

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

BRUNO SILVA CAMARGO

**DESENVOLVIMENTO DE PELLETS PROVENIENTES DE MADEIRA E
FINOS DE CARVÃO VEGETAL**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2019

BRUNO SILVA CAMARGO

**DESENVOLVIMENTO DE PELLETS PROVENIENTES DE MADEIRA E
FINOS DE CARVÃO VEGETAL**

Dissertação apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Aldo Braghini Junior
Coorientador: Prof. Dr. José Cláudio Caraschi

PONTA GROSSA

2019

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa
n.31/19

C172 Camargo, Bruno Silva

Desenvolvimento de pellets provenientes de madeira e finos de carvão vegetal. /
Bruno Silva Camargo, 2019.
75 f.; il. 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Aldo Braghini Junior
Coorientador: Prof. Dr. José Cláudio Caraschi

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, Ponta Grossa, 2019.

1. Biocombustíveis. 2. Carvão vegetal. 3. Energia - Fontes alternativas. I. Braghini
Junior, Aldo. II. Caraschi, José Cláudio. III. Universidade Tecnológica Federal do
Paraná. IV. Título.

CDD 670.42

Elson Heraldo Ribeiro Junior. CRB-9/1413. 05/04/2019.



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus de Ponta Grossa
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Título de Dissertação Nº **332/2019**

**(DESENVOLVIMENTO DE PELLETS PROVENIENTES DE MADEIRA E FINOS DE
CARVÃO VEGETAL**

por

Bruno Silva Camargo

Esta dissertação foi apresentada às 14 horas do dia **20 de fevereiro de 2019** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, com área de concentração em Conhecimento de Inovação, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Bruno Santos Ferreira (UNESP)

**Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski
(UTFPR)**

**Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco
(UTFPR)**

**Prof. Dr. Aldo Braghini Junior (UTFPR) –
*Orientador***

**Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco
(UTFPR)
Coordenador do PPGE**

A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NO DEPARTAMENTO DE
REGISTROS ACADÊMICOS DA UTFPR – CÂMPUS PONTA GROSSA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao grande Deus, por ter me ajudado e fortalecido até o presente momento, e por ter me dado esta oportunidade.

Agradeço a minha esposa, pela paciência, incentivo, dedicação, amor, companheirismo e ajuda nos momentos difíceis.

Ao filho que foi o motivo a continuar, batalhar, melhorar, e não desistir nas horas difíceis, pela alegria, amor e carinho transmitido, que mudou a minha e deu sentido a mesma.

Aos meus pais, que sempre incentivaram nos estudos e me motivaram a continuar, com amor e carinho. Em especial ao meu pai, que já descansa nos braços do Senhor, mas que me incentivou muito nesta jornada.

Ao meu irmão pelo carinho, companheirismo e momentos de alegria compartilhados.

As minhas cunhadas, cunhado, pelo auxílio durante o mestrado.

Ao orientador pela paciência, orientação, auxílio e amizade.

Ao coorientador pelo auxílio e sugestões.

Aos professores participantes das bancas de qualificação e defesa da dissertação, pela disponibilidade e críticas construtivas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção,

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelos recursos, estrutura e auxílio.

RESUMO

CAMARGO, Bruno Silva. **Desenvolvimento de pellets provenientes de madeira e finos de carvão vegetal**. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Com a crescente demanda de energia mundial, há a necessidade de fontes de energia com potencial para substituir os combustíveis fósseis, como petróleo, carvão mineral e gás natural. Uma forma de energia alternativa e com grande potencial energético são os pellets, estes podem ser considerados biocombustíveis renováveis, possuem baixa umidade, forma homogênea e alta densidade energética e são provenientes de biomassa vegetal. O objetivo deste trabalho é desenvolver e caracterizar pellets provenientes de madeira com adição de finos de carvão vegetal. Foram produzidos e comparados três composições de pellets: pellets de serragem de pinus spp. (P1), pellets de serragem de pinus com adição de 10% de finos de carvão vegetal (P2) e com 25% de finos de carvão vegetal (P3). Para isto foram utilizadas as normas de padrões nacionais e internacionais de pellets. Os resultados das análises demonstraram que a adição de finos de carvão vegetal pode elevar o potencial energético dos pellets, já que os pellets P2 e P3 apresentaram valores superiores aos pellets P1, nos parâmetros de qualidade relacionados a parte energética, tais como poder calorífico superior e inferior e densidade energética. Com relação aos parâmetros de qualidade, físicos, químicos e térmicos, todos os pellets atingiram os valores estipulados pelas normas de padrões internacionais. Assim, pode-se concluir que os pellets possuem grande potencial energético e podem ser fontes substituintes de energia, considerada como limpa e renovável, devido a utilização de resíduos provenientes de madeira, e que a inserção de finos de carvão vegetal pode contribuir para um aumento significativo do potencial energético dos pellets.

Palavras-chave: Pellets de madeira. Finos de carvão vegetal. Potencial energético.

ABSTRACT

CAMARGO, Bruno Silva. **Development of pellets from wood and charcoal fines.** 75 p. Thesis (Master's Degree in Production Engineering) - Federal University of Technology - Paraná, Ponta Grossa, 2019.

With the growing demand for world energy, there is a need for energy sources with the potential to replace fossil fuels like oil, coal and natural gas. An alternative form of energy with high energy potential are pellets, which can be considered as renewable biofuels, have low humidity, homogeneous form and high energy density, and are derived from vegetal biomass. The objective of this work is to develop and characterize pellets from wood with addition of charcoal fines. Three compositions of pellets were produced and compared: sawdust pellets of pinus spp. (P1), pine sawdust pellets with 10% charcoal fines (P2) and 25% charcoal fines (P3). The national and international pellet standards were used for this purpose. The results of the analyzes showed that the addition of charcoal fines can increase the energy potential of the pellets, since the pellets P2 and P3 presented values higher than the pellets P1, in the quality parameters related to the energetic part, such as higher calorific value and lower and energy density. With regard to quality parameters, physical, chemical and thermal, all pellets have reached the values stipulated by the norms of international standards. Thus, it can be concluded that pellets have high energy potential and can be substitute sources of energy, considered as clean and renewable, due to the use of residues from wood, and that the insertion of charcoal fines can contribute to an increase potential of the pellets.

Keywords: Wood pellets. Fine of charcoal. Energy potential.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição dos custos no processo de produção de pellets	24
Figura 2 - Fluxograma das etapas de produção de pellets.....	29
Figura 3 - Fluxograma da carbonização da madeira e as destinações deste processo.....	32
Figura 4 - Materiais utilizados como matéria prima	37
Figura 5 - Composição dos matérias para produção dos pellets.....	38
Figura 6 - Procedimentos durante a produção dos pellets	39
Figura 7 - Resfriamento dos pellets com adição de 25% de finos de carvão vegetal.....	39
Figura 8 - Moinho utilizado para trituração dos materiais.....	40
Figura 9 - Matéria prima triturada	41
Figura 10 - Pellets triturados	41
Figura 11 - Determinação do teor de cinzas dos pellets e matéria prima.....	43
Figura 12 - Determinação do teor de materiais voláteis, mufla com cadinhos com os pellets.....	44
Figura 13 - Preparo dos pellets para análise do teor de umidade	45
Figura 14 - Determinação da densidade a granel dos pellets	46
Figura 15 - Ensaio de durabilidade mecânica dos pellets	47
Figura 16 - Calorímetro IKA WERKE, modelo C 500 Control.....	48
Figura 17 - Pellets produzidos e analisados.....	50
Figura 18 - Procedimento de busca e filtro de artigos mais relevantes	71

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparação do potencial energético dos pellets produzidos.....	566
Gráfico 2 - Comparação do potencial energético dos pellets produzidos com a literatura	577
Gráfico 3 - Análise imediata dos pellets	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fontes de biomassa de acordo com as classificações da Aneel.....	19
Quadro 2 - Normas de qualidade e suas especificações	24
Quadro 3 - Cronograma utilizado na RBS	72
Quadro 4 - Resumo geral da quantidade de artigos da RBS	73
Quadro 5 - Resumo geral da quantidade de artigos da RBS	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de diferentes combustíveis sólidos	22
Tabela 2 - Principais características dos pellets.....	22
Tabela 3 - Comparação entre os pellets e outros combustíveis.....	23
Tabela 4 - Análise imediata dos pellets	51
Tabela 5 - Análise imediata da matéria prima para produção dos pellets	51
Tabela 6 - Propriedades físicas dos pellets.....	52
Tabela 7 - Propriedades térmicas e energéticas dos pellets	54
Tabela 8 - Comparação entre os pellets produzidos e a literatura	55

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAF	Associação Brasileira de Produtores e Florestas Plantadas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida
Cal	Calorias
CF	Carbono Fixo
FI	Fator de Impacto
GEE	Gases do Efeito Estufa
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
J	Joules
Kg CO ₂ eq.	Quilogramas de dióxido de carbono equivalente
MV	Materiais Voláteis
NBR	Norma Brasileira
PCS	Poder Calorífico Superior
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCU	Poder Calorífico Útil
NO _x	Óxidos de nitrogênio
SGA	Sistema de Gestão Ambiental
SO _x	Óxidos de enxofre
TCz	Cinzas
TU	Teor de umidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	15
1.2.1 Objetivo Geral	15
1.2.2 Objetivos Específicos	15
1.3 JUSTIFICATIVA	15
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1 BIOMASSA VEGETAL	17
2.2 PELLETS.....	20
2.2.1 Custo de Produção de Pellets	24
2.2.2 Produção de Pellets	26
2.3 CARVÃO VEGETAL.....	31
2.3.1 Produção do Carvão Vegetal	31
2.3.2 Finos de Carvão Vegetal	32
2.4 IMPACTOS AMBIENTAIS	33
3 METODOLOGIA	35
3.1 DELINEAMENTO DO TRABALHO.....	35
3.2 METODOLOGIA PARA ELABORAÇÃO DA REVISÃO TEÓRICA.....	36
3.3 MATERIAL	36
3.3.1 Proporção entre Maravalha/Serragem e Finos de Carvão Vegetal para Produção das Amostras de Pellets	37
3.4 MÉTODOS	38
3.4.1 Análises Químicas.....	42
3.4.1.1 Análise imediata	42
3.4.1.2 Teor de cinzas.....	42
3.4.1.3 Teor de material volátil	43
3.4.1.4 Teor de carbono fixo.....	44
3.4.2 Análises Físicas.....	45
3.4.2.1 Teor de umidade	45
3.4.2.2 Determinação da densidade a granel.....	46

3.4.2.3 Determinação do dimensionamento dos pellets	46
3.4.2.4 Determinação da durabilidade mecânica dos pellets	47
3.4.3 Análise Térmica.....	48
3.4.3.1 Determinação do poder calorífico superior e inferior	48
3.4.3.2 Determinação da densidade energética dos pellets	49
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA	49
4 RESULTADOS.....	50
4.1 PRODUÇÃO DOS PELLETS	50
4.2 ANÁLISE IMEDIATA DOS PELLETS	50
4.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PELLETS.....	52
4.4 ANÁLISE TÉRMICA	54
5 CONCLUSÃO	59
5.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	60
REFERÊNCIAS.....	61
APÊNDICE A – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA (RBS).....	68

1 INTRODUÇÃO

Uma das fontes de energia renováveis e com grande potencial de desenvolvimento para os próximos anos é a biomassa. Esta é considerada uma das principais alternativas para substituir fontes de energia, tais como o petróleo e carvão mineral e minimizar a dependência de combustíveis fósseis. A utilização racional da biomassa é de grande importância ambiental para reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa e o consumo de combustíveis fósseis, como o petróleo que possui grandes emissões gasosas. Além disso, a biomassa vegetal possui grande potencial energético e diversidade de recursos, e um plano de gestão correto e sustentável é extremamente importante (SACCHELLI S, DE MEO e PALETTO, 2013).

Dentre os biocombustíveis estão os pellets, estes apresentam características superiores de biomassa, se comparado, por exemplo, com os briquetes, especialmente em relação à densidade energética (ARRANZ et al, 2015). Os pellets são considerados biocombustíveis renováveis, e possuem baixa umidade, forma homogênea e elevada densidade energética, sendo um produto natural de fácil estocagem e manuseio. Os pellets de biomassa lignocelulósica são formados a partir de pequenos blocos ou pelotas cilíndricas, compactadas e densas, resultantes da aglomeração de materiais lignocelulósicos, que são utilizados na geração de energia térmica (DIAS et al, 2012; GARCIA et al, 2017).

Para produção de pellets pode-se utilizar diversas matérias-primas, tais como resíduos do processamento de madeira, bagaço de cana de açúcar, bambu, palha de milho, capim elefante, entre outros resíduos lignocelulósicos. No entanto, nem todas as biomassas vegetais são adequadas para a produção de pellets, principalmente devido a elementos minerais responsáveis pela formação de cinzas residuais. A palha de arroz, por exemplo, possui cerca 15% de teor de cinzas, sendo valores acima de 4% considerados impróprios para combustão devido ao alto teor de sílica, o que pode causar corrosão e desgaste excessivo nos queimadores (DIAS et al, 2012).

O objetivo principal de compactar a biomassa em pellets é alterar a densidade do combustível. Já que, através do processo de compactação dos materiais, obtém-se melhoria principalmente nas características dos pellets em

relação ao transporte e armazenamento, tais fatores são atualmente determinantes para utilização da biomassa em larga escala e utilização de seus resíduos como fontes de energia. De acordo com Shan et al, (2017) as aplicações de pellets provenientes da biomassa apresentam um recente aumento mundial, entre os países com rápido crescimento na produção de pellets de biomassa, estão Estados Unidos, Canadá e Rússia.

Os pellets devem atender a alguns padrões de qualidade para se constituir em um produto homogêneo. Além disso, a normalização dos pellets tem a finalidade de garantir a quantidade e qualidade da energia necessária nos sistemas para os quais este produto foi destinado. A padronização das propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos pellets é um fator fundamental, tanto em relação à emissão de certificação de qualidade nacional, este geralmente é solicitado por seus consumidores, quanto mundialmente, já que o mercado internacional investe cada vez mais na importação de resíduos florestais já compactados (SPANHOL et al, 2015).

Os finos de carvão vegetal obtidos na produção do carvão vegetal demonstram grande potencial para melhorar as propriedades dos pellets devido suas características energéticas. Adicionando-se os finos do carvão vegetal à matéria prima tradicional para a produção de pellets (resíduos florestais) permitiria produzir pellets com aproveitamento de dois resíduos, que se descartados de forma incorreta poderiam provocar danos ao meio ambiente. A partir destes resíduos produzir-se-ia uma biomassa como fonte de energia renovável.

Assim, este trabalho tem como objetivo caracterizar os pellets, produzidos a partir de diferentes composições (de madeira com adição de finos de carvão vegetal), quanto às propriedades químicas, físicas, térmicas para fins energéticos.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

De acordo com o contexto apresentado, estabeleceu-se para este trabalho o seguinte problema de pesquisa: Quais são as características químicas, físicas, térmicas dos pellets produzidos a partir de resíduos de madeira com adição de finos de carvão vegetal?

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo Geral

Caracterizar os pellets provenientes de madeira com adição de finos de carvão vegetal.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Produzir pellets com diferentes concentrações de finos de carvão vegetal;
- Caracterizar os pellets desenvolvidos quanto às análises química, física e térmica;
- Definir qual a melhor composição para os pellets, dependendo de sua utilização e potencial energético

1.3 JUSTIFICATIVA

Com a crescente demanda de energia, surge o aumento da necessidade pela busca de energia limpa e renovável, visando minimizar os impactos ambientais.

O reaproveitamento de resíduos para geração de energia é uma forma econômica e sustentável do ponto de vista ambiental, já que contribui para minimização de possíveis impactos causados pelos resíduos e agrega valor aos resíduos, produzindo a partir destes um produto novo.

Caracterizar os pellets do ponto de vista químico, físico, térmico e energético para averiguar suas propriedades energéticas e justificar sua utilização como possível substituinte de energias não renováveis.

