

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA**

BRUNO SILVA CAMARGO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E
TÉRMICAS DOS *PELLETS* DE MADEIRA**

Itapeva – SP

2013

BRUNO SILVA CAMARGO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E
TÉRMICAS DOS *PELLETS* DE MADEIRA**

Trabalho de Graduação apresentado no Câmpus Experimental de Itapeva – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como requisito para conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira.

Orientador: Prof. Dr. José Cláudio Caraschi

Itapeva – SP

2013

Camargo, Bruno Silva
C172a Avaliação das propriedades físicas, químicas e térmicas dos
pellets de madeira / Bruno Silva Camargo. – – Itapeva, SP, 2013
49 f.: il.

Trabalho de Graduação do Curso Engenharia Industrial
Madeireira apresentado à Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, Câmpus Experimental de Itapeva, 2013

Orientador: José Cláudio Caraschi

Banca examinadora: Antonio Francisco Savi, Dorival Pinheiro
Garcia

Bibliografia

1. Biomassa vegetal. 2. Energia- Fontes alternativas. 3.
Bicombustíveis. I. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita
Filho”, Campus Experimental de Itapeva. II. Título.

CDD 662.65

*Ao grande Deus que é maravilhoso em minha vida
mesmo sendo fraco e falho, Ele tem me guiado com
suas fortes mãos de poder, dando sabedoria e forças
para continuar caminhando.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao soberano Deus, que esta acima de tudo e de todos, e que proporcionou essa rara oportunidade em minha vida, também por Sua imensa bondade e misericórdia para comigo e meus familiares, sempre me fortalecendo em todos os momentos de minha vida, sendo meu refúgio e fortaleza durante a minha jornada, sempre capacitando e dando sabedoria, sou grato por ter me dado muitas lutas, para que se Ele permitir um dia eu possa contemplar as vitórias.

Aos meus pais Alipio e Lúcia, no qual sempre estiveram ao meu lado me apoiando, dando força para que eu pudesse sempre caminhar em frente, mesmo em meio a obstáculos, que foram muitos para chegar até esse momento, pela educação e carinho que me deram no qual foi de grande importância para minha formação, pelos conselhos e ensinamentos, pela paciência e amor que me deram, e por serem sempre meus heróis e exemplos de vida.

Ao meu irmão Felipe Camargo, que sempre acreditou e se espelhou muitas vezes em mim, o que me fazia sentir útil e continuar adiante, além de sempre estar ao meu lado, dando apoio, ajudando nos estudos e momentos de grande importância em nossas vidas contemplados juntos.

A minha esposa Sâmique Camargo que me ensinou a acreditar no meu potencial, que me fez despertar não só através de sentimentos, mas em estudos também, foi quem sempre me ajudou nos estudos, em épocas de provas, sendo sempre minha companheira, com muito amor, carinho, paciência, transmitindo paz e tranquilidade para minha vida, me aturando mesmo na correria do dia a dia, que nos deixa estressado, nervoso as vezes com algumas circunstâncias, e la estava ela para me apoiar e me dar forças.

A minha sogra Claudinéia, meu sogro Nilton, e minhas cunhas Camilla, Cristiane e Sâmella, que me apoiaram e me ajudaram, com grande atenção e carinho.

Ao professor Dr. José Cláudio Caraschi pelo tempo, paciência e dedicação, sempre ajudando nas muitas dúvidas e dificuldades ao longo do curso e deste trabalho.

A professora MSc. Juliana Esteves Fernades Cieslinski pela colaboração, atenção e indicações para realização do trabalho.

A todos os professores que de alguma forma me ajudaram e contribuíram para que fosse possível chegar até este momento.

A todos os colaboradores do câmpus da UNESP de Itapeva por toda ajuda propiciada nestes anos, principalmente aos técnicos Anderson, Franco, Juscelino e Tiago que me auxiliaram bastante para elaboração deste trabalho.

“Podemos escolher o que semear, mas somos obrigados a colher aquilo que plantamos”.

(Provérbio chinês)

