, grimpa e poda de maça.

Tabela 18 - Propriedades físicas de pellets produzidos com diferentes misturas de pinus e bambu.

Tratamento	DG (g / cm ³)	Finos (%)
100% de bambu / 0% de pinus	0,54	0,37
80% de bambu / 20% de pinus	0,58	0,59
60% de bambu / 40% de pinus	0,60	0,64
40% de bambu / 60% pinus	0,62	0,67
20% de bambu / 80% de pinus	0,65	0,88
0% de bambu / 100% de pinus	0,68	0,07

Fonte: Liu (2016)

A Tabela 19 apresenta valores médios das propriedades físicas e mecânicas dos *pellets* de qualidade B produzidos com diferentes proporções de pinus, falha de pinhão, grimpa de araucária e poda de maça.

Tabela 19 - Propriedades físicas e mecânicas dos *pellets* de qualidade B produzidos com diferentes proporções de pinus, falha de pinhão, grimpa de araucária e poda de maçã (Continua).

TRATAMENTO	CP (mm)	ϕ (mm)	Dun (kg/m ³)	Du (%)	Finos (%)	DG (g/cm ³)
F100B	13,55 h	5,94 e	1,35 a	97,76 c	2,29 d	0,792 a
F75P25B	20,51 b	6,07 c	1,24 b	99,13 a	0,88 f	0,714 c

Tabela 19 - Propriedades físicas e mecânicas dos *pellets* de qualidade B produzidos com diferentes proporções de pinus, falha de pinhão, grimpa de araucária e poda de maçã (Conclusão).

TRATAMENTO	CP (mm)	ϕ (mm)	Dun (kg/m ³)	Du (%)	Finos (%)	DG (g/cm ³)
F50P50B	12,07 i	6,06 c	1,22 b	98,50 b	1,53 e	0,704 c
F25P75B	10,36 m	6,07 c	1,19 c	97,97 c	2,07 d	0,736 b
G100B	19,63 c	6,24 a	0,89 f	95,48 e	4,74 b	0,470 g
G75P25B	15,20 f	6,24 a	0,89 f	98,24 b	1,80 e	0,674 d
G50P50B	18,12 d	6,24 a	1,18 c	98,36 b	1,68 e	0,662 d
G25P75B	16,31 e	6,28 a	1,23 b	99,08 b	0,94 f	0,650 d
Pm100B	20,75 a	6,05 c	1,02 e	97,72 c	2,34 d	0,572 f
Pm75P25B	11,96 j	6,28 a	1,06 d	96,95d	3,15 c	0,596 e
Pm50P50B	14,47 g	6,01 d	1,01 e	97,54 c	2,25d	0,600 e
Pm25P75B	16,37 e	6,11 b	0,98 e	94,27 f	6,08 a	0,590 e
P100B	10,47 l	6,13 b	1,16 c	98,56 b	1,47 e	0,662 d
Média	15,36	6,14	1,11	97,66	2,42	0,648
Cv(%)	0,23	0,48	2,07	0,25	10,81	1,93

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Nota 1: CP = comprimento do pellet; ϕ = diâmetro do pellet; Dun = densidade da unidade; Du = durabilidade; Finos = teor de finos; DG = densidade a granel; Cv = coeficiente de variação (%)

Nota 2: Letras iguais na coluna indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de médias de Scott-Knott a um nível de probabilidade de 0,05.

Com relação aos pellets de qualidade B, o que chama a atenção e já era esperado, visto que estes pellets passam pela peneira separadora de finos na esteira de resfriamento dos pellets, é que o comprimento dos pellets é bem inferior aos da qualidade A. A durabilidade é menor, o teor de finos e densidade a granel com valores maiores comparativamente aos pellets de qualidade A.

Portanto, os pellets terão menor resistência a quebra, mas com maior densidade a granel, pela melhor acomodação dos pellets, devido ao seu menor comprimento.

A variação entre os tratamentos, para todas as propriedades foi alta, demonstrando a heterogeneidade dos pellets de qualidade B.

5.5 QUALIDADE GERAL DO PELLET SEGUNDO A ISO 17225-2

A classificação dos tratamentos, segundo a norma ISO-17225-2, está demonstrada na Tabela 20.

Tabela 20 – Inclusão dos pellets às categorias e qualidade da Norma ISO 17225-2.