O objetivo de desenvolver pellets a partir de resíduos de madeira e finos de carvão vegetal, é contribuir para os seguintes aspectos:

- agregar valor à resíduos florestais e finos de carvão vegetal;
- obter maior valorização de subprodutos agroindustriais e de madeiras para geração de energia;
- reduzir a dependência de combustíveis fósseis, como o carvão mineral, petróleo e gás natural;

- contribuir para pesquisas na área de biomassa para geração de energia.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O conteúdo deste trabalho foi dividido em cinco (5) capítulos, descritos a seguir:

O capítulo 1 situa o leitor a respeito do contexto sobre o qual o trabalho foi elaborado, neste a pesquisa foi contextualizada, a justificativa elucidada e o problema de pesquisa, o objetivo geral e os objetivos específicos apresentados.

No capítulo 2, a teoria de base utilizada no desenvolvimento desta pesquisa e os conceitos fundamentais para o entendimento do trabalho foram apresentados, para isso foi realizada uma revisão de literatura sobre biomassa vegetal e suas características, pellets de madeira, o que são, a origem do processo produtivo bem como a descrição de sua produção, utilização e parâmetros de qualidade.

O capítulo 3 aborda a metodologia utilizada para a elaboração do trabalho.

No capítulo 4 estão apresentados os resultados obtidos através das análises realizadas, comparando-os com as literaturas existentes.

Finalmente, o capítulo 5 é destinado as conclusões desta pesquisa, além de possíveis sugestões para futuros trabalhos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir são abordados os principais conceitos necessários para o desenvolvimento e compreensão deste trabalho.

Para o levantamento das referências para o referencial teórico, realizou-se uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), conforme APÊNDICE A, está serviu como parâmetro para determinar os artigos mais relevantes e impactantes para construção do referencial.

2.1 BIOMASSA VEGETAL

De acordo com Manzano Agugliaro (2013), estima-se que 56% das pesquisas relacionadas à energia renovável se referem à biomassa. Se tratando de gerações futuras, a biomassa é de grande importância e se tornou objeto de estudo em programas de pesquisa pelo mundo.

A biomassa vegetal pode ser considerada como fonte de energia solar, já que através do processo de fotossíntese, as plantas absorvem CO₂ (dióxido de carbono) da atmosfera e transformam-no em carboidratos. Durante o crescimento das plantas elas absorvem praticamente todo o dióxido de carbono emitido no processo de queima, realizando assim o ciclo do carbono. Isso acontece com os biocombustíveis, pois apresentam baixa emissão líquida de carbono, diferentemente dos combustíveis fósseis (QIU, 2013).

Para minimizar a concentração de CO₂ presente na atmosfera e consequentemente evitar maiores desperdícios de resíduos agroindustriais, a utilização da biomassa vegetal surge como uma boa alternativa de fonte de energia (GARCIA, 2010).

A biomassa é uma das fontes de energia mais antiga a ser utilizada pelo homem. Sua utilização diminuiu a partir do século XX, isto devido a maior densidade energética de outras fontes, como o gás natural, carvão mineral, petróleo e seus derivados (SALDARRIAGA et al, 2015). No entanto, a utilização de materiais (biomassa) alternativos aos combustíveis fósseis tem grande potencial mundial, devido à alta eficiência e ser uma energia considerada limpa (SIMIONI; HOEFLICH, 2010).

Segundo Sawin, Freyr e Rickerson (2015) há estimativa que 19,1% da energia consumida mundialmente seja proveniente da biomassa vegetal e que 50% desse valor ainda é utilizado de forma primitiva, como para cozimento e aquecimento, principalmente em países subdesenvolvidos.

A Suécia e os Estados Unidos utilizam a biomassa vegetal em grande escala, por ser uma questão cultural de países desenvolvidos. Já em alguns países subdesenvolvidos é considerada como única fonte de energia disponível, como por exemplo, a Etiópia (GARCIA; CARASCHI; VENTORIM, 2017).

No Brasil, a biomassa é responsável por 27,2% de toda a produção de energia primária e, devido a abundância de energia hídrica, apenas 7,3% da geração de energia elétrica utiliza a biomassa para conversão termoelétrica. Os principais consumidores de biomassa são os setores industriais com cerca de 49,2%, destes, destacam-se alimentos e bebidas que totalizam 26,7% (BRASIL, 2015).

Devido a elevada demanda por energia renovável, desenvolveu-se novas formas de se utilizar com mais eficiência a biomassa vegetal e seus resíduos. Este aproveitamento pode ser realizado por meio da combustão direta, processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação), processos biológicos (fermentação) ou por meio de processamento mecânico, transformando os resíduos agroflorestais em um material compactado e denso como os pellets e os briquetes (PATEL; ZHANG; KUMAR, 2016).

Quanto maior o teor de lignina, maior será a compactação dos materiais, já que proporciona maiores ligações entre as partículas da biomassa e consequentemente maior combustão (GARCIA, 2010).

Atualmente a madeira é considerada como matéria prima principal para a produção dos biocombustíveis e países pertencentes à União Europeia são os principais consumidores mundiais. Na União Europeia a busca por fontes que substituam o uso de petróleo, carvão mineral e seus derivados fez com que o governo do Reino Unido financiasse o uso de pellets para sistemas de aquecimento residencial.

Segundo Ahmad et al (2016) a biomassa pode ser classificada através de cinco categorias, conforme as análises de: a) Madeira virgem – provenientes de florestas ou produtos florestais, como a madeira, pellets e briquetes de madeira,

cavacos e resíduos do processamento da madeira. b) Culturas energéticas – têm alto rendimento e cultivadas especificamente para geração de energia, como o eucalipto para fins energéticos, gramíneas perenes como o capim-elefante, a cana-energia, o sorgo e o bambu; c) Resíduos agrícolas – restos de plantios agrícolas em geral, incluem o bagaço de cana, cascas e palhas de produtos agrícolas; d) Resíduos de alimentos – incluem gordura animal, dejetos, fezes e estercos; e) Resíduos de processos industriais – licor negro (lixívia) da indústria de celulose e papel e tortas de filtros, lodos industriais, entre outros. Rosillo Calle et al (2007) simplificam as cinco categorias iniciais em apenas duas: lenhosa (recurso florestal - madeira) e não-lenhosa (gramíneas como sorgo, capim-elefante, bambu e bagaço de cana), conforme as normas ISO (International Standard Organization - Organização Internacional para Padronização) 17225 (2014).

O Quadro 1 representa a classificação das fontes de biomassa segundo Aneel-BIG.

Quadro 1- Fontes de biomassa de acordo com as classificações da Aneel

Origem	Fonte Nível 1	Fonte Nível 2
Biomassa	Agroindustriais	Bagaço de Cana de Açúcar
		Biogás- AGR
		Capim Elefante
		Casca de Arroz
	Floresta	Lixívia
		Lenha
		Gás de Alto Forno-Biomassa
		Resíduos Florestais
		Carvão Vegetal
		Biogás – Floresta
	Resíduos Sólidos Urbanos (Provenientes da construção civil, materiais metálicos e não metálicos, latas, vidros entre outros)	Biogás – RU
	Resíduos Animais	Biogás – RA
	Biocombustíveis Líquidos	Etanol
Óleos Vegetais		

Fonte: Adaptado de ANEEL (2016)

Em relação a composição da biomassa vegetal, esta é dada a partir de três elementos principais: carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O), além de pequenas quantidades de nitrogênio (N) e traços de outros elementos inorgânicos. Os principais componentes da biomassa são a celulose, as hemiceluloses e a lignina. Há também em sua composição extrativos orgânicos e inorgânicos (cinzas) mas estes são componentes de menor representatividade.

Segundo Bach, Skreiberg (2016) a macromolécula orgânica mais abundante na Terra é a celulose, esta possui cadeia não ramificada constituída por unidades β -D-anidroglicopirranose e com ligações glicosídicas β 1-4, que formam longas cadeias não-ramificadas. Já as hemiceluloses são macromoléculas que possuem composição variável e estrutura molecular similar à da celulose, porém, esta apresenta ramificações e é mais curta.

Um componente com grande potencial de utilização energética é a lignina, contida em grande quantidade na madeira (ZHANG et al, 2010). De acordo com Glasser et al (2010) quando a lignina é fracionada da celulose e hemiceluloses, pode ser utilizada para gerar energia às biorefinarias ou converter gás, podendo ainda ser transformada em combustíveis ou compostos a partir de processos.

Cerca de 1/3 da biomassa é composta por lignina, presentes nas paredes celular dos traqueóides, nos vasos e fibras da madeira (PYE, 2008).

A lignina é considerada uma macromolécula tridimensional amorfa cuja rede é aleatória, sendo tridimensional e composta por unidades ligadas de fenilpropano, o que as torna mais difícil de se decompor e desempenha papel de ligação entre as hemiceluloses e celulose dentro da parede da célula (YU et al, 2017). Para produção de materiais que necessitam de compactação durante o processo, a lignina é responsável por garantir esta compactação, sem que haja necessidade de adição de aditivos, dentre os materiais que utilizam da lignina como ligante em seu processo de compactação tem-se os pellets de madeira (DÜCK, 2013).

2.2 PELLETS

A necessidade de fontes de energia renováveis e caracterizadas como limpa, fez com que os pellets surgissem como uma fonte de energia alternativa, pois possuem grande potencial energético, e proporciona menor impacto ambiental, já

que utiliza resíduos industriais e florestais em sua composição (DE MAGALHÃES, 2017).

A matéria prima utilizada está relacionada ao teor de cinzas, teor de umidade e ao Poder Calorífico Superior (PCS) do material, que são alguns dos principais parâmetros de qualidade de pellets para fins energéticos. No processo de produção estão relacionados fatores como densidade a granel e durabilidade mecânica dos materiais (DUCA et al, 2014).

Porém, o teor de umidade, teor de cinzas e o poder calorífico, são considerados como as principais características quantitativas em relação ao potencial energético da biomassa (FURTADO et al, 2012). Tais parâmetros são essenciais para identificar qual queimador será utilizado e a quantidade de energia disponível, durante a transformação da biomassa em energia térmica.

Os pellets se destacam por serem sólidos e de fácil manuseio, além de necessitarem de pouco espaço para armazenamento e possuírem alta densidade energética. A geometria dos pellets proporciona algumas vantagens se comparado a outros materiais, já que suas dimensões permitem maior facilidade no transporte dos mesmos, que pode ser embalado em embalagens de vários tamanhos pré-definidos. Outra vantagem, está relacionada à alimentação de sistemas industriais, sendo esta tanto automática quanto manual como em aquecedores residenciais, pois este é considerado um produto cuja origem é natural, e sua composição não contém substâncias tóxicas (GARCIA; CARASCHI; VENTORIM, 2017).

Se comparados a outros biocombustíveis sólidos, os pellets apresentam alta densidade energética, o que os deixa no mesmo nível dos combustíveis fósseis. Segundo Wu et al (2011), os pellets apresentam teor de umidade de aproximadamente 8% e densidade a granel superior a 600 kg/m³, comparando-os com os cavacos de madeira apresentam vantagens, já que os cavacos de madeira possuem teor de umidade e densidade energética com variação de 40 a 50% e 220 a 250 kg/m³ respectivamente. Na Tabela 1, é feita uma comparação entre os pellets, cavacos de madeira e outros biocombustíveis sólidos.

Tabela 1 - Características de diferentes combustíveis sólidos

Tipo de biomassa	Cavacos <i>Woodchips</i>	Serragem em pó	Pellets de madeira de pinus	Carvão vegetal de eucalipto	Carvão vegetal espécie nativa
Teor de umidade (%)	45	12	8	5	5
Energia Específica (MWh/ton)	2,0	4,4	4,8	8,85	8,64
Energia Específica (MWh/m ³)	0,6	0,7	3,12	3,33	3,27

Fonte: Adaptado de Rosa et al (2014)

A partir da Tabela 1 é possível observar que os pellets e o carvão vegetal apresentam valores melhores em relação a cavacos e serragem, e que há uma relação de potencial energético com o teor de umidade dos materiais, visto que quanto menor o teor de umidade, maior o potencial energético do material.

Durante a combustão, os pellets possuem capacidade de minimizar significativamente as emissões atmosféricas (poluentes causadores de doenças), se comparado a outros combustíveis fósseis, como o petróleo e carvão mineral. Devido uma das fontes de matéria-prima para a fabricação dos pellets serem os resíduos provenientes da limpeza florestal (resíduos florestais), quando reaproveitado estes materiais, haverá uma contribuição na redução do risco de incêndios florestais. A Tabela 2 apresenta as principais características dos pellets.

Tabela 2 - Principais características dos pellets

Principais características dos pellets	
Dimensões	Diâmetro: 4-10 mm Comprimento: 10-40 mm
Poder calorífico superior	16,9 – 22,0 MJ/kg (4,04 – 5,26 kcal/kg)
Teor de umidade	6 – 10% (Base Seca)
Teor de cinzas	Menor que 0,5%
Matéria-prima	Serragem, maravalha e resíduos agroflorestais
Densidade à granel	650 – 700 kg/m ³
Conversão termoelétrica	1,0 MWh = 3.600 MJ \approx 212 kg de pellets

Fonte: Adaptado de Garcia (2017)

Os dados apresentados na Tabela 2, representam as principais características físicas, químicas e térmicas dos pellets, e seus respectivos valores de referência.

A Tabela 3 apresenta uma comparação entre os pellets e outros combustíveis.

Tabela 3 - Comparação entre os pellets e outros combustíveis

Comparação entre os pellets em relação a outros combustíveis	
Comparação com óleo leve	1.000 litros de óleo \approx 2,1 t de pellets
	1 t de óleo \approx 2,5 t de pellets
Comparação com cavacos de madeira	1 m ³ de cavaco de madeira \approx 0,28 m ³ de pellets
	\approx 0,18 t de pellets

Fonte: Adaptado de Garcia (2017)

Através dos dados expressos na Tabela 3, é possível identificar que em relação aos cavacos, os pellets necessitam de um volume de cerca de 28% do total dos cavacos, para obter o mesmo valor de combustão. E quanto ao óleo leve, os pellets necessitam de 2,5 vezes a mais, porém do ponto de vista ambiental, os pellets em sua maioria são obtidos de resíduos, diferentemente do óleo leve, que possuem alto impacto ambiental em sua produção.

Segundo Hoefnagels et al (2014), devido à crescente demanda do mercado mundial, a produção de pellets utiliza várias fontes de matéria-prima, relacionada a atividades florestais, tais como, maravalhas, serragem, pó de serra entre outros resíduos como galhos, aparas e cascas de madeira.

Grande parte dos países da Europa desenvolveram suas normas para qualificar, armazenar, transportar e determinar a combustão das biomassas, porém em 2012, surgiu a norma CEN/TS 14961-2 (2012) com a finalidade de estabelecer padronização e unificar a certificação no mercado europeu. Esta teve duração de apenas 2 anos, pois em 2014, surgiu a norma ISO 17225 (2014), parte 1 a 6, que é um conjunto de normas internacionais e o mercado europeu passou a seguir estes requisitos estipulados na norma. Nesta norma está contido os padrões de qualidade dos pellets e briquetes, caracterizados como produtos densificados, que podem ser produzidos a partir de biomassa vegetal. Assim esta norma foi fracionada em 6 partes, conforme apresentado na Quadro 2.