Tratamento	Residencial/Comercial	Industrial
F100	-	I3
F75P25	B	I2
F50P50	-	I2
F25P75	-	I1
G100	-	-
G75P25	A2	I3
G50P50	A2	I2
G25P75	A1	I1
PM100	-	-
PM75P25	-	-
PM50P50	-	-
PM25P75	-	-
P100	-	I1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Para a classificação do uso residencial, os tratamentos F100, F50P50 e G100 não foram incluídos nesta categoria de qualidade em função do teor de cinzas exceder o limite máximo admitido na norma. Todos os tratamentos contendo poda da maçã também não foram incluídos nesta categoria em função da baixa densidade a granel, inferior ao estipulado pela norma. Já os tratamentos F25P75 e F100 não atingiram o teor de finos necessário para a classificação para pellet na qualidade residencial.

Na classificação industrial os pellets dos tratamentos F100, F75P25, F50P50, G75P25 e G50P50 ficaram nas duas classes menos restritivas em função do alto teor de cinzas dos pellets. Da mesma forma, o tratamento G100 não foi incluído em nenhuma das categorias de qualidade da norma devido ao teor de cinzas exceder o limite máximo de todas as categorias. Todos os tratamentos contendo poda da maçã não conseguiram alcançar o mínimo para densidade a granel requerido pela norma.

5.5.1 Qualidade parcial dos pellets de uso doméstico/serviços segundo a ISO 17225-2

A tabela 21 apresenta a classificação potencial segundo a ISO 17225-2 em relação ao resíduo e mistura por característica avaliada nos pellet.

Tabela 21 - Inclusão dos pellets às categorias e qualidade da Norma ISO 17225-2 para uso doméstico e comercial, segundo cada parâmetro de classificação.

TRATAMENTO	ϕ (mm)	DG (g/cm³)	CP (mm)	TC (%)	PCL (cal/g)	Du (%)	Finos (%)
F100	A1	A1	A1	-	A1	A1	-
F75P25	A1	A1	A1	B	A1	A1	A1
F50P50	A1	A1	A1	B	A1	A1	-
F25P75	A1	A1	A1	A2	A1	A1	-
G100	A1	A1	A1	-	A1	B	-
G75P25	A1	A1	A1	B	A1	A1	A1
G50P50	A1	A1	A1	B	A1	A1	A1
G25P75	A1	A1	A1	A2	A1	A1	A1
Pm100	A1	-	A1	-	A1	A1	-
Pm75P25	A1	-	A1	B	A1	A1	-
Pm50P50	A1	-	A1	B	A1	A1	-
Pm25P75	A1	-	A1	A1	A1	-	-
P100	A1	A1	A1	A1	A1	A1	-

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Para diâmetro, comprimento e PCL todos os tratamentos se enquadram na categoria mais restritiva da norma (A1). Para densidade a granel os tratamentos PM100, Pm75P25, PM50P50 e PM25P75 não atingiram ter o valor mínimo exigido pela norma. Enquanto que os demais tratamentos tiveram classificação máxima perante a norma.

Para o teor de cinzas, os tratamentos Pm25P75 e P100 se enquadram na classe mais restritiva (A1). Os tratamentos F100, G100 e Pm100 não conseguiram valor mínimo para entrar na categoria de uso doméstico e comercial.

O tratamento Pm25P75 não conseguiu valor mínimo exigido pela norma, no quesito de durabilidade. Para o teor de finos apenas os tratamentos F75P25, G75P25, G50P50 e G25P75 conseguiram entrar na classificação da norma, obtendo classificação máxima.

5.5.2 Qualidade parcial dos pellets de uso industrial segundo a ISO

A tabela 22 apresenta as classificações segundo a ISO de cada parâmetro separado.

Tabela 22 - Inclusão dos pellets às categorias e qualidade da Norma ISO 17225-2 para uso industrial, segundo cada parâmetro de classificação.