Quadro 2 - Normas de qualidade e suas especificações

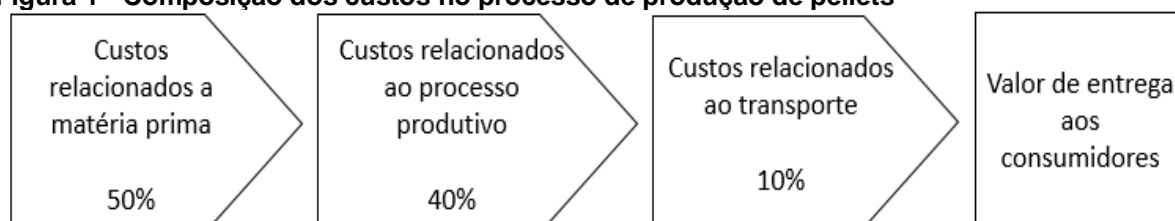
Norma	Especificações
ISO 17225-1	Determina as especificações para o tipo de matéria-prima provenientes de biomassa vegetal. Proíbe material contaminado por qualquer substância química adesiva.
ISO 17225-2	Determina as especificações dos pellets de madeira classificados para uso industrial e não industrial. Esta norma abrange apenas pellets de madeira produzidos a partir das seguintes matérias-primas: madeira virgem, resíduos da indústria de processamento de madeira (serragem, maravalha e pó de serra) e resíduos de madeira (cascas e folhas). Proíbe madeira de demolição e madeira tratada termicamente como a madeira torrificada.
ISO 17225-3	Determina as especificações para os briquetes.
ISO 17225-4	Determina as especificações dos cavacos de madeira.
ISO 17225-5	Determina as especificações para a lenha.
ISO 17225-6	Determina as especificações de pellets não lenhoso como biomassas herbáceas, resíduos de agricultura, biomassa aquática e misturas de biomassas.

Fonte: Adaptado de Garcia (2017)

2.2.1 Custo de Produção de Pellets

Segundo Jeffers et al (2013), assim como todo processo de produção industrial, o controle do custo de produção dos pellets é de fundamental importância para a competitividade do biocombustível tanto no mercado interno (outras fontes de energia e concorrentes) quanto ao mercado externo.

Para analisar o processo de valor agregado dos pellets em sua cadeia de produção, é necessário o controle desde a obtenção da matéria-prima até a entrega do produto final aos consumidores (QUÉNO, 2015). Este processo e os percentuais de custo destes, pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Composição dos custos no processo de produção de pellets

Fonte: Adaptado de Qian e McDow (2013)

Pirraglia et al (2010) utilizaram um modelo para estimar os custos de produção de pellets, chegaram ao valor de depreciação aproximado de 22,41 USD/tonelada.

Segundo Qian e McDow (2013), em análise realizada nos Estados Unidos, observaram que em média, são necessárias duas toneladas de fibras de madeira verde para obtenção de uma tonelada de pellets de madeira.

De acordo com Mani et al (2006), os custos relacionados a manutenção para a maioria das instalações e equipamentos estão entre 2 a 3% dos custos de capital, salvo a peletizadora e os moinhos de martelos, que podem gerar cerca de 10%, devido ao maior uso e desgaste.

Para realização do transporte dos pellets de uma determinada empresa ao porto de embarque, há três possibilidades: via caminhões (rodoviário), trens (ferroviário) ou balsa (hidroviário).

O transporte rodoviário é um método muito comum para entregar produtos de madeira. Porém, se considerar os impactos ambientais provocados pela emissão de gases do efeito estufa (GEE) através de caminhões, e comparando seu custo de transporte em relação a outras, os produtores de pellets nos Estados Unidos mudaram os modos de transporte, visando minimizar a liberação de carbono no ambiente. Em relação a questões econômicas, o transporte de pellets pode tornar-se inviável se superior a uma distância entre 60 a 100 km. O custo de entrega via caminhão varia entre 7,5 a 15 USD/tonelada se a distância de transporte for de 80 a 160 km. (PELLETS @ LAS, 2009b).

Segundo Norris (2011), muitos produtores de pellets nos Estados Unidos utilizam como meio de transporte ferrovias e ou hidrovias, isto se dá devido a preocupações em relação a custos e principalmente sobre impactos ambientais.

Um investimento em uma determinada fábrica de pellets, em conjunto a uma serraria e uma usina de celulose e papel, faz com que se tenha um maior aproveitamento de seus subprodutos, e tem-se um tempo de *payback* de 4,5 a 5,5 anos. E que a principal vantagem deste acoplamento é minimizar os custos de

energia relacionados ao processo de secagem das biomassas para pelletização (WOLF et al, 2006).

Thek e Obernberger (2009) analisaram o custo de produção de pellets na Áustria, através de vários cenários, mitigando a capacidade de produção, o tipo de matéria prima utilizada e o custo dos insumos, tais como energia. E concluíram que o custo relacionado a matéria-prima é o mais impactante para produzir pellets. Se o material utilizado for a maravalha, esta tem maior facilidade de secagem e pode ser realizada ao ar livre, sendo assim pode se dizer que a maravalha entra direto para o processo de pelletização, tem se uma economia neste quesito, já que seu custo é cerca de 72% do total. Caso o material a ser utilizado seja a serragem, necessita passar por um processo de secagem em estufa, mas seu custo é 25% menor se comparado com a maravalha.

Quéno (2015), analisou 9 empresas na região sul do Brasil, produtoras de pellets, estas de pequeno a médio porte e com produção baseada em maravalhas de pinus como matéria prima, pois é considerada um resíduo de baixo custo e maior compactação durante o processo de pelletização. Alguns fatores como a competitividade no mercado interno em relação a outras fontes de energia e valorização para exportação, auxiliam na crescente produção de pellets no Brasil. O valor de produção é estimado em 340 R\$/t.

2.2.2 Produção de Pellets

Para produção dos pellets, podem ser utilizadas várias biomassas do tipo vegetal, tais como: serragem, cascas e podas de árvores, maravalhas entre outros subprodutos originados de indústrias madeireiras, além de matérias de origem agrícola, como as palhas lignocelulósicas de gramíneas do gênero *Miscanthus* (LEHMANN et al, 2012), as palhas de cereais e *Panicum* (MANI et al, 2006), o bagaço da cana-de-açúcar (ALMEIDA et al, 2014) e o bambu (LIU et al, 2013). A principal fonte de matéria-prima para a produção de pellets é proveniente da atividade florestal, já que proporciona maior valorização para estes subprodutos (serragem, maravalha entre outros) que possuem menor valor ou muitas vezes

denominados como resíduos ou gargalos, e geram um produto de grande qualidade energética e baixo teor de cinzas (WOLF et al, 2006).

O primeiro passo neste processo é a colheita de madeira, sendo os resíduos do processamento de madeira utilizados como matéria-prima para grânulos de madeira. A operação comum de colheita depende da tecnologia utilizada, que muitas vezes é afetada pelos procedimentos de gerenciamento e as demandas do mercado. O recurso de madeira pode ser uma floresta natural ou uma floresta estabelecida. Uma floresta estabelecida é composta por três etapas: mudas, preparação do terreno e plantio. O processo de colheita é dividido nas seguintes etapas: abate, trilhos para a área de desembarque, processamento de árvores para toras, carregamento e transporte para o ponto do processo (MAGELLI et al, 2009).

Segundo Magelli et al, (2009) o processo de produção dos pellets consiste em três operações unitárias: secagem, redução de tamanho (moagem) e densificação (compactação). No primeiro passo, a serragem ou material utilizado que está úmido é seco, através de um secador rotativo. A matéria prima que chega ao moinho normalmente contém cerca de 50-65% de umidade. Esta alta umidade é reduzida para cerca de 10% no processo de secagem. Após a secagem, um moinho de martelo é usado para reduzir a biomassa para um tamanho de partícula adequado para granulação. Um tamanho de tela do moinho de martelo de 6,4 ou 3,2 mm é normalmente utilizado para redução de tamanho da biomassa, deixando o material mais homogêneo. O moinho de martelo é impulsionado por um motor elétrico, onde parte da energia do moinho de martelos é convertida em calor. A biomassa seca é finalmente compactada no moinho a partir do processo de prensagem (prensa) para então produzir os pellets de madeira.

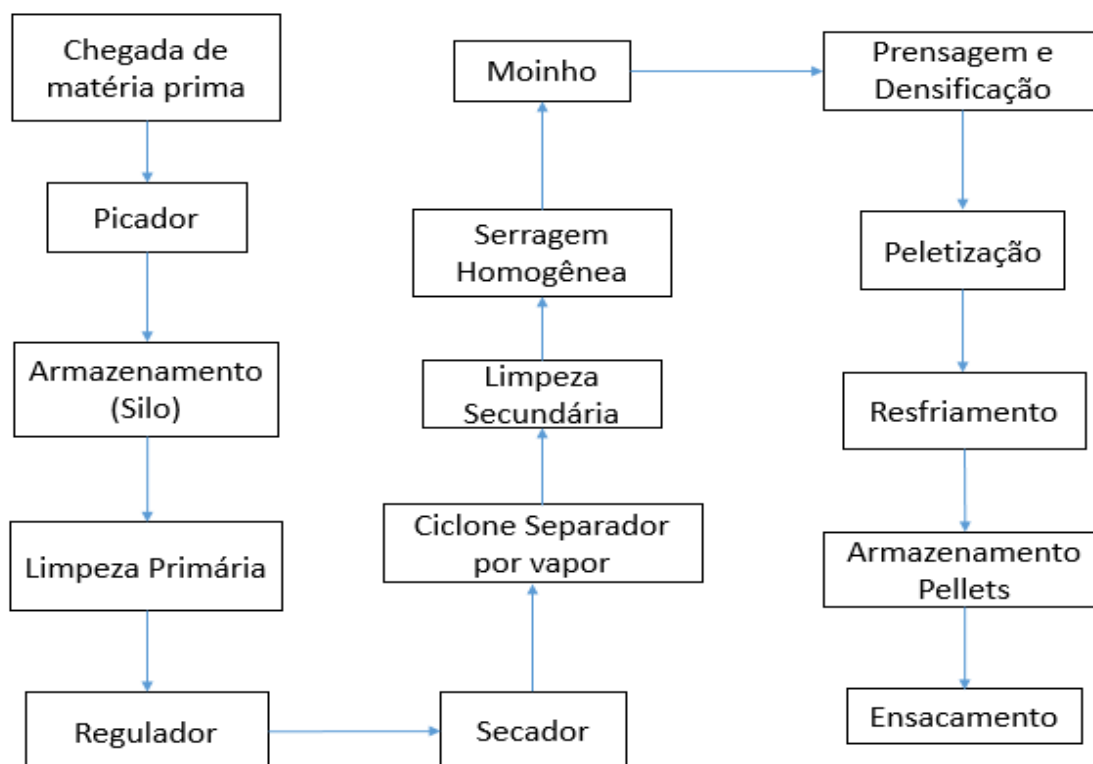
Os pellets de madeira que saem da máquina peletizadora, geralmente apresentam temperatura em torno de 70 a 90°C, isto se dá devido ao calor de fricção gerado durante a extrusão e pré-aquecimento do material. É necessário que ocorra o resfriamento dos pellets até uma temperatura de cerca de 25°C, isto auxiliará para endurecer e estabilizar os pellets de madeira, além de manter a qualidade do produto durante o armazenamento e manuseio. Os pellets arrefecidos são transportados do refrigerador para áreas de armazenamento usando sistemas de transporte mecânicos ou pneumáticos. Normalmente, os pellets são embalados automaticamente em sacos de 25 kg ou armazenados em silo.

Durante a produção dos pellets existem empresas que utilizam um agente ligante podendo ser lignosulfonato, amido de milho, farelo de canola entre outros materiais de origem vegetal, com a finalidade de melhorar o processo de peletização, isto devido ao efeito de lubrificação interna do molde, que permite reduzir o consumo de energia e aumentar a durabilidade dos pellets (AHN et al, 2014). De acordo com Tarasov et al (2013), os subprodutos derivados do processo de polpação sulfito da indústria de celulose (lignosulfonatos), são os agentes ligantes mais utilizados para produção de pellets, pois possuem poder aglomerante que aumentam a resistência mecânica dos biocombustíveis, mas, possuem efeito negativo no seu valor calorífico e aumenta a emissão de monóxido de carbono. As normas limitam o uso desses agentes ao máximo de 2% da massa total do produto.

Maximizar o potencial energético nos processos de colheita e transporte, além de aperfeiçoar as operações de produção dos pellets, podem ser consideradas como possíveis soluções para minimizar ou zerar as emissões líquidas de gases causadores do efeito estufa, pois nestas etapas ocorre alta utilização dos recursos energéticos (PA et al, 2012). Segundo Rossilo Calle et al, (2007) diferentemente da energia solar e eólica, que dependem de sazonalidades climáticas, a biomassa tem a vantagem de ser estocada e armazenada para uso posterior, o que garante o fornecimento contínuo de energia térmica.

Na indústria o processo de produção de pellets de madeira segue algumas etapas, estas podem ser observadas na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma das etapas de produção de pellets



Fonte: Adaptado de Garcia (2017)

O procedimento detalhado, complementando o fluxograma da Figura 2 de produção dos pellets, segue os seguintes procedimentos:

Chegada e Armazenamento: Chegada da matéria prima (serragem ou resíduos provenientes de florestas ou indústrias). Este é o processo de recepção da matéria prima, geralmente localizada no pátio da indústria. Se o material for serragem, este foi estocado em um silo, no caso de toras são transportadas direto para o pátio para o processo de transformação das toras em cavacos (picador), em seguida o material é transportado via correia transportadora ao local de armazenamento (silo).

Após armazenado o material passará por uma limpeza primária. A princípio retira-se as impurezas ou objetos estranhos, já que estes podem influenciar nas propriedades do material.

Em seguida, ocorre o processo denominado Regulador. É o equipamento que fara o controle da quantidade de matéria-prima a ser transportada ao secador.

O processo de secagem ocorre através de um tambor de secagem, onde foi retirada a umidade do material, esta retirada ocorre por movimentos circulares e ação do ar quente, o que deixa os materiais com umidade em torno de 10 a 12%. Vale ressaltar que a maioria das indústrias que produzem pellets, utilizam os próprios resíduos gerados durante o processo para geração de energia, como casca, aparas entre outros, o que lhe permite menor custo de energia.

Este setor inclui dois equipamentos principais: uma fornalha pirolítica e um secador industrial. A energia proveniente da fornalha aquece o secador de tambor rotativo. A alta temperatura a umidade da matéria-prima vaporiza-se e já seca é transportada ao processo de pelletização. Geralmente a matéria prima apresenta alto valor de umidade, assim a necessidade da redução desta umidade através de um sistema de secagem.

A próxima fase é ajustar a umidade, através de um ciclone separador por vapor. O ar quente tem passagem forçada entre as partículas, o que promove a remoção da umidade. O objetivo deste processo é garantir uniformidade da umidade.

Então é realizada uma limpeza do material denominada secundária, esta tem por objetivo garantir qualidade dos pellets produzidos. Neste caso esta limpeza também visa analisar que não há outro tipo de material, apenas os resíduos da madeira mencionados anteriormente.

Usa-se o picador e triturador de partículas finas, para homogeneizar o material. Durante esta fase a matéria-prima é triturada para obter seu tamanho final e ser uniformizada.

Estoque de serragem homogênea, nesta etapa o material se encontra pronto para o processo de densificação, já com a umidade e dimensionamentos desejados, preparados para sua compactação.

Então este material vai para o processo de prensagem, através de prensas granuladoras. Então o material é transportado a peletizadora e em condições de alta temperatura e pressão são compactadas e cortadas em tamanhos pré-definidos.

Uma etapa de grande importância é o resfriamento e acomodação dos pellets, já os pellets produzidos possuem temperatura próxima 95°C e deve chegar

lentamente à temperatura ambiente para não que não haja interferência ou perdas nas propriedades mecânicas.

Então os pellets já prontos e resfriados, foram armazenados em silos, e por fim ensacados por aspirador ou gravidade, o ensacamento possui diversos tamanhos de acordo com a necessidade do cliente.

2.3 CARVÃO VEGETAL

Segundo dados da IBÁ - indústria brasileira de árvores (2011) o Brasil é considerado o maior produtor e consumidor de carvão vegetal, já que é considerado um dos poucos países com capacidade de produzir este produto em grande escala. Este consumo de carvão vegetal possui alta concentração no mercado interno.

De acordo com a Empresa De Pesquisa Energética-EPE (2011) os segmentos de aço e ferro gusa são os principais destinos do carvão vegetal totalizando 72% de seu consumo, e 12% o setor de ferro-liga, o restante se encontra nos setores residenciais, industriais (exceto siderurgia), destacando-se a indústria química, produção de cimento, alimentos e cerâmica.

2.3.1 Produção do Carvão Vegetal

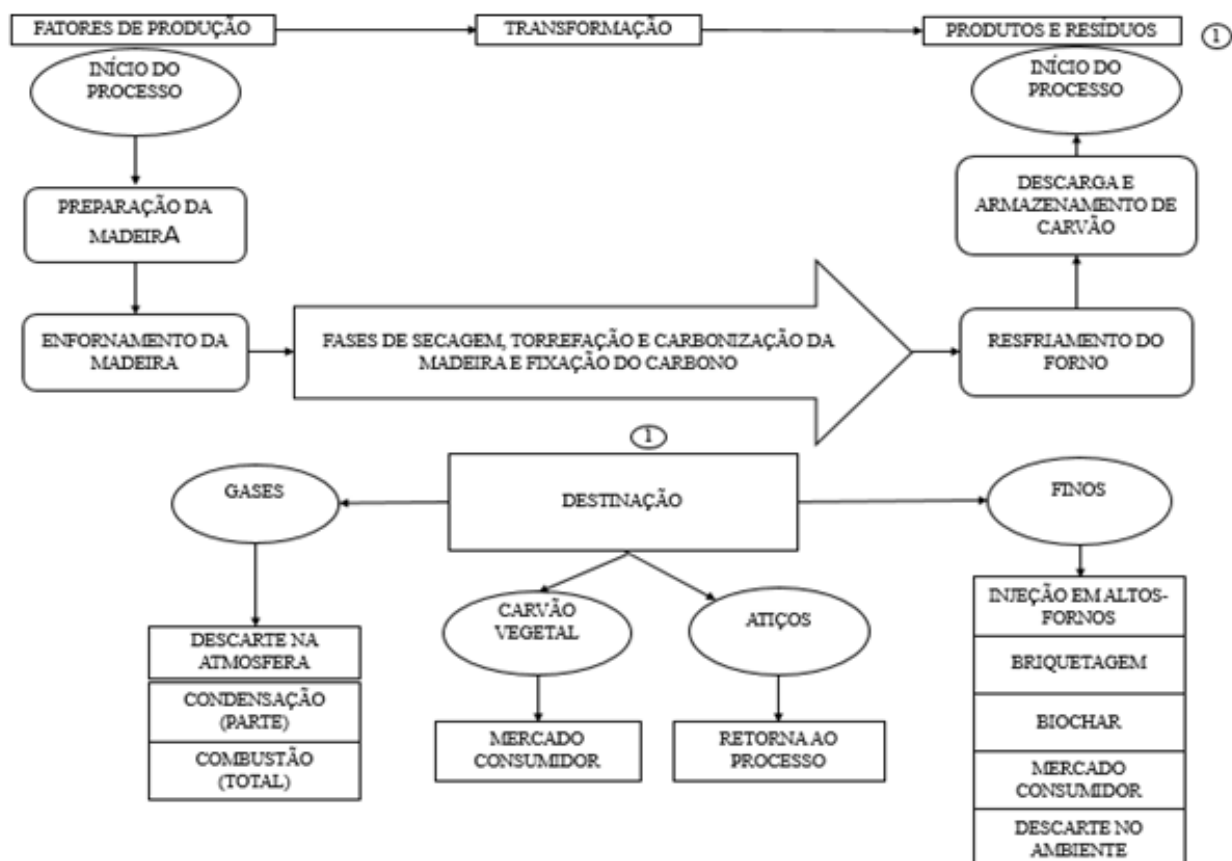
Segundo Sampaio (2008) a energia proveniente do carvão vegetal é praticamente o dobro de energia obtida pela madeira seca (900kJ/kg). É função da carbonização concentrar energia no volume disponível de madeira. O local onde ficam alocados os fornos e a realização das operações envolvidas nas atividades relacionadas ao acolhimento dos materiais e o envio da produção do carvão vegetal é designada carvoaria. O processo da transformação da madeira em carvão é denominado pirólise (VITAL; PINTO, 2011).

Segundo Frederico (2009) é necessário durante a produção do carvão vegetal realizar a secagem da madeira, neste processo ocorre a princípio a perda de água capilar, também conhecida como água livre, esta é localizada nos vasos e lúmen das células da madeira, este processo de remoção de água é teoricamente mais fácil de ser removido. Já a água de adesão (água presa), é localizada no

interior das paredes das células da madeira, e estão ligadas as microfibrilas da parede celular, o processo de remoção deste tipo de água é lento.

A Figura 3 representa o fluxo de carbonização da madeira e suas possíveis destinações.

Figura 3 - Fluxograma da carbonização da madeira e as destinações deste processo



Fonte: Adaptado de Santos (2017)

O processo de carbonização da madeira, conforme observado na Figura 2, demonstra as etapas necessárias para que ocorra a transformação da madeira bruta em seus produtos e ou subprodutos e resíduos. Sendo estes com grandes utilizações em outros processos, como o de carvão vegetal por exemplo ou finos da madeira, este podendo ser utilizado para produção de pellets.

2.3.2 Finos de Carvão Vegetal

Existem algumas preocupações quanto à produção de carvão vegetal, entre estas está a utilização dos subprodutos gerados durante o processo.

Segundo Rousset et al (2011) a friabilidade é considerada um gargalo se tratando de uma característica física do carvão vegetal, devido a sua capacidade de se fragmentar em pedaços menores. No processo de produção do carvão vegetal, as etapas relacionadas ao transporte e o manuseio geram cerca de 25% de finos, tal resultado dificulta ou, até mesmo, inviabiliza sua utilização (ROUSSET et al, 2011). Assim, é evidente a necessidade de recuperação e ou reutilização dos finos provenientes do carvão vegetal, uma vez que estes apresentam grande potencial energético.

Segundo Machado (2009) existem ganhos ambientais e comerciais através da mistura de finos de carvão vegetal com carvão mineral durante a injeção em alto forno.

2.4 IMPACTOS AMBIENTAIS

Segundo Garcia (2010) os resíduos derivados de florestas e indústrias (agroindustriais e agrofloretais) carecem de gestão adequada para que não haja contaminação do meio ambiente por meio deles, assim, a compactação e homogeneização deste material gera impactos positivos, viabilizando o uso de um possível passivo ambiental.

Desde 1970 há a utilização de produtos densificados produzidos a partir de resíduos de madeira em pellets, estes são utilizados para aquecimento de residências e água na Europa. Porém, segundo PA et al, (2013) a queima da biomassa pode ser considerada neutra em relação a emissões de carbono, este fator não se aplica em todas as categorias, tais como danos à saúde humana, redução de biodiversidade, se comparadas a diferentes materiais energéticos. Estudos indicam que os impactos causados à saúde humana, resultante da combustão da biomassa (madeira) para o aquecimento residencial podem ser maiores que os causados pela queima de gás natural (PA et al, 2013).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma das formas em desenvolvimento que visa facilitar a compreensão dos potenciais impactos ambientais e propor melhorias na gestão (ABNT, 2009). O Ciclo de Vida pode ser considerado como estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição

final. Sendo assim, engloba o conjunto de processos envolvidos como matérias primas, passando pela produção, utilização, tratamento pós-uso até a disposição final. O ciclo de vida de um produto pode ser ainda otimizado quando ocorre o seu reuso, reciclagem ou remanufaturamento (ABNT, 2009).

Hossain et al (2016) avaliaram a sustentabilidade ambiental da conversão de resíduos de madeira reciclada (de atividades de construção e demolição e outros resíduos de produtos de madeira) para produzir pellets de madeira para geração direta de energia. As características químicas e físicas de diferentes tipos de resíduos de produtos de madeira foram testadas. Uma abordagem de avaliação do ciclo de vida foi utilizada para avaliar e comparar os impactos ambientais e a sustentabilidade para a geração de calor a partir do biocombustível granulado e do carvão. A primeira parte foi focada na caracterização química e física das amostras de pellets estudadas, e a segunda parte está relacionada à avaliação de sustentabilidade utilizando técnicas de LCA. A unidade funcional no LCA foi de 1kWh de calor gerado a partir dos pellets de madeira. O conteúdo energético, as composições químicas e as concentrações de traço de metal atingiram os padrões relevantes. Observou-se também que impactos significativos na saúde, ecossistema, alterações climáticas e danos nos recursos podem ser potencialmente evitados utilizando pellets de madeira em vez de carvão para geração de energia.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem por objetivos demonstrar os procedimentos metodológicos para realização da pesquisa proposta.

3.1 DELINEAMENTO DO TRABALHO

Utilizou-se o procedimento elaborado por Gil (2008) para classificar esta pesquisa. Do ponto de vista do objeto, a pesquisa classifica-se como bibliográfica e de campo. Bibliográfica, pelo uso de literatura técnica pertinente ao tema abordado para a elaboração da teoria de base, neste caso, predominantemente artigos de periódicos. E de campo pois envolverá a coleta de dados para caracterizá-la e produzir os pellets provenientes de serragem de madeira de *Pinus ssp.* com adição de finos de carvão vegetal (eucalipto), para então obter as conclusões dos dados coletados.

Quanto a sua natureza, esta pesquisa pode ser classificada como uma pesquisa aplicada, pois foi utilizada como base para gerar conhecimentos para aplicação prática na solução de um problema específico (esta pesquisa visa a geração de uns produtos, por meio da inserção de resíduos para produção de pellets), além de caracterizar-se como uma investigação concebida pelo interesse em adquirir novos conhecimentos. A pesquisa aplicada é considerada a união do conhecimento disponível e sua ampliação.

Do ponto de vista da abordagem do problema, enquadra-se em uma pesquisa quantitativas, já que as análises de caracterização dos pellets consideram dados, experiências, percepções e intuições lógica e completa, ou seja, busca aproximar-se da realidade incluindo e medindo todos os fatores quantitativamente mensuráveis, tangíveis ou intangíveis.

Em relação aos objetivos, esta pesquisa apresenta perfil exploratório, pois é um tipo de pesquisa que está em concordância com outras fontes que darão base ao assunto abordado, como é o caso da pesquisa aqui apresentada, que utiliza-se bibliografias (literatura técnica) e análise e produção de materiais (produção de pellets de madeira com finos de carvão vegetal).

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, a pesquisa apresenta características de pesquisa bibliográfica e levantamento. Bibliográfica, já que há necessidade de explorar estudos sobre avaliação do ciclo de vida de pellets de madeira com finos de carvão vegetal. Levantamento, pois segue as seguintes etapas: definição do objetivo da pesquisa, definição da amostra, produção dos pellets, coleta dos dados, processamento dos dados (tabulação), análise dos dados, apresentação e discussão dos resultados.

3.2 METODOLOGIA PARA ELABORAÇÃO DA REVISÃO TEÓRICA

Realizou-se uma revisão bibliográfica preliminar, esta serviu como conhecimento inicial para a realização da pesquisa, ou seja, objetivou-se através desta uma primeira familiarização com os temas e a definição de *strings* de pesquisa e palavras-chave adequadas para a realização da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS). Para realizar a RBS, utilizou-se como base Conforto, Amaral e Silva (2011). Estes apontam que a RBS está organizada em 15 etapas distribuídas em 3 fases (Entrada, Processamento e Saída). No **APÊNDICE A** está disponível as etapas da realização da RBS.

3.3 MATERIAL

Neste trabalho utilizou-se os seguintes materiais como matéria-prima para produção dos pellets: Serragem de madeira (*Pinus spp*). e finos provenientes da produção de carvão vegetal (*Eucalyptus grandis*).

Os materiais utilizados como matéria-prima estão apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Materiais utilizados como matéria prima



Fonte: Autores (2018)

É possível observar na Figura 4(a), a maravalha e serragem utilizada para composição dos pellets, visto que a princípio seria utilizada apenas serragem de pinus, porém a empresa onde o material foi coletado não fazia mais a separação do mesmo, sendo assim houve frações de serragem e maravalha, o que não interfere na produção e caracterização das matérias, pois pertence a mesma espécie. A Figura 4(b), apresenta os finos de carvão vegetal utilizados para produção dos pellets.

3.3.1 Proporção entre Maravalha/Serragem e Finos de Carvão Vegetal para Produção das Amostras de Pellets

50 kg Pellets de maravalha e serragem de *Pinus* (usado como referência);

50 kg Pellets de maravalha e serragem de *Pinus* com 10% em massa de finos de carvão vegetal de *Eucalyptus*;

50 kg Pellets de maravalha e serragem de *Pinus* com 25% em massa de finos de carvão vegetal de *Eucalyptus*;

3.4 MÉTODOS

Para realizar a produção dos pellets utilizou-se os seguintes métodos:

Inicialmente foi realizada a coleta da matéria prima, esta ficou armazenada em local adequado, principalmente para controle de umidade.

Durante o preparo do material é então mensurado o teor de umidade da matéria-prima para verificar o valor real de massa do material, para ser possível realizar a composição adequada. Tal composição pode ser observada na Figura 5.

Figura 5 - Composição das matérias para produção dos pellets



Fonte: Autores (2018)

A Figura 5(a) apresenta a quantidade ideal de cada matéria prima na produção de cada pellets. Na Figura 5(b), o material já misturado e com o teor de umidade controlado para entrada na peletizadora, abaixo de 12%.

Os processos de vazão de saída dos pellets e a peletizadora utilizada estão apresentados conforme Figura 6.

Figura 6 - Procedimentos durante a produção dos pellets

Fonte: Autores (2018)

Observa-se na Figura 6(a), a peletizadora utilizada para produção dos pellets, produziu-se os pellets P1, P2 e P3 respectivamente. Tal ordem de produção, foi adotada devido ao desgaste provocado pelos finos de carvão vegetal durante a compactação na peletizadora. Na Figura 6(b), a saída dos pellets produzidos, sendo transportados através de uma correia transportadora até o local de resfriamento e acondicionamento dos pellets.

Após saída da esteira os pellets já produzidos foram armazenados para resfriamento, conforme observado na Figura 7.

Figura 7 - Resfriamento dos pellets com adição de 25% de finos de carvão vegetal

Fonte: Autores (2018)

O resfriamento é uma etapa de grande importância na fabricação dos pellets, pois pode influenciar na durabilidade mecânica entre outras características físicas e químicas. O resfriamento ocorre de forma natural, apenas com a troca de calor com o ambiente (ou seja, por condução e convecção natural).

Para realização de algumas análises fez-se necessário a trituração dos pellets e das matérias primas. A trituração dos materiais é importante, pois algumas análises não suportam materiais a granel, ou necessitam estar pré-dimensionadas. Nesta etapa utilizou-se um moinho para tritura os materiais, o qual pode ser observado na Figura 8.