TRATAMENTO	φ (mm)	DG (g/cm³)	CP (mm)	TC (%)	PCL (cal/g)	Du (%)	Finos (%)
F100	I1	I1	I1	I3	I1	I1	I1
F75P25	I1	I1	I1	I2	I1	I1	I1
F50P50	I1	I1	I1	I3	I1	I1	I1
F25P75	I1	I1	I1	I1	I1	I1	I1
G100	I1	-	I1	-	I1	I3	I1
G75P25	I1	I1	I1	I3	I1	I1	I1
G50P50	I1	I1	I1	I2	I1	I1	I1
G25P75	I1	I1	I1	I1	I1	I1	I1
Pm100	I1	-	I1	I3	I1	I1	I1
Pm75P25	I1	-	I1	I3	I1	I1	I1
Pm50P50	I1	-	I1	I2	I1	I1	I1
Pm25P75	I1	-	I1	I1	I1	-	I2
P100	I1	I1	I1	I1	I1	I1	I1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016

Para diâmetro, comprimento e PCL todos os tratamentos se enquadram na categorias mais restritiva (I1) na norma ISO 17225-2. Os tratamentos G100, Pm100, Pm75P25, Pm50P50 e Pm25P75 não conseguiram o valor mínimo, da densidade a granel, exigido pela norma. No quesito do teor de cinzas apenas o G100 excedeu o valor máximo permitido na norma.

O valor mínimo de durabilidade não foi atingido pelo tratamento Pm25P75 e o tratamento G100 teve o mínimo necessário para entrar na classificação.

6 CONCLUSÃO

Qualidade da Biomassa:

- A falha do pinhão e a poda da macieira possuem alta umidade, não é recomendada a utilização desse material sem um tratamento prévio;
- A baixa densidade a granel justifica o processo de pelletização;
- A grimpa e a poda da macieira possuem alto teores de cinzas, sendo recomendada a realização de mistura para a diminuição desse teor;
- O teor de lignina de todos os materiais é excelente para a produção de pellet;
- O poder calorífico superior de todas biomassas é adequado à utilização para a produção de energia
- A granulometria ideal para peletização em prensa com matriz plana foi de valores próximos ou inferiores a 80% de partículas com dimensões menores que 3,35 mm, mas valores superiores a 5% de partículas acima de 3,35 mm.
- Alta quantidade de finos, partículas com dimensões inferiores a 3,35mm, dificulta a peletização.

Características físicas das misturas utilizadas para a produção dos pellets:

- A realização da mistura alterou a granulometria em todos os tratamentos contendo falha de pinhão e maravalha de pinus e poda da maçã e maravalha do pinus;
- A realização da mistura de grimpa e pinus alterou a granulometria de forma menos significativa;
- A adição da maravalha do pinus diminuiu a densidade a granel dos tratamentos. Quanto maior a porcentagem de maravalha de pinus menor a densidade a granel;

Qualidade dos Pellets

- A inclusão do pinus na mistura teve mais influência no teor de carbono fixo dos tratamentos contendo falha,
- A inclusão do pinus na mistura aumentou o teor de voláteis nos tratamentos contendo falhas e grimpas,
- Os materiais com maior teor de lignina, falha e grimpa, precisaram de maior umidade para ocorrer a peletização de forma satisfatória,

- Os tratamentos F75P25, G75P25 G50P50 e G25P75 foram os únicos que conseguiram qualidade para uso residencial/comercial. O tratamento com melhor qualidade para uso residencial/comercial foi o tratamento G25P75;
- Os tratamentos Pm100, Pm75P25, Pm50P50, Pm25P75 e G100 não conseguiram classificações médias em relação a norma ISO 17225-2 para utilização industrial.

7 BIBLIOGRAFIA

ABPM,2015; Anuário Brasileiro da Maçã 2015; disponível em: <http://www.grupogaz.com.br/tratadas/eo_edicao/77/2015/07/20150727_6ec9495e5/pdf/4849_2015maca_flip.pdf>. Acesso dia 02 de fevereiro de 2016.

ABRAF, Anuário. ano base 2012. **Brasília: ABRAF**, 2013.

ADAPA, P. K. et al. Pelletization of Alfalfa Grinds-Compression Characteristics of Fractionated Alfalfa Grinds. **Powder Handling and Processing**, v. 14, n. 4, p. 252-259, 2002.

ALFONSO, D. et. al. Methodology for optimization of distributed biomass resources evaluation, management and final energy use. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 8, p. 1070-1079, 2009.

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

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 7989**: Pasta celulósica e madeira – Determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010.

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-1762**: Standard Test Method for Chemical Analysis of wood charcoal.PA: American Society for Testing and Materials. 2007.

BACKES, A. 1999. Condicionamento Climático e distribuição geográfica de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze no Brasil - II. Pesquisa (Botânica) 49:31-51.

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

BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O. Química da madeira. Piracicaba, SP, ESALQ, 1985. 125p.