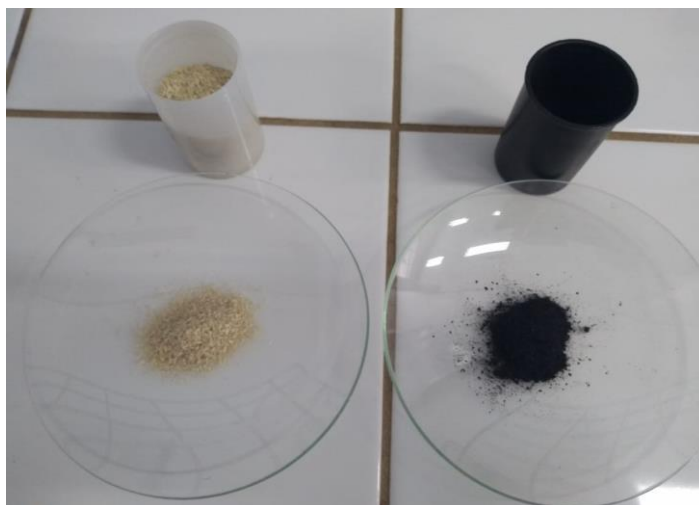
Figura 8 - Moinho utilizado para trituração dos materiais



Fonte: Autores (2018)

A matéria prima e os pellets já trituradas se encontram nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

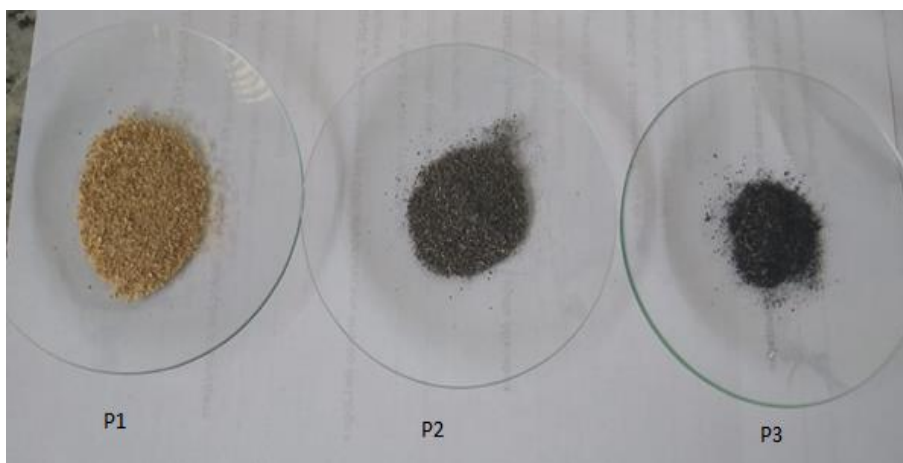
Figura 9 - Matéria prima triturada



Fonte: Autores (2018)

A esquerda da Figura 9, se encontra a maravalha/serragem triturada, e a direita os finos de carvão vegetal.

Figura 10 - Pellets triturados



Fonte: Autores (2018)

A Figura 10, apresenta os pellets P1, P2 e P3 respectivamente, triturados.

Os métodos utilizados para analisar a matéria-prima (serragem de pinus e finos de carvão vegetal) e os pellets produzidos, estão descritos a seguir:

3.4.1 Análises Químicas

3.4.1.1 Análise imediata

A análise química imediata das amostras de pellets foi realizada segundo a norma ABNT NBR 8112/86. Onde foi analisado o teor de cinzas, teor de materiais voláteis e carbono fixo, para estes foram realizadas três repetições por amostra.

3.4.1.2 Teor de cinzas

Para determinar o teor de cinzas utilizou-se cadinhos de porcelana previamente tarados à 575°C. É necessário 2,0000 g de amostra absolutamente seca, em seguida a amostra é inserida em cadinhos de porcelana para serem levados à mufla à temperatura de 575°C num intervalo de 4 horas. Após calcinadas foram levadas para o dessecador, com a finalidade de resfriar até obter massa constante. Este equipamento é utilizado para inserir os materiais analisados que estão sem umidade, com objetivo de impedir que estes absorvam umidade do meio ambiente. Para a determinação do teor de cinzas foi utilizada a Equação 1.

$$\%TCz = \frac{m_c}{m_a} \times 100 \quad [1]$$

Onde:

%TCz = porcentagem do teor de cinzas;

m_c = massa de cinzas, em gramas;

m_a = massa (2,0000 g) de amostra seca.

A realização do teor de cinzas dos pellets produzidos e da matéria prima para sua produção pode ser observada na Figura 11.

Figura 11 - Determinação do teor de cinzas dos pellets e matéria prima



Fonte: Autores (2018)

Na Figura 11(a), está a mufla utilizada para o procedimento e cadinhos no processo de calcinação. Na Figura 11(b) estão as amostras utilizadas, onde também foram analisadas as matérias-primas para verificação da influência da mesma nos pellets.

3.4.1.3 Teor de material volátil

Em um cadinho de porcelana adicionou-se 1,0000 g do material absolutamente seco (pellets, serragem e finos de carvão). Este foi aquecido previamente em uma mufla a $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ por 3 minutos na entrada da mufla e em seguida 10 minutos no interior da mesma. Após esta etapa, retirou-se o cadinho da mufla deixando o resfriar em um dessecador. Em seguida pesou-se o material. O teor de material volátil foi calculado conforme a Equação 2.

$$\%MV = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad [2]$$

Onde:

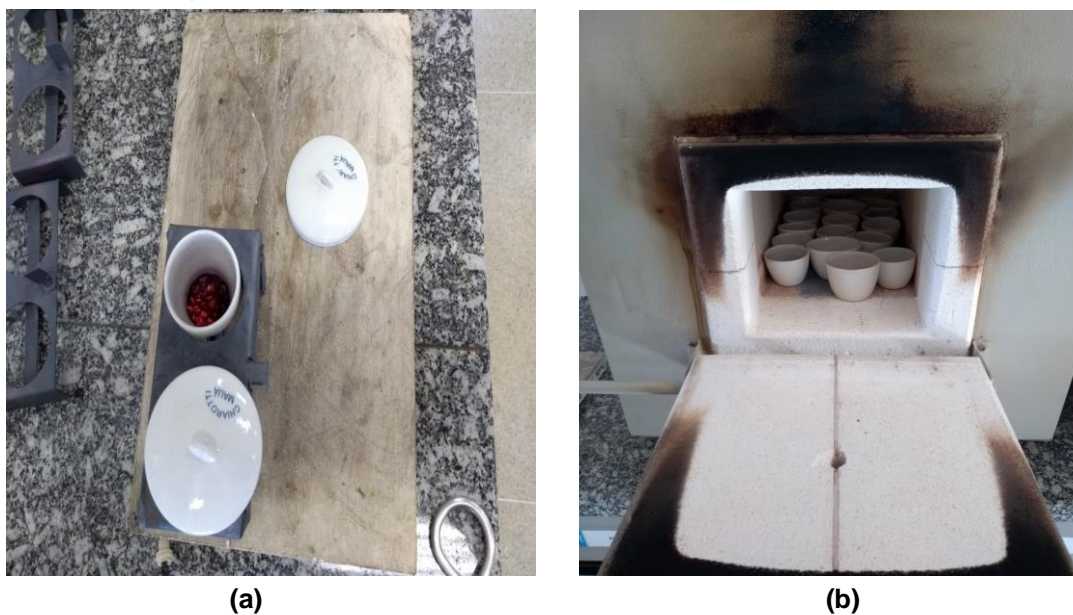
%MV = teor de material volátil, em %

m_1 = massa inicial da amostra, em gramas

m_2 = massa final da amostra, em grama.

O teor de materiais voláteis foi realizado conforme apresentado na Figura 12. Esta análise foi realizada em mufla devido a elevada temperatura, e a isto se aplica a utilização de cadinhos de porcelana, já que suportam esta alta temperatura, diferentemente de cadinhos metálicos ou de vidro, estes devem ser utilizados em estufas.

Figura 12 - Determinação do teor de materiais voláteis, mufla com cadinhos com os pellets



Fonte: Autores (2018)

Os cadinhos apresentados na Figura 12(a), estavam em combustão, e na Figura 12(b), o início do processo de combustão com as amostras dos materiais analisados.

3.4.1.4 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo é uma medida indireta e foi calculado através da Equação 3. Onde se leva em consideração o teor de cinzas e materiais voláteis.

$$\%CF = 100 - (\%MV + \%TCz) \quad [3]$$

Onde:

%CF é o teor de carbono fixo, em %.

3.4.2 Análises Físicas

3.4.2.1 Teor de umidade

Para determinação do teor de umidade das amostras de pellets de madeira utilizou-se a norma ABNT NBR 9656. Em pesa-filtro previamente tarado adicionou-se 2,0000 g do material, este foi levado à estufa ($105 \pm 3^\circ\text{C}$) durante 4 horas. Então transferiu-se o pesa-filtro para um dessecador até que este atingisse massa constante. Para cada amostra realizou-se três repetições. O teor de umidade dos pellets, foi determinado por meio da Equação 4:

$$\%TU = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad [4]$$

Onde:

% TU = porcentagem do teor de umidade;

m_1 = massa de amostra úmida, em gramas;

m_2 = massa de amostra seca, em gramas.

A Figura 13, apresenta a preparação dos pellets para análise do teor de umidade.

Figura 13 - Preparo dos pellets para análise do teor de umidade



Fonte: Autores (2018)

3.4.2.2 Determinação da densidade a granel

Para determinar a densidade a granel utilizou-se a norma ABNT NBR 6922, para carvão vegetal. Em função da quantidade limitada de pellets de madeira e da homogeneidade granulométrica dos mesmos, foi necessária uma adaptação da norma, um cilindro de PVC com volume conhecido de 5,0 litros, este foi preenchido até a borda com pellets e, sua massa, obtida numa balança. Para esta análise foram realizadas dez repetições para cada amostra de pellets.

A realização do ensaio da densidade a granel dos pellets, pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 - Determinação da densidade a granel dos pellets



Fonte: Autores (2018)

3.4.2.3 Determinação do dimensionamento dos pellets

Para determinação do diâmetro e comprimento dos pellets foi utilizada a norma austríaca ONORM M 7135. Com o auxílio de um paquímetro digital verificou-se o diâmetro e altura de cada um dos pellets. Nesse caso, as amostras foram separadas em sacos plásticos compostas por 100 unidades de pellets. Foram realizadas três análises aleatórias para cada amostra de pellets.

3.4.2.4 Determinação da durabilidade mecânica dos pellets

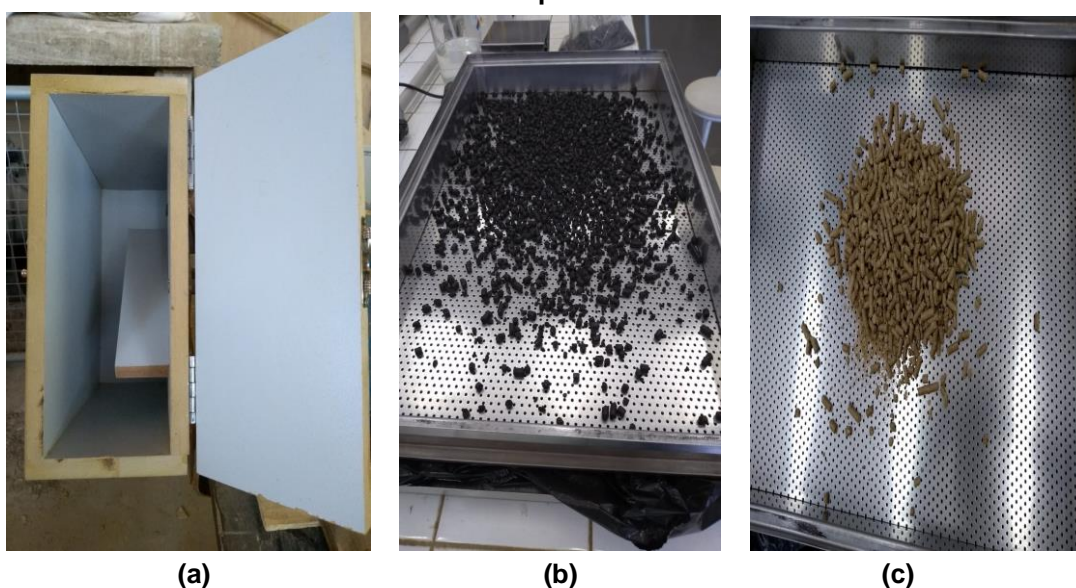
Para determinar a durabilidade mecânica dos pellets, foi utilizada a norma CEN/TS 15210-1 de 2005. Onde é necessário 500,0 g da amostra de pellets, estes foram colocados em uma caixa fechada, de dimensionamento 300x300x125 mm confeccionada em MDF de 15 mm de espessura. Assim os materiais presentes na caixa foram rotacionados a 50 rotações por minuto (RPM), durante 10 minutos. Para obtenção da quantidade de pellets retida nesta análise, foi utilizada uma peneira de 3,0 mm. Assim foi possível calcular a durabilidade mecânica, através da quantidade de massa retida na peneira (m_r) e a massa inicial (m_i), segundo a Equação 5. Para esta análise foram realizadas três repetições por amostra.

$$Du(\%) = 100 - \left(100 * \frac{m_r}{m_i}\right) \quad [5]$$

Onde Du (%) é a durabilidade mecânica (em % de massa), m_r é a massa que ficou retida em gramas, e m_i é massa inicial em gramas.

Para ensaio de durabilidade mecânica dos pellets, foi utilizada uma caixa padronizada de acordo com a norma, para calcular a quantidade de finos durante o atrito. A caixa e a peneira utilizada, podem ser observadas na Figura 15.

Figura 15 - Ensaio de durabilidade mecânica dos pellets



Fonte: Autores (2018)

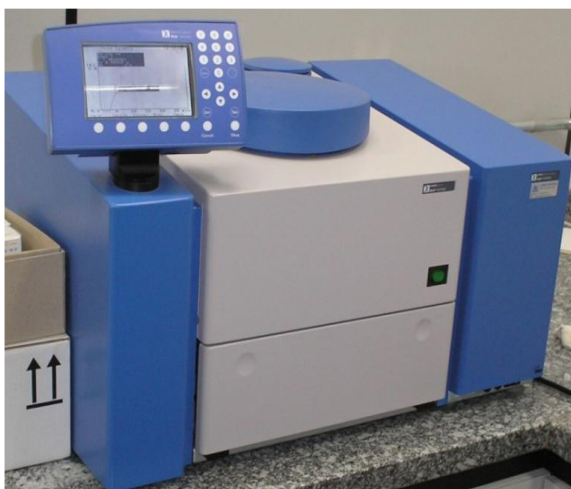
Na Figura 15(a), consta a caixa dimensionada e padronizada de acordo com a norma CEN/TS 15210-1 de 2005, nos itens (b) e (c) da mesma Figura, a peneira onde os materiais ficaram retidos.

3.4.3 Análise Térmica

3.4.3.1 Determinação do poder calorífico superior e inferior

Os materiais foram caracterizados quanto ao seu poder calorífico superior de acordo com a norma ABNT NBR 8633/84 em um calorímetro IKA WERKE, modelo C 5000 Control, localizada no laboratório de Química experimental da Unesp de Itapeva-SP, conforme ilustra a Figura 16. Realizou-se cinco repetições para cada amostra de pellets.

Figura 16 - Calorímetro IKA WERKE, modelo C 500 Control



Fonte: Autores (2018)

Para quantificar o PCI, o calor liberado durante a condensação da umidade presente na amostra é desconsiderado, sendo considerado apenas o calor do combustível realmente utilizado. O valor do PCI foi calculado segundo Equação 6.

$$PCI = PCS_{0\%} - 1356,52 \quad [6]$$

Onde:

PCI = Poder calorífico inferior da amostra em kJ/kg;

PCS = Poder calorífico superior a 0% de umidade a amostra, em kJ/kg;

3.4.3.2 Determinação da densidade energética dos pellets

Para determinar a densidade energética dos pellets multiplicou-se o PCI pela densidade a granel dos pellets. Esta representa a quantidade de energia por unidade de volume de combustível.

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para análise estatística dos resultados realizou-se a análise de variância ao nível 5% de probabilidade. E, o teste de Tukey para a comparação entre médias dos tratamentos, ao nível de 5% de probabilidade. Visando evidenciar as diferenças entre os tratamentos, adotou-se o princípio da utilização de letras (a, b, c) para a comparação entre médias pelo teste de Tukey: médias acompanhadas de mesma letra, não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade. As análises foram realizadas no programa de estatística RGui.