BERGHEL, Jonas et al. The effects of kraft lignin additives on wood fuel pellet quality, energy use and shelf life. **Fuel processing technology**, v. 112, p. 64-69, 2013.

BHATTACHARYA, S. (2002). Biomass energy and densification: A Global Review with Emphasis on Developing Countries, Proceedings of the First World Conference on Pellets: Estocolmo, 2 a 4 de Setembro.

BITENCOURT, A. L. V. E KRAUSPENHAR, P. M. 2006. Possible Prehistoric Anthropogenic Effect On Araucaria Angustifolia (Bert.) O. Kuntze Expansion During The Late Holocene. **Revista Brasileira De Paleontologia** 9 (1):109-116.

BRADFIELD J, LEVI MP. Effect of species and wood to bark ratio on pelleting of southern woods. **Forest Products Journal** 1984;34:61–3.

BRAND, M. A. **Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem**. Curitiba, 2007. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

BRAND, Martha Andreia. **Energia da biomassa florestal**. Editora Interciênciac, 2010.

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/l12305.htm> Acesso em 22 de abril de 2014.

BURATTO, William Gouvêa et al. Análise da co-gaseificação de resíduos de biomassa na serra catarinense e avaliação da eficiência ambiental desta tecnologia. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 4, p. 473-481, 2015.

CALDEIRA, M.V. W. et al. Quantificação de serapilheira e de nutrientes–Floresta Ombrófila Mista Montana–Paraná. **Revista Acadêmica**, Curitiba, v. 5, n. 2, p. 101-116, 2007.

CAMPBELL, K.A. **Feasibility study guide for an agricultural biomass pellet company** Agricultural Utilization Research Institute (2007).

CARONE, Maria Teresa; PANTALEO, Antonio; PELLERANO, Achille. Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of Olea europaea L. **Biomass and bioenergy**, v. 35, n. 1, p. 402-410, 2011.

CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L. C.; SOUZA, M. M. Produção de *pellets* de madeira. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e Biorrefinaria – cana-de-açúcar e espécies florestais**. 1. ed. Viçosa: UFV, 2013.

CASTELLANO, J. M. et. al. Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. **Fuel**, v. 139, p. 629-636, 2015.

COCHI, M. et al. **Global Wood Pellet Industry Market and Trade Study**. IEA Bioenergy Task, vol. 40, 2011.

COELHO, Jorge Cals et al. Biomassa, biocombustíveis, bioenergia. In: **Biomassa, biocombustíveis, bioenergia**. Ministerio das Minas e Energia, 1982.

COUTO, L.; FONSECA, E.M.B.; MÜLLER, M.D. **O estado da arte das plantações de florestas de rápido crescimento para produção de biomassa para energia em Minas Gerais: aspectos técnicos, econômicos sociais e ambientais**. Belo Horizonte: CEMIG, 2000. 44p.

DACOSTA, Lourdes Patricia Elias et al. Qualidade das chapas de partículas aglomeradas fabricadas com resíduos do processamento mecânico da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. 2008.

DAL FARRA, F. C. P; ESPERANCINI, M. S. T., Análise econômico-energética de utilização de resíduo industrial, florestal para geração de energia térmica: um estudo de caso. Energia na Agricultura, Botucatu, v.20, n.3, 2005. p-76-88.

DE LUCENA TAVARES, Silvio Roberto; TAVARES, Marília Amaral de Moura Estevão. Perspectivas para a participação do brasil no mercado internacional de pellets. **Holos**, v. 5, p. 292-306, 2015.

DE SOUZA, Marina Moura et al. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 325-334, 2012.

DEMIRBAS, A. ŞAHIN-DEMIRBAŞ, A. HILAL-DEMIRBAŞ Briquetting properties of biomass waste materials, **Energy Sources**, 26 (2004), pp. 83–91

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 51900**: Determining the gross calorific value of solid and liquid fuels using the bomb calorimeter, and calculation of net calorific value. Berlim, 2000.

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

DIAS, João Jorge Mestre. **Utilização da biomassa: avaliação dos resíduos e utilização de pellets em caldeiras domésticas.** 2002. Tese de Doutorado. Universidade Técnica de Lisboa.

DÜCK, Tiago Heinrich Medeiros. Queimador semiautomático de pellets de madeira. 2013.

EBERT, A; RAASCH, Z. S. **Condução da macieira em sistemas de baixa e alta densidade.** Florianópolis, EMPASC, 1988. 55p.

EN 15210-2: Solid biofuels. Fuel quality assurance. Part 2 Beuxelles: CEN, 2001.

EN 16127:Determination of length and diameter of pellets. Berlin: CEN, 2012. 11 p.

ERIKSSON, S.; PRIOR, M. **The briquetting of agricultural wastes for fuel.** Roma: FAO, 1990.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – **Technical Specification CEN/TS 15210-1:** Methodos for determination mechanical durability of pellets. Solidbiofuels – fuelspecificationand classes. London, 2005b.

EVANGELISTA, C.M. et al. “Grimpa” de *Araucaria angustifolia* como causa de morte por insuficiência respiratória em bovinos. VII Encontro Nacional de Diagnóstico Veterinário, 2014

FAIZ, Yasir et al. Road dust pollution of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn along Islamabad Expressway, Pakistan. **Microchemical Journal**, v. 92, n. 2, p. 186-192, 2009.

FELFLI, F. Fonseca et al. Bench unit for biomass residues torrefaction. In: **Proc. 10th Eur. Conf. Biomass for Energy & Industry, Würzburg, Germany.** 1998.

FERREIRA, D. F. **Sisvar - sistema de análise de variância para dados balanceados.** Lavras: UFLA, 1998. 19 p.

FERREIRA, Juliana Ceccato et al. **QUALIFICAÇÃO DA BIOMASSA EM POVOAMENTOS FLORESTAIS DE Pinus taeda.** **FLORESTA**, v. 46, n. 2, p. 269-276, 2016.

GARCIA, D.P. Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

GARCIA, Dorival Pinheiro. Pellets de madeira: revisão bibliográfica. 2008.

GARCIA, Dorival Pinheiro; CARASCHI, José Cláudio; VENTORIM, Gustavo. Caracterização energética de pellets de madeira. **Revista da Madeira**, v. 135, p. 14-18, 2013.

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

GUERRA, M.P.; SILVEIRA, V.; REIS, M.S.; SCHNEIDER, L. Exploração, manejo e conservação da araucária (*Araucaria angustifolia*). In: Simões, L.L.; Lino, C.F.(org.) Sustentável Mata Atlântica: a exploração de seus recursos florestais. São Paulo: Editora SENAC, 2002. p. 85-101.

HÜEBLIN, H. J. Modelo para a aplicação da metodologia Zeri. Sistema de aproveitamento integral da biomassa de árvores de reflorestamento. Curitiba. 2001. 139 f. Dissertação de mestrado. CEFET.PR. Disponível em: <http://www.ppgte.cefetpr.br/dissertacoes/2001/hans.pdf>. Acessado em 15/09/2003.

IBGE(Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 2016 LEVANTAMENTO SISTEMÁTICO DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA http://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_%5Bmensal%5D/Fasciculo/2014/lspa_201412.pdf. > (Acessado em 28/06/2016).

IBGE. (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 2013. Produção da extração vegetal e silvicultura.http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pevs/2013/default_zip_brasil.htm > (Acessado em 21/06/2016).

INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORE, Relatório Ibá 2015, acessado http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf , em 20 de junho de 2016 as 9:45

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17225-2**.Solid Biofuels – Fuel Specifications and classes – Part 2: Graded wood péletes. Genebra, Suíça, 9p. 2014.

JANNASCH, R.; QUAN, Y.; SAMSON, R. A process and energy analysis of pelletizing switchgrass. **Prepared by REAP-Canada (www. reap-canada. com) for Natural Resources Canada**, 2001.

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

KOFMAN, Pieter D. Simple ways to check wood pellet quality. **Bioenergy News**, p. 2006-2007, 2007.

KOMAREK, R. K. Binderless Briquetting of Peat, Lignite, Sub-Bituminous and Bituminous Coal in Roll Presses. In: **BIENNIAL CONFERENCE-INSTITUTE OF BRIQUETTING AND AGGLOMERATION**. INSTITUTE OF BRIQUETTING AND AGGLOMERATION, 1991. p. 233-233.

KRAIEM, Nesrine et al. Energy recovery from Tunisian agri-food wastes: Evaluation of combustion performance and emissions characteristics of green pellets prepared from tomato residues and grape marc. **Energy**, v. 107, p. 409-418, 2016.