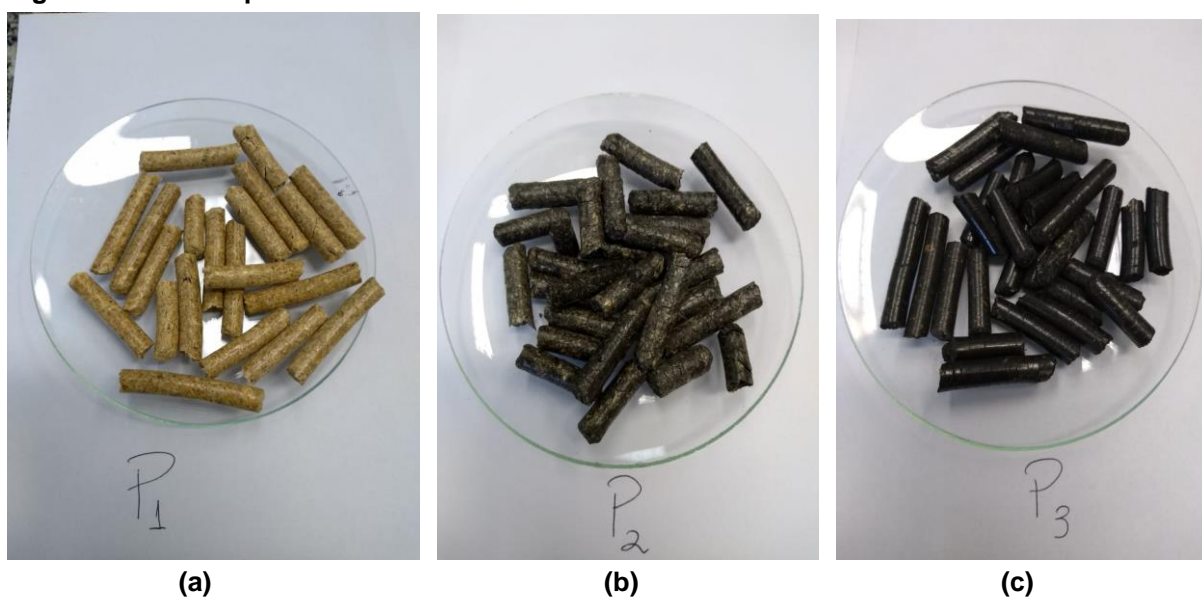
4 RESULTADOS

Neste capítulo descreve-se os resultados obtidos através da produção dos pellets e das análises realizadas no presente trabalho.

4.1 PRODUÇÃO DOS PELLETS

Os pellets produzidos estão apresentados na Figura 17.

Figura 17 - Pellets produzidos e analisados



Fonte: Autores (2018)

Os pellets apresentados na Figura 17(a) são os produzidos com serragem e marvalha 100% Pinus spp., no item (b) os pellets produzidos com serragem e marvalha de pinus com adição de 10% em massa de finos de carvão vegetal, e por fim no item (c) da Figura 17, é possível observar os pellets produzidos com serragem e marvalha de pinus com adição de 25% em massa de finos de carvão vegetal.

4.2 ANÁLISE IMEDIATA DOS PELLETS

Os resultados da análise imediata dos pellets produzidos, estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Análise imediata dos pellets

Propriedades	Unidade	P1	P2	P3
Carbono fixo	%	16,99 a	21,09 b	27,92 c
Materiais voláteis	%	82,26 a	76,78 b	69,13 c
Teor de cinzas	%	0,75 a	2,13 b	2,95 c

Fonte: Autores (2018)

Os pellets P1 apresentaram altos valores de materiais voláteis, já que em sua composição há maior concentração serragem e maravalha de madeira de pinus, nota-se que nos pellets P2 e P3 em que em houve a inserção de finos de carvão vegetal em sua composição, este reduziu a quantidade de materiais voláteis e consequentemente aumentou o valor de carbono fixo. A quantidade de materiais voláteis pode resultar em melhor ponto de ignição dos pellets, à qual os vapores desprendidos entram em combustão espontânea.

Os materiais com alto teores de cinzas necessitam de queima mais lenta, ou seja, necessitam de um tempo maior dentro do queimador utilizado.

Segundo Dias et al (2012) o percentual de cinzas dos materiais em geral durante a combustão deve apresentar valores inferiores a 4%, observa-se que neste quesito todos os pellets apresentaram valores desejáveis. Porém a norma Alemã DIN – 51731, relata que o a quantidade de cinzas deve estar abaixo de 1,5%, neste caso os pellets P2 e P3 não atendem este quesito. Isto pode ser justificado devido a adição dos finos de carvão vegetal, já que a quantidade de cinzas neste é maior do que na madeira.

Para melhor análise dos resultados, fez-se também a análise imediata da matéria prima para produção dos pellets. Estes resultados da análise imediata dos materiais utilizados para produzir os pellets, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Análise imediata da matéria prima para produção dos pellets

Propriedades	Maravalha/Serragem	Finos de Carvão
Análises	(% massa)	
Carbono fixo	16,96	27,46
Materiais voláteis	82,6	64,1
Teor de cinzas	0,44	8,44
Teor de umidade	11,79	6,52

Fonte: Autores (2018)

A diferença apresentada entre maravalha/serragem e finos de carvão vegetal, pode estar relacionada a carbonização sofrida pelo processo de fabricação do carvão vegetal, já que quanto maior a temperatura final de carbonização maior o teor de carbono fixo e poder calorífico superior, e menor teor de materiais voláteis. Certamente o poder calorífico dependera do teor de umidade dos materiais.

4.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS PELLETS

Os dados da Tabela 6, representam os resultados das propriedades físicas dos pellets. Os valores da análise estatística para evidenciar se houve diferenciação entre os pellets, estão representados pelas letras a, b e c.

Tabela 6 - Propriedades físicas dos pellets

Propriedades Físicas	Unidade	P1	P2	P3
Diâmetro Médio	Mm	6,87 a*	6,95 a	6,92 a
Comprimento Médio	Mm	32,38 a	26,26 a	25,58 c
Comprimento Máximo	Mm	52,09	37,27	41,85
Comprimento Mínimo	Mm	10,29	19,30	19,71
Pellets/ 100g	Unidade	112,00 a	131,00 b	146,00 c
Densidade a Granel	Kg/m ³	611,30 a	679,38 b	714,69 c
Durabilidade Mecânica	%	98,85 a	95,72 b	93,47 c
Teor de umidade	%	6,75 a	5,25 a	2,2 b

*Médias seguidas pelas mesmas letras não apresentam diferença estatística (Tukey, $\alpha = 0,05$).

Fonte: Autores (2018)

Quanto ao teor de umidade dos pellets produzidos, observa-se que todos atingiram este parâmetro de qualidade, já que de acordo com a norma Sueca SS – 187120, que é uma norma internacional de grande rigor neste critério, o valor desejável para este parâmetro é menor que 12% de umidade, e ambos os valores de teor de umidade dos pellets, se encontram dentro da faixa estabelecida por esta norma. Este valor de umidade dos pellets pode influenciar diretamente no rendimento da combustão do mesmo, já que quanto maior o teor de umidade dos materiais, menor o potencial de combustão deste.

Em relação a durabilidade mecânica dos pellets, todas as normas internacionais relatam que os biocombustíveis para este parâmetro devem apresentar valores superiores a 95%. É possível verificar que nestes quesitos os pellets P1 e P2 atenderam este parâmetro de qualidade e que os pellets P3 não atingiram este quesito com o máximo de qualidade, isto pode ser dado devido ao tempo de resfriamento dos pellets, já que os pellets P2 e P3 foram produzidos em locais diferenciados.

Durante a contagem do número de pellets contidos em 100 gramas de cada amostra observa-se que houve um coeficiente de variância de 13,63%, isto foi possível ser observado durante a saída na correia transportadora durante a produção dos pellets, já que os pellets P1 apresentavam maior dimensionamento, explicando assim esta diferença de unidades contidas em 100 gramas se comparado aos pellets P2 e P3.

A respeito da densidade a granel dos pellets, todos atingiram este parâmetro de qualidade, que de acordo com as normas internacionais, deve ser superior a 600 kg/m³. Notou-se também que houve uma variação significativa dos pellets P1 para os pellets P3, sendo estes 611,30 e 714,69 kg/m³, respectivamente. Tal valor pode ser resultado da adição de finos de carvão vegetal, já que tanto os pellets P2 quanto os pellets P3 apresentaram valores superiores aos pellets P1, estes que não possuem finos de carvão em sua composição. Segundo Obernberger e Thek (2002), valores inferiores de densidade a granel geram mais custos durante o transporte, já que influenciam na capacidade de estocagem, seja está para consumidores ou produtores.

Com relação ao diâmetro dos pellets, todos estão dentro da norma Alemã DIN-51713, que descreve que estes devem estar entre 4 a 10 mm de diâmetro, se comparado as demais normas internacionais os pellets produzidos se encontram em conformidade com todas estas neste quesito.

A norma Alemã também ressalta que quanto ao comprimento dos pellets, estes devem possuir no máximo 5 vezes o valor de seu diâmetro. Assim, é possível verificar na Tabela 7, que todos os pellets analisados estão dentro da norma.

O teste Tukey mostrou que os pellets P1, P2 e P3 não diferem entre si em relação ao diâmetro médio, e que os pellets P1 e P2 não diferem no quesito teor de

umidade e comprimento médio dos pellets, e estes diferem dos pellets P3. Nos demais parâmetros analisados conforme a Tabela 6, os pellets diferem entre si, já que foi realizada a análise estatística entre os pellets e o *p-value* foi inferior a 5%, denotando a diferença estatística entre os pellets.

4.4 ANÁLISE TÉRMICA

Com os resultados obtidos nas análises térmicas foi possível elaborar a Tabela 7, com as propriedades térmicas e energéticas dos biocombustíveis produzidos.

Tabela 7 - Propriedades térmicas e energéticas dos pellets

Propriedades	Unid.	P1	P2	P3
PCS _{0%}	MJ/kg	20,13 a	20,66 b	21,54 c
PCI _{0%}	MJ/kg	18,77 a	19,30 b	20,18 c
PCS _{TU%}	MJ/kg	18,77 a	19,58 b	21,07 c
PCI _{TU%}	MJ/kg	17,51 a	18,29 b	19,74 c
Densidade a granel	Kg/m ³	611,30 a	679,40 b	714,70 c
Densidade energética	GJ/m ³	10,70 a	12,43 b	14,11 c

Fonte: Autores (2018)

Observa-se que com relação ao poder calorífico, tanto superior (PCS) quanto inferior (PCI), houve um ganho de energia nos pellets P2 e P3, estes que em sua composição adicionou-se finos de carvão vegetal, sendo assim neste parâmetro aumentou-se o potencial de energia em até 1,27 MJ/kg se comparando os pellets P1 com os P3.

Nota-se que houve uma relação de proporcionalidade do poder calorífico com o teor de umidade, quanto menos umidade os materiais apresentaram maior o poder calorífico.

Segundo Liu et al (2013), para pellets de madeiras com casca de arroz, a densidade a granel determinada foi de 640 kg/m³, e pellets de bambu com 540 kg/m³. Tal fator pode estar relacionado com a quantidade de lignina presente nos

materiais, assim como os pellets produzidos e analisados estão dentro destes intervalos, sendo que os pellets P2 e P3 apresentaram valores superiores. Ainda sobre a densidade a granel, esta, permite conhecer para futuros cálculos a massa transportada e armazenada por unidade de volume.

Após realização da análise estatística entre os pellets P1, P2 e P3, obteve-se valor do p-value foi inferior a 5%, denotando a diferença estatística entre os pellets. Estes diferiram em todos os parâmetros de qualidade analisados na Tabela 8.

Ao comparar as propriedades dos pellets produzidos com outros autores, foi possível elaborar a Tabela 8.

Tabela 8 - Comparação entre os pellets produzidos e a literatura

Propriedades	Unid.	P1	P2	P3	Ferreira et al, (2014). Pellets de Pinus	Nunes et al, (2014). Pellets de Pinus Torrefados	SETTE JR et al, (2016). Pellets de Bambu
PCS	MJ/kg	18,77	19,58	21,07	17,10	16,20	18,90
Densidade a granel	Kg/m ³	611,30	679,40	714,70	624,00	600 – 650	350
Teor de umidade	%	6,75	5,25	2,20	5,10	7 – 10	7,7
Densidade energética	GJ/m ³	10,70	12,43	14,11	12,41	8,36 – 9,06	5,74

Fonte: Autores (2018)

A partir dos dados expressos na Tabela 8, é possível observar que todos os pellets produzidos apresentam valores similares ou superiores a outros pellets encontrados na literatura. Como exemplo um dos fatores determinante para mensurar o potencial energético dos pellets é o poder calorífico e a densidade energética, sendo que nestes quesitos os pellets produzidos se sobressaíram em relação a outros encontrados na literatura, como demonstrado na Tabela 8. Com

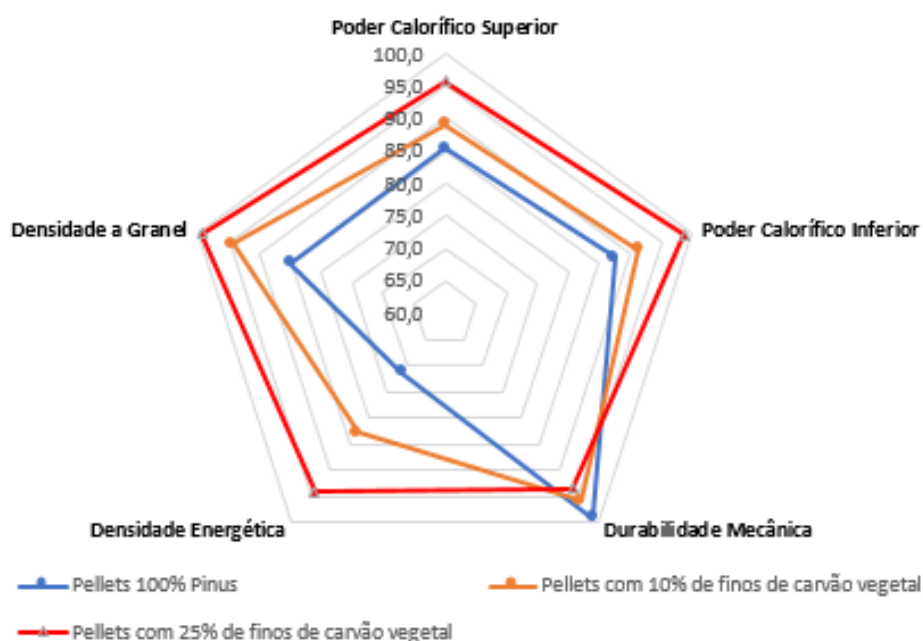
destaque para os pellets de madeira com adição de finos de carvão vegetal, este que elevou o potencial energético dos biocombustíveis (P2 e P3).

Segundo Ferreira et al (2014), os teores de umidade podem afetar no poder calorífico dos pellets. Esta afirmação pode ser observada através da Tabela 8.

O teor de umidade ideal para pellets de padrões de qualidade elevado, devem estar entre 4,6 a 8,8% e densidade de 650 a 690 Kg/m³ (GUO ET AL, 2015).

O Gráfico 1, apresenta uma comparação entre os pellets produzidos, quanto a seus parâmetros de qualidade.

Gráfico 1 -Comparação do potencial energético dos pellets produzidos

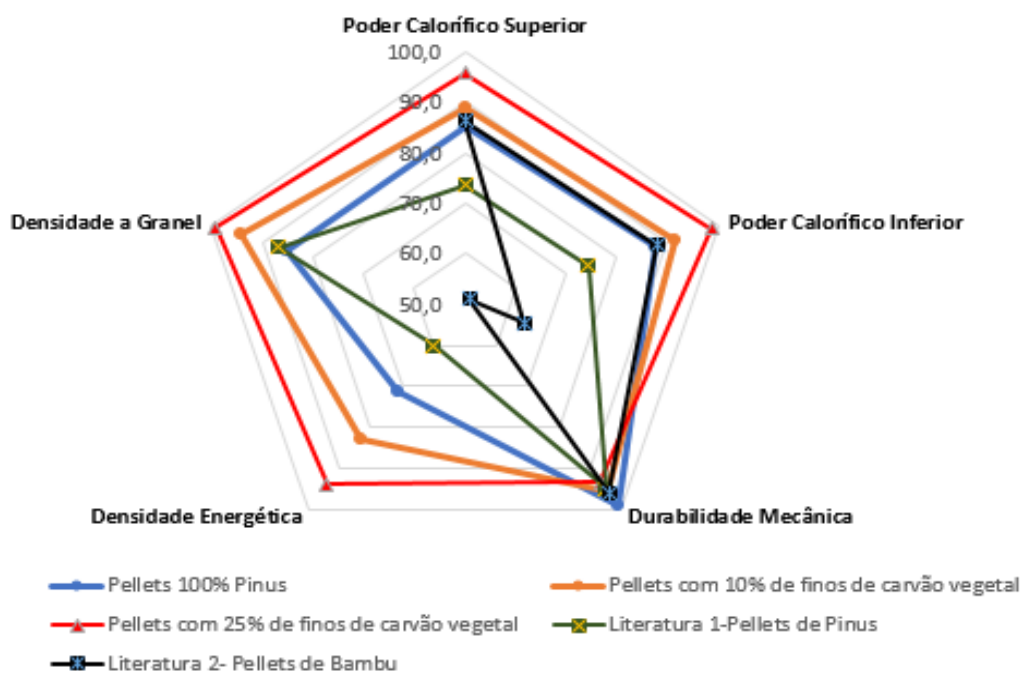


Fonte : Autores (2018)

A partir do Gráfico 1, é possível observar que quanto aos parâmetros de qualidade referentes ao poder calorífico (superior e inferior), densidade a granel e densidade energética os pellets P3 se destacaram em relação aos demais pellets produzidos, e que no quesito durabilidade mecânica os pellets P1 obtiveram maior potencial neste parâmetro de qualidade. No geral quanto ao potencial energético os pellets P3 obtiveram resultados bem superiores aos pellets P1 e P2, e notou-se que a adição de finos de carvão vegetal impactou nestes parâmetros.

Comparando-se os pellets produzidos com a literatura (outros trabalhos que utilizaram pellets e os analisaram energeticamente) em relação aos parâmetros de qualidade, foi possível elaborar o Gráfico 2.

Gráfico 2 - Comparação do potencial energético dos pellets produzidos com a literatura



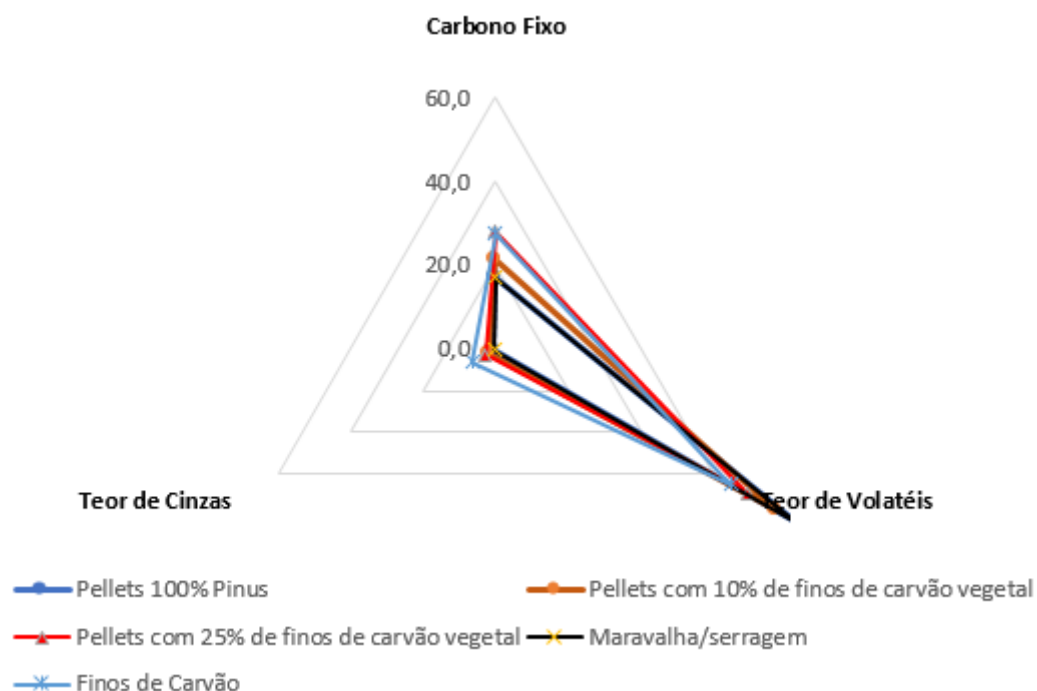
Fonte : Autores (2018)

No Gráfico 2, os dados da literatura 1 foram analisados por Ferreira et al, (2014), e os dados pertencentes a literatura 2, segundo SETTE JR et al, (2016).

Analisando-se o Gráfico 2, nota-se que se comparados as literaturas encontradas, de forma geral, todos os pellets obtiveram valores superiores em relação aos parâmetros analisados.

O Gráfico 3, apresenta os dados obtidos a partir da análise imediata dos pellets.

Gráfico 3 - Análise imediata dos pellets



Fonte: Autores (2018)

Observa-se ao analisar o Gráfico 3, que o teor de finos de carvão vegetal impactou em aumento significativo de carbono fixo, o que já era esperado, devido sua composição ser praticamente carbono. Nota-se também que os pellets P1 apresentaram maiores teores de materiais voláteis, este esta relacionado com o tempo de ignição dos pellets, quanto maior o teor de voláteis, mais rápido o material tende a iniciar a combustão. Conseqüentemente os pellets P1 apresentaram menores valores de carbono fixo, diferentemente dos pellets P2 e P3.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos foi possível tirar algumas conclusões com relação ao delineamento proposto no trabalho.

Nota-se que dependendo da utilização dos pellets, há uma indicação entre os pellets produzidos, pois está ligado diretamente ao seu campo de atuação. Sendo assim, pode-se obter mais de uma resposta a questão de qual a melhor composição de pellets, se tratando de potencial energético, os pellets P3 se destacaram neste quesito.

No geral todos os pellets produzidos atenderam os parâmetros de qualidade desejados pelas normas de padrões internacionais, exceto em relação a durabilidade mecânica dos pellets P3, que obtiveram 93,47% e as normas exigem valores iguais ou superiores a 95 % de durabilidade mecânica.

Os pellets possuem grande potencial energético, é uma boa alternativa para utilização de resíduos agroindustriais, já que através destes é possível produzir pellets de alta qualidade e menores impactos ambientais se comparados a outras fontes de energia como óleo, petróleo e carvão mineral. Além disto não há utilização de aditivos que possam comprometer o meio ambiente durante a combustão dos materiais.

Assim é possível agregar valor a dois resíduos (finos de carvão vegetal e resíduos de indústria madeireira) e produzir pellets com alto potencial energético e considerado fonte de energia renovável devido estes resíduos serem provenientes de materiais considerados renováveis. O simples fato de estar aproveitando um material descartável para produzir os pellets (resíduos) já minimiza os possíveis impactos ambientais que este provocaria ao meio ambiente. Sua dimensão também contribui para minimização de impactos ambientais, pois durante o transporte é necessária uma quantidade menor de viagem de um determinado caminhão se comparados com a madeira, carvão briquetes, isto devido a compactação dos pellets serem maior, e a distribuição durante o armazenamento para transporte ser mais homogênea.

5.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento desta pesquisa foram identificadas algumas oportunidades para o desenvolvimento de trabalhos futuros relacionados ao tema abordado. São estes:

- Aplicar a técnica de ACV para determinar os possíveis impactos ambientais evitados com inserção de cinzas.
- Realizar a combustão dos pellets em diferentes temperaturas e velocidades, para analisar se há diferença no seu potencial energético;
- Utilizar outros materiais para composição dos pellets e compará-los com os provenientes de madeira.

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **ABNT NBR ISO 14040**. Versão Corrigida: 2014: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Brasil, 2009a.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **ABNT NBR ISO 14044**. Versão Corrigida: 2014: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações. Brasil, 2009b.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 6922**. Carvão vegetal - Ensaio físico - Determinação da massa específica - Densidade a granel. Rio de Janeiro, 1981.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 8112**. Carvão vegetal - Análise Imediata. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 8633**. Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR 14929**. Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2003.

ABRAF (Associação Brasileira De Produtores E Florestas Plantadas) Anuário estatístico da **ABRAF**: ano base 2010. Brasília, 2011. 130p.

ADAMS PWR, SHIRLEY JEJ, MCMANUS MC. Comparative cradle-to-gate life cycle assessment of wood pellet production with torrefaction. **Appl Energy**, 2015.

AHMAD, A. A. et al. Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1333–1347, 2016.

AHN, B. J. et al. Effect of binders on the durability of wood pellets fabricated from *Larix kaemferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. **Renewable Energy**, v. 62, p. 18–23, 2014.

ALMEIDA, L.F.P., SOLA, A.V.H., BEHAINNE, J.J.R. Análise físico-química do produto e processo de pelletização da biomassa bagaço de cana-de-açúcar. IV

CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Ponta Grossa, PR, Brasil, 03 a 05 de Dezembro de 2014.

ARRANZ, J. I., MIRANDA, M. T., MONTERO, I., SEPÚLVEDA, F. J., & ROJAS, C. V. Characterization and combustion behaviour of commercial and experimental wood pellets in South West Europe. **Fuel**, v. 142, p. 199-207, 2015.

BACH, Q.-V.; SKREIBERG, Ø. Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: A review and comparison with dry torrefaction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 665– 677, 2016.

BIG (Banco de Informações de Geração) – **ANEEL** (Agência Nacional de Energia Elétrica). 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **RESOLUÇÃO Nº. 382**, de 26 de dezembro de 2006. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, 2006.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Balanço Energético Nacional - **BEN 2015**: Ano base 2014. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2015.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. 8º Congresso Brasileiro de Gestão do Desenvolvimento de Produtos (**CBGDP**), Porto Alegre, 2011.

DE MAGALHÃES, Mateus Alves et al. Caracterização de pellets produzidos a partir de capim-elefante pa-ra uso energético. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 7, n. 3, 2017.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - **DIN 51731**: Testing of solid fuels - Compressed untreated wood, Requirements and testing. Deutsches Institut für Normung (Ed.). Berlin, 1996.

DIAS, J.S.; SOUZA, D.D.; BRAGA, MIRANDA, C.B., BARBOSA, P.D., & ROCHA, R.D., et al. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Brasília: **Embrapa Agroenergia**, 2012.

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

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

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Balanço Energético Nacional 2011**: Ano Base 2010. Rio de Janeiro, p. 266. 2011.

FERREIRA, P., T., FERREIRA, E., M., TEIXEIRA, J., C. Analysis of industrial waste in wood pellets and co-combustion products, **Waste Biomass Valorization**, 637-650, 2014.

FREDERICO, P.G.U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 73 f.. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2009.

FURTADO, T. S., FERREIRA J.C., BRAND M.A., & NEVES M.D. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de Pinus taeda em diferentes idades. **Revista Árvore**, v. 36, n. 3, p. 577–582, 2012.

GARCIA, Dorival Pinheiro. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. Dissertação. Universidade Estadual Paulista. 2010.

GARCIA, D. P., CARASCHI, J. C., & VENTORIM, G. O setor de pellets de madeira no Brasil. **Revista Ciência da Madeira**, v. 8, n. 1, 2017.

GARCIA, D. P. **Técnicas multivariadas (HCA e PCA) aplicadas na avaliação de biomassas vegetais para produção de pellets**. Tese Doutorado. Universidade Estadual Paulista. 2017.

GIL, Antonio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4ª ed., São Paulo: **Atlas**, 2008.

GLASSER, G., NORTHEY, R. A., & SCHULTZ, T. P. Lignin: historical, biological, and materials perspectives. Washington, **American Chemical Society**, 2010, p. 305–320.

GUO, M., W. SONG, J. BUHAIN, **Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective** Renewable Sustainable Energy Rev., 2015.

HOEFNAGELS, R., JUNGINGER, M., FAAIJ, A. The economic potential of wood pellet production from alternative, low-value wood sources in the southeast of the U.S. **Biomass and Bioenergy**. v. 71, p. 443–454, 2014.

HOSSAIN, M.U., LEU, S.Y., POON, C.S. Sustainability analysis of pelletized bio-fuel derived from recycled wood product wastes in Hong Kong. **J. Clean. Prod.** 113, p. 400–410, 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 17225-1: 2014 - Solid biofuels - Part 1 - General requirements**. Brussels, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 17225-2:** 2014 - Solid biofuels - Part 2 - Graded pellets. Brussels, 2014a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 17225-3:** 2014 - Solid biofuels - Part 3: Graded wood briquettes, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 17225-4:** 2014 - Solid biofuels - Part 4: Graded wood chips, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 17225-5:** 2014 - Solid biofuels - Part 5: Graded firewood, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 17225-6:** 2014 - Solid biofuels - Part 6 - Graded non wood. Brussels, 2014b.

JEFFERS, R. F. JACOBSON, J. J., SEARCY, E. M. Dynamic analysis of policy drivers for bioenergy commodity markets. **Energy Policy**. v. 52, p.249–263, 2013.

KOFMAN, P.D. Simple ways to check wood pellet quality. **Bioenergy News**, SEI REIO, Winter, p8-9.2007.

LASCHI, A.; MARCHI, E.; GONZALEZ-GARCÍA, S. Environmental performance of wood pellets production through life cycle analysis. **Energy**, 2016.

LEHMANN, B., SCHRÖDER, H.W., WOLLENBERG, R., REPKE, J.U. Effect of Miscanthus addition and different grinding processes on the quality of wood pellets. **Biomass and Bioenergy**, v.44, p.150-159, 2012.

LIU, Z., JIANG, Z., CAI, Z., FEI, B., YU, Y., LIU, X. Effects of carbonization conditions on properties of bamboo pellets. **Renewable Energy**, v. 51, p. 1-6, 2013.

LÖFGREN, B.; TILLMAN, A.; RINDE, B. Manufacturing actor's LCA. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 19, p.2025-2033, 2011.

MACHADO, F. S. **Aproveitamento energético de finos de carvão em alto forno, visando redução de emissões e obtenção de créditos de carbono**. 116f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Rural do Rio de Janeiro, Seropédica - RJ, 2009.

MAGELLI, F., BOUCHER, K., BI, H. T., MELIN, S., & BONOLI, A. An environmental impact assessment of exported wood pellets from Canada to Europe. **Biomass & Bioenergy**, 33, pp. 434-441, 2009.

MANI, S., SOKHANSANJ, S., BI, X., TURHOLLOW, A. Economics of producing fuel pellets from biomass. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 22, n.3, p. 421-426, 2006.

MANZANO AGUGLIARO, F.; ALCAYDE, A.; MONTOYA, F.G.; ZAPATA-SIERRA, A.; GILL, C. Scientific production of renewable energies worldwide: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 18, p.134–143. 2013.

NORRIS, K. Logistics support vital for US wood pellets exports to Europe (2011).

NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O.; CATALÃO J. P. S.; A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation. **Renew Sustain Energy Rev**, 40:153–60. 2014.

OBERNBERGER, I., THEK, G. Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their composition behavior. **Biomass & Bioenergy**, v.27, n.6, p.653-669, 2004.

ONORM (Osterreiches Normungs Institut). **M 7135**. Compressed wood or compressed bark in natural state - Pellets and briquettes. Requirements and test specifications, Vienna, 2000.

PA, A. et al. Environmental footprints of British Columbia wood pellets from a simplified life cycle analysis. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, p. 220–231, 2012.

PATEL, M.; ZHANG, X.; KUMAR, A. Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1486–1499, 2016.

PELLETS@LAS (2009b). Logistic management of wood pellets: Data collection on transportation, storage and delivery management. Available from: https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/ieeprojects/files/projects/documents/pelletslas_pellet_logistics_data.pdf . Access on: 10/11/2018.