LARSSON, Sylvia H. et al. High quality biofuel pellet production from pre-compacted low density raw materials. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 15, p. 7176-7182, 2008.

LEAVER, R. H. The pelleting process. **Sprout-Waldron, Muncy, PA**, 1984.

LEAVER, Richard H. SECTION" A"-**Definition of pellets and their use**, 1970.

LIMA, A.F.; JARÁ, E. R. P.; ALFONSO, V. A. **Madeira como matéria-prima para fabricação de pasta celulósica**. In: PHILIPP, P.; D'ALMEIDA, M. L.O. Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica. 2. ed. São Paulo: IPT, 1988. p.129-167.

LIU, Zhijia et al. Improved bulk density of bamboo pellets as biomass for energy production. **Renewable Energy**, v. 86, p. 1-7, 2016.

LOUÇÃO, I. J. G. **Valorização da biomassa florestal, proveniente da doença de nemátoide de pinheiro, para produção de peletes**. Dissertação (Mestrado em Bioenergia). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.

MACBAIN R. Pelleting animal feed. Chicago, IL: American Feed Manufacturing Association; 1966.

MACMAHON M.J., J.D. Payne **Holmens pelleteringshandbok** Holmen Chemicals Limited, Borregaard Group, United Kingdom (1982)

MANI, S.; TABIL, L.G.; SOKHANSANJ, S. An overview of compaction of biomass grand. **Powder Handl Process**, v. 15, n. 2, 2003.

MANI, Sudhagar; TABIL, Lope G.; SOKHANSANJ, Shahab. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 7, p. 648-654, 2006.

MANTOVANI, Adelar; MORELLATO, L. Patrícia C.; REIS, Maurício S. dos. Fenologia reprodutiva e produção de sementes em *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. **Revista brasileira de botânica**, v. 27, n. 4, p. 787-796, 2004.

MARIA T.C., A. PANTALEO, A. PELLERANO Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L **Biomass and Bioenergy**, 35 (2011), pp. 402–410

MIRANDA, Marcos Antonio da Silva et al. Potencial da biomassa florestal para produção de energia térmica industrial. 2015.

MISHRA, S. K. et al. 5. Effect OF Feed Preheating ON Briquetting OF Different Biomass. **Regional wood energy development programme in asia gcp/ras/154/net**, p. 31, 1995.

MOLA-YUDEGO, Blas; SELKIMÄKI, Mari; GONZÁLEZ-OLABARRIA, José Ramón. Spatial analysis of the wood pellet production for energy in Europe. **Renewable Energy**, v. 63, p. 76-83, 2014.

MONTEIRO, Eliseu; MANTHA, Vishveshwar; ROUBOA, Abel. Portuguese pellets market: Analysis of the production and utilization constrains. **Energy Policy**, v. 42, p. 129-135, 2012.

NASCIMENTO, Mário Donizetti do; BIAGGIONI, Marco Antonio Martin. Avaliação energética do uso de lenha e cavaco de madeira para a produção de energia em agroindústria seropédica. **Energia na Agricultura**, p. 104-117, 2010.

NETO, João Fert et al. PROJETO KAYUVÁ: VALORIZAÇÃO DO PINHÃO NA AGRICULTURA FAMILIAR DA SERRA CATARINENSE. **UDESC em Ação**, v. 4, n. 1, 2010.

NIEDZIÓŁKA, I. et. al. Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. **Renewable Energy**, v. 76, p. 312-317, 2015.

NIELSEN, Niels Peter K. et al. Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets. **Wood and Fiber Science**, v. 41, n. 4, p. 414, 2009.

NONES, D. L. **Cadeia produtiva de pellets e briquetes de biomassa residual para geração de energia em Santa Catarina.** 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2014.

NUNES, L.J.R.; MATIAS, J.C.O.; CATALAO, J.P.S. Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models. **Applied Energy**, v. 127, p. 135-140, 2014.

OBERNBERGER, Ingwald; THEK, Gerold. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. **Biomass and bioenergy**, v. 27, n. 6, p. 653-669, 2004.

O'DOGHERTY, M. J.; WHEELER, J. A. Compression of straw to high densities in closed cylindrical dies. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 29, n. 1, p. 61-72, 1984.

OLSSON, Maria. **Wood pellets as low-emitting residential biofuel.** 2002.

ORECCHIO, Santino et al. Wood pellets for home heating can be considered environmentally friendly fuels? Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in their ashes. **Microchemical Journal**, v. 124, p. 267-271, 2016.