PIRRAGLIA, A., GONZALEZ, R., & SALONI, D. Techno-economical analysis of wood pellets production for US Manufacturers. **BioResources**, v.5, n°4, p.2374-2390, 2010.

PYE, E.K. Industrial lignin production and applications. In: KAMM, B., GRUBER, P.R., KAMM, M. (Eds.). **Biorefineries Industrial Processes and Products**. Wiley-VCH, Winheim, p. 165–200. 2008.

QIAN, Y, MCDOW, W. The Wood Pellet Value Chain - An economic analysis of the wood pellet supply chain from the Southeast United States to European Consumers. The US Endowment for Forestry and Communities. 2013, 59p.

QIU, G. Testing of flue gas emissions of a biomass pellet boiler and abatement of particle emissions. **Renewable Energy**, v. 50, p. 94–102, 2013.

QUÉNO, L. R. M. (2015). **Produção de pellets de madeira no Brasil: estratégia, custo e risco do investimento**. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal, Publicação PPG EFL. DM-132/09, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145p.

RIBEIRO, Guilherme Fernando. **Proposta de classificação de métodos de previsão de demanda para novos produtos: estudo no sistema brasileiro de franquias**. Dissertação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

ROSA, R. A. Avaliação energética da maravalha gerada em uma serraria de pequeno porte. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**. v. 2, n. 2: pp. 16-22, 2011.

ROSILLO CALLE, F. et al. **The Biomass Assessment Handbook: bioenergy for a sustainable environment**. 2. ed. London: Earthscan, 2007.

ROUSSET, P.; PIRES, A.C.; SABLONSKI, A.; RODRIGUES, T. LCA of eucalyptus wood charcoal briquettes. **Journal of Cleaner Production**, v.19, p.1647-1653, 2011.

SACCHELLI S, DE MEO I, Paletto A. Bioenergy production and forest multifunctionality: a trade-off analysis using multiscale GIS model in a case study in Italy. **Applied Energy** 2013.

SALDARRIAGA, J. F. et al. Fast characterization of biomass fuels by thermogravimetric analysis (TGA). **Fuel**, v. 140, p. 744–751, 2015.

SAMPAIO, R.S. Conversão da biomassa em carvão vegetal. Situação Atual com Tendências 2025. CGEE- **Centro De Gestão e Estudos Estratégicos**. Belo Horizonte, 14 p. 2008.

SANTOS, Sueli de Fátima de Oliveira Miranda. **Modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal**. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

SAWIN, J. L. S.; FREYR, S.; RICKERSON, W. **Renewables 2015 Global Status Report**.

SPANHOL, A.; NONES, D. L.; KUMABE, F. J. B.; BRAND, M. A. Qualidade dos pellets de biomassa florestal produzidos em Santa Catarina para a geração de energia. **Floresta**, v. 45, n. 4, p. 833, 2015.

ŞENGÜL, Hatice et al. A cradle to gate life cycle assessment of Turkish lignite used for electricity generation with site-specific data. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 478-490, 2016.

SETTE, J. R. C. R.; FREITAS, P. C.; FREITAS, V. P.; YAMAJI, F. M.; ALMEIDA, R. A. Production and characterization of bamboo pellets. **Bioscience Journal**, 32, 922, 2016.

SHAN, F.; LIN, Q.; ZHOU, K.; WU, Y.; FU, W.; ZHANG, P.; SONG, L.; SHAO, C.; YI, B. An experimental study of ignition and combustion of single biomass pellets in air and oxyfuel. **Fuel**, v. 188, p. 277-284, 2017.

SIMIONI, Flávio José; HOEFLICH, Vitor Afonso. Cadeia produtiva de energia de biomassa na região do Planalto Sul de Santa Catarina: uma abordagem prospectiva. **Revista Árvore**, v. 34, n. 6, 2010.

SWEDISH STANDARDS. **SS 187180**: Biofuels and Peat - Determination of mechanical durability of pellets and briquettes, pellets. Classification Swedish Standards. Stockholm, 1999.

TARASOV, D., SHAHI, C., LEITCH, M. Effect of Additives on Wood Pellet Physical and Thermal Characteristics: A Review. **ISRN Forestry**, p 6. 2013.

THEK, G., OBERNBERGER, I. Wood pellet production costs under Austrian framework conditions. In: Proceedings of the 17th European Biomass Conference & Exhibition, June/July 2009, Hamburg, Germany, p. 21992137, ETA **Renewable Energies** (Ed). Italy

VITAL, M.H.F.; PINTO, M.A.C. Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil. **BNDS setorial** 30, p. 237-297. 2011.

WOLF, A., VIDLUND, A., ANDERSSON, E. Energy-efficient pellet production in the forest industry - a study of obstacles and success factors. **Biomass and Bioenergy**. v.30, n. 1. p.38-45, 2006.

WU, M.R.; SCHOTT, D.L.; LODEWIJKS, G. Physical properties of solid biomass. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n° 5, p. 2093–2105, 2011.

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

APÊNDICE A – Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS)

A Fase 1 (Entrada) é composta por oito etapas: problema; objetivos; fontes primárias; *strings* de busca; critérios de inclusão; critério de qualificação; métodos e ferramentas; e cronograma.

Problema: definir o problema é o ponto de partida da RBS. Através deste espera-se responder uma ou mais perguntas. O problema definido nesta etapa determina o tipo de evidência que deve ser incluída na revisão. O problema definido foi qual a melhor proporção de resíduos de madeira e finos de carvão vegetal para produção de pellets em relação ao poder energético e impactos ambientais. Assim, foram estabelecidas as questões de pesquisa: Desenvolver um produto (pellets) utilizando resíduos de madeira e finos de carvão vegetal. Qual método utilizar para avaliar os impactos ambientais? Qual a melhor proporção de resíduos de madeira e finos de carvão vegetal para garantir qualidade dos pellets e menores impactos ambientais?

Objetivos: os problemas de pesquisa apresentados são desdobrados nos objetivos desta RBS, estes visam: identificar e apresentar os materiais para produção dos pellets; identificar os métodos de caracterização dos pellets provenientes de madeira com adição de finos de carvão vegetal e analisar os impactos ambientais dos pellets.

Para a realização da busca dos artigos, foram feitas combinações de duas ou três palavras-chave (variando conforme a base de dados). Na pesquisa foram utilizados operadores booleanos *and* (e = deve conter um termo e o outro) e *or* (ou = deve conter um termo ou outro), ou seja, o operador booleano *and* restringe a pesquisa equivalendo à expressão “com todas as palavras” e o operador booleano *or* amplia a pesquisa equivalendo à expressão “com qualquer uma das palavras”. Em algumas palavras-chave (*keyword*) utilizou-se o símbolo de truncamento (*) – empregado para fazer plurais e variações de grafias de zero a infinitos caracteres – como, por exemplo, utilizado para *charcoal**.

Destaca-se também a utilização de um teste de combinações das palavras-chave bem como o uso dos operadores booleanos na base de dados *Web of Science*, base de dados que oferece um tutorial para melhor compreender e utilizar os operadores booleanos. Vale ressaltar que o autor desta pesquisa ficou atento às

diferenças entre as bases de dados no que tange a construção de *strings* e uso dos operadores booleanos.

A princípio definiram-se as palavras-chaves: wood pellets and pellets production and energy potential and charcoal*

Critérios de inclusão: para definir os critérios de inclusão dos artigos é necessário levar em conta os objetivos da pesquisa. Como critério de inclusão dos artigos estabeleceu-se: para o tema pellets de madeira (artigos relacionados ao desenvolvimento e análise de pellets de madeira), para o tema finos de carvão vegetal (artigos envolvendo materiais que utilizaram em sua composição finos de carvão vegetal). Os critérios de inclusão dos artigos foram utilizados na análise dos resultados, nos filtros 1 e 2.

Critério de qualificação: tem por finalidade avaliar a importância do artigo para o estudo. Como critério de qualificação dos artigos estabeleceu-se que seriam analisados os seguintes elementos: a quantidade de citações do artigo, o fator de impacto da revista que o artigo foi publicado e o estrato de classificação de periódicos (Qualis-Periódicos) da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes). Os critérios de qualificação dos artigos foram utilizados na análise dos resultados, após o filtro 3.

Métodos e ferramentas: consiste em definir os filtros de busca, como foi realizado a busca nas bases de dados e como os resultados foram armazenados. Estabeleceu-se os seguintes filtros de busca, conforme a Figura 18.

Figura 18 - Procedimento de busca e filtro de artigos mais relevantes



Fonte - Baseado em Conforto, Amaral e Silva (2011)

Realizou-se também uma busca cruzada de artigos, ou seja, a partir de referências citadas nos artigos dos periódicos classificados como mais relevantes para esta pesquisa (analisou-se a importância dessas referências, relacionando com o problema e os objetivos da RBS, aplicou-se os critérios de inclusão de qualificação para posteriormente selecionar ou não os artigos identificados na busca cruzada).

Referente ao armazenamento dos resultados, utilizou-se o software EndNote X7, que é um gerenciador de bibliografias que importa referências bibliográficas das bases de dados.

Cronograma: a definição do cronograma é de grande importância para realização da RBS. No Quadro 3 apresenta-se o cronograma que foi estabelecido nesta pesquisa para realização da RBS.

Quadro 3 - Cronograma utilizado na RBS

ETAPAS DA RBS	DATA
Identificar o problema da RBS	10/09/2017
Definição dos objetivos da RBS	11/09/2017
Definição das fontes primárias	12/09/2017
Critérios de inclusão	15/09/2017
Critérios de qualificação	15/09/2017
Método de ferramentas	17/09/2017
Busca/Coleta dos dados (periódicos e base de dados)	19/09/2017 a 30/09/2017
Análise dos dados (filtros)	1/10/2017 a 6/10/2017
Organizar documentos (arquivar os arquivos)	7/10/2017 a 20/10/2017
Síntese e apresentação dos resultados (referencial teórico)	2/12/2017 a 5/01/2018

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2016)

A RBS foi realizada no período de junho de 2017 a janeiro de 2018.

A Fase 2 (Processamento) contempla três etapas, são elas: condução das buscas; análise dos resultados; e documentação. A Fase 2 segue um processo iterativo contendo sete passos. Essas etapas e passos foram detalhados a seguir.

Condução das buscas: para esta parte foram utilizadas as bases de dados citadas nas fontes primárias, estas são: *Web of Science*; *Scopus*; e *Science Direct*. Em cada uma das bases de dados realizou-se uma busca com as palavras-chave (combinações delas) as quais são apresentadas nas *strings* de busca. A condução das buscas aconteceu da seguinte maneira:

Na base de dados *Web of Science*, no campo da pesquisa básica, foram selecionados os documentos caracterizados como artigos. Foi utilizado na busca dois campos para pesquisa utilizando-se os operadores booleanos *and* (e) e *or* (ou).

Na base de dados da *Scopus*, selecionou-se a aba pesquisa de documentos (*document search*). Para esta também foi utilizado na busca dois campos para pesquisa utilizando-se os operadores booleanos *and* (e) e *or* (ou).

Na base de dados da *Science Direct*, a princípio, selecionou-se a opção *Advanced search* e, em seguida, as opções: *All*, *Search for (Title)*, *Refine your search (Journals)* e *All Sciences*.

Análise dos resultados: é realizada a leitura e análise dos resultados, ou seja, os filtros de leitura, que compreende os seguintes passos: filtro 1 (seleção dos

artigos por meio da leitura do título, resumo e palavras-chave), filtro 2 (seleção dos artigos por meio da leitura da introdução e conclusão) e o filtro 3 (seleção dos artigos por meio da leitura completa). Na Figura 13 os filtros 1, 2 e 3 correspondem aos passos 3, 4 e 5, respectivamente. No Quadro 4 apresenta-se um resumo geral da quantidade de artigos em cada fase e o número de artigos excluídos em cada critério.

Quadro 4 - Resumo geral da quantidade de artigos da RBS

DESCRIÇÃO	NÚMERO DE ARTIGO
Total bruto	187
Exclusão – Duplicados	94
Total Filtro 1	93
Exclusão – Critérios de inclusão	75
Total Filtro 2	23
Exclusão – Critérios de qualificação	13
Total	10

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2016)

Foram obtidos 187 artigos. Após realizar a exclusão dos duplicados obteve-se um total de 93, isso corresponde que um mesmo artigo está indexado em bases de dados diferentes.

Ao realizar o filtro 1, que compreende a seleção dos artigos por meio da leitura do título, resumo e palavras-chave, utilizou-se os critérios de inclusão dos artigos estabelecidos na Etapa 5 (critérios de inclusão). Os artigos que atenderam os critérios de inclusão foram selecionados para o filtro 2. O filtro 1 resultou na exclusão de 94 artigos, totalizando em 93 artigos para o filtro 2.

É importante ressaltar que, no filtro 1, muitas vezes apenas com a leitura do título, resumo e palavras-chave não foi possível identificar se o artigo atendia aos critérios de inclusão. Neste caso, manteve-se o artigo na lista e submeteu o mesmo ao filtro 2, onde foi realizada a leitura da introdução e conclusão e, posteriormente, aplicado novamente a exclusão por meio dos critérios de inclusão. O filtro 2 resultou na exclusão de 75 artigos, totalizando em 23 artigos para o último filtro.

Assim, de acordo com os critérios estabelecidos na Etapa 6 (critérios de qualificação) para avaliar a importância dos artigos (fator de impacto e o extrato de qualificação Qualis) foi realizada uma análise criteriosa os artigos aplicando o filtro 3, leitura completa dos artigos. No último filtro foram excluídos 13 artigos, obtendo-se assim um acervo de 10 artigos para a pesquisa (repositório de artigos).

Documentação: é o momento de catalogar os artigos encontrados, quantidade de artigos encontrados por periódicos. Essa etapa compreende o seguinte passo: repositório de artigos (catalogar os artigos). No Quadro 4 apresenta-se a catalogação dos artigos selecionados na RBS. O repositório de artigos (artigos catalogados) compreende ao passo 7 na Figura 13. Os dados da Fase 2 são importantes para refinar as buscas e foram úteis para argumentação teórica e embasamento do referencial teórico apresentado sobre o assunto pesquisado.

A Fase 3 (Saída) contempla quatro etapas, são elas: alertas; cadastro e arquivo; síntese resultados; e modelos teóricos. Essas etapas foram detalhadas a seguir.

Quadro 5 - Resumo geral da quantidade de artigos da RBS

Periódicos	Classificação		Área	Número de Artigos
	JCR	Qualis		
Renewable & Sustainable Energy Reviews	8,050	A1	Engenharias III	1
Applied Energy	7,182	A1	Engenharias III	1
Journal Of Cleaner Production	5,715	A1	Engenharias III	2
Fuel	4,601	A1	Engenharias III	1
Energy	4,520	A1	Engenharias III	1
Renewable Energy	4,357	A2	Engenharias III	1
Fuel Processing Technology	3,752	A1	Engenharias III	2
Biomass & Bioenergy	3,219	A2	Engenharias III	1

Fonte: Autores (2018)

Cadastro e arquivo: os 10 artigos selecionados foram incluídos no repositório de artigos, ou seja, foram organizados e armazenados no software EndNote X7. O software EndNote X7 possibilitou ao autor desta pesquisa organizar os artigos em grupos de acordo com as bases de dados pesquisadas, excluindo os duplicados, separando os alinhados com o tema, os mais citados e os disponíveis.

Síntese resultados: para realização desta etapa, utilizou-se o Microsoft Excel 2013 para elaborar planilhas com sínteses dos livros citados nas fontes primárias, e dos artigos catalogados no repositório de artigos (documentação). Nessas planilhas, buscou-se elaborar anotações, textos, tabelas, esquemas, fluxogramas e representações de cada assunto estudado o que se assumiu, num segundo momento, o formato de um capítulo, o capítulo de referencial teórico presente nesta pesquisa. Vale destacar que as sínteses dos resultados foram construídas durante todo o processo de execução da RBS.