ORTIZ, L. Aprovechamiento energético de la biomasa forestal. **GAMESAL**, 1996.

PEKSA-Blanchard M. Global wood pellet markets and industry: policy drivers. Market status and raw material potential. In: IEA bioenergy task; 2007.p. 40.

PENG, J. H. et al. Torrefaction and densification of different species of softwood residues. **Fuel**, v. 111, p. 411-421, 2013.

PETTERSEN, R.C. The chemical composition of wood. In: ROWELL, R.(ed). The chemistry of solid wood. Washington, American Chemical Society, 1984. p.54-126.

SAMSON, R. et al. Assessment of pelletized biofuels. **Publication at:** <http://www.reap-canada.com/Reports/pelletaug2000.html>, 2000.

SCHUMACHER, Mauro Valdir et al. Produção de biomassa no corte raso em plantio de Araucaria angustifolia (Bertol.) Kuntze de 27 anos de idade em Quedas do Iguaçu, PR. 2012.

SCHUMACHER, Mauro Valdir et al. Produção de serapilheira em uma floresta de Araucaria angustifolia (Bertol.) Kuntze no município de Pinhal Grande-RS. **Revista Árvore**, v. 28, n. 1, p. 29-37, 2004.

SERRANO, Clara et al. Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 3, p. 699-706, 2011.

SERRANO, D. M. C. Avaliação do Potencial de Produção e Exportação de Pellets Combustível no Pólo Florestal da Região Sul do Brasil. 2009. 83. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, 2009.

SILVA, C. A. Estudo técnico-econômico da compactação de resíduos madeireiros para fins energéticos. 2007. 85f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, São Paulo. 2007.

SIMIONI, Flávio José et al. Análise diagnóstica e prospectiva da cadeia produtiva de energia de biomassa de origem florestal no planalto sul de Santa Catarina. 2013.

SIMPSON W, TenWolde A. **Physical properties and moisture relations of wood.** In: **Wood handbook – wood as an engineering material.** Madison: United States Department of Agriculture – Forest Service – Forest Products Laboratory; 1999.

STAIISS, 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

STELTE, Wolfgang et al. Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. **Fuel**, v. 90, n. 11, p. 3285-3290, 2011.

TAPPI, T. 204 cm-97. **Solvent extractives of wood and pulp**, 1997.

THEK, G.; OBERNBERGER, I. **The pellet handbook: the production and thermal utilization of biomass pellets.** London: Earthscan Ltd, 2010.

TUMULURU, Jaya Shankar. 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.

TUMULURU, Jaya Shankar. Specific energy consumption and quality of wood pellets produced using high-moisture lodgepole pine grind in a flat die pellet mill. **Chemical Engineering Research and Design**, 2016.

TUMULURU, JS, CT WRIGHT, JR HESS, KL KENNEY A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy applications **Biofuels Bioproducts and Biorefining**, 5 (6) (2011), pp. 683–707

VAN DAM, Jan EG et al. Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk: Part 1: Lignin as intrinsic thermosetting binder resin. **Industrial Crops and Products**, v. 19, n. 3, p. 207-216, 2004.

VIEIRA DA SILVA, C. E REIS, M.S. 2009. Produção de pinhão na região de caçador, sc: aspectos da obtenção e sua importância para comunidades locais. **Ciência Florestal** 9(4): 365-376.

Y. Li, H. Liu **High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel** **Biomass and Bioenergy**, 19 (2000), pp. 177–186

YU, Jie et al. Cellulose, xylan and lignin interactions during pyrolysis of lignocellulosic biomass. **Fuel**, v. 191, p. 140-149, 2017.

ZANDONADI, Taiane. Estudo da viabilidade econômica da utilização do resíduo da poda de macieiras na região de bom jardim da serra para a produção de biomassa EM LAGES. **Repositórios de relatórios-engenharia de Produção**, n. 2, 2013.

ZHANG, Qi et al. Ultrasonic vibration-assisted pelleting of cellulosic biomass for ethanol manufacturing: An investigation on pelleting temperature. **Renewable Energy**, v. 86, p. 895-908, 2016.

ZHANG, Tianran et al. New Field-Based Agricultural Biomass Burning Trace Gas, PM 2.5, and Black Carbon Emission Ratios and Factors Measured In Situ at Crop Residue Fires in Eastern China. **Atmospheric Environment**, 2015.