RESUMO

Atráves do grande crescimento da matriz energética mundial, o aumento pela busca de novas fontes de energia torna-se contínuo e constante. Devido a escassez de atuais fontes não renováveis e altamente poluentes, como o petróleo e o carvão mineral, a biomassa florestal e seus produtos derivados como os *pellets* e briquetes de madeira por exemplo, surgem como uma forma de energia alternativa, já que possuem grande potencial, além de suprir as necessidades de energia ainda proporciona menor impacto ambiental. Os *pellets* de madeira geralmente são produzidos a partir de materiais lignocelulósicos, como por exemplo, resíduos do setor madeireiro, agroindustrial e florestal. O objetivo deste trabalho foi comparar diferentes tipos de *pellets* quanto as propriedades químicas (pH, condutividade iônica, poder calorífico, carbono fixo, materiais voláteis e cinzas), propriedades físicas (comprimento, diâmetro, densidade a granel, teor de umidade e durabilidade mecânica) e da combustão (emissões de gases CO, CO₂, SO_x e NO_x) entre si e segundo as Padrões Internacionais de Qualidade para *pellets*. Foram analisados três tipos de *pellets* (de *Pinus ssp.* com 15% de teor de finos de carvão vegetal (P1), maravalhas de *Pinus ssp.*(P2) e maravalhas de *Eucalyptus ssp.*(P3)). As análises de caracterização foram realizadas conforme as normas padrões. Para análise dos gases foi utilizado um analisador eletroquímico de gases, para verificar a quantidade de gases presentes na combustão dos *pellets*. As análises realizadas indicaram que os *pellets* P1 tiveram maior valor de PCS_{0%} com 20,52MJ/kg. Os *pellets* P1 se comparados com os demais apresentam maior poder energético. Com relação ao teor de umidade, os resultados mostraram que todos os *pellets* atingiram esse parâmetro de qualidade. Quanto a durabilidade mecânica todos os *pellets* estão acima dos valores mínimos exigidos pela norma. A densidade a granel dos biocombustíveis também atingiram esse parâmetro de qualidade, pois todos mostraram valores superiores a 600 kg/m³ que é o mínimo exigido pelas normas (Alemã, Austriaca, Suéca e America). Com relação às emissões gasosas de CO, todos os *pellets* apresentaram valores acima dos limites estipulados pela norma do CONAMA, já para as emissões de NO_x todos os biocombustíveis apresentaram valores abaixo dos 650 mg/Nm³ com referência de 8% de O₂.

Palavras chaves: *Pellets*. Biomassa Vegetal. Poder Calorífico.

ABSTRACT

Through the tremendous growth of global energy, the increase in the search for new sources of energy becomes continuous and constant. Due to the current shortage of non-renewable and highly polluting, such as oil and coal, forest biomass and its derivatives, the use of wood pellets emerges as a form of alternative energy, as they have great potential, besides supplying energy needs still provides less environmental impact. The wood pellets are usually produced from lignocellulosic materials, agribusiness and forestry (which may be coming in the form of waste), the materials are refined and dried and then be compressed and compressed at high pressure. The objective of this study was to compare the main chemical characteristics (fixed carbon, volatile, ash, extractives, lignin and holocellulose), physical characteristics (length, diameter, bulk density, moisture content and mechanical durability), thermal characteristics (calorific value), pH and conductivity and thermal emissions gases (CO, CO₂, SO_x and NO_x). We analyzed three types of pellets (one Eucalyptus ssp., One pine ssp. Pine and ssp. Containing 15% charcoal), the analyzes were performed according to standard norms. For gas analysis was used electrochemical gas analyzer to check the amount of gases in the combustion of pellets. The analyzes indicated that the pellets had higher P1 value PCS_{0%} to 20.52 MJ / kg. The pellets P1 compared with the other feature most energetic power. With respect to the moisture content, the results showed that all the pellets reached this quality parameter. As for the mechanical durability all pellets are above the minimum required by the standard. The bulk density of biofuels also achieved this quality parameter, since all showed values exceeding 600 kg / m³ which is the minimum required by the rules (German, Austrian, Swedish and America). Regarding the gaseous emissions of CO, all pellets had values above the limits stipulated by the standard of CONAMA, as for NO_x emissions all biofuels had values below 650 mg / Nm³ with reference to 8% O₂.

Key words: Pellets. Plant Biomass. Calorific Value.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: <i>Pellets</i> de madeira.....	8
Figura 2: Processo de fabricação dos pellets.	9
Figura 3: <i>Pellets</i> analisados.	17
Figura 4: (a) Mufla e (b) Cadinhos com as cinzas.....	19
Figura 5: Calorímetro IKA WERKE, modelo C 500 Control.....	21
Figura 6: (a) Conversor de rotação e (b) Equipamento e caixa (suporte).	22
Figura 7: (a) pHmêtro e (b) Medidor de condutividade iônica.....	23
Figura 8: Analisador de gás UNIGAS 3000 MK III.....	23
Figura 9: (a) Abastecedor do queimador (b) Queimador.....	25
Figura 10: (a), (b) e (c), emissões de NO _x ds <i>pellets</i> . Erro! Indicador não definido.	
Figura 11: (a), (b) e (c), emissões de CO dos <i>pellets</i> . Erro! Indicador não definido.	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Normas de padronização austríaca e sueca para os <i>pellets</i>	12
Tabela 2: Normas de padronização alemã e americana para os <i>pellets</i>	13
Tabela 3: Teor de cinzas de combustíveis.....	15
Tabela 4: Características do analisador portátil UNIGAS 3000 MKIII.....	24
Tabela 5: Propriedades físicas dos <i>pellets</i>	26
Tabela 6: Análise química imediata dos <i>pellets</i>	27
Tabela 7: pH e condutividade iônica dos <i>pellets</i>	27
Tabela 8: Determinação da densidade a granel dos <i>pellets</i>	28
Tabela 9: Valores energéticos dos <i>pellets</i>	28
Tabela 10: Durabilidade mecânica dos <i>pellets</i> de madeira.	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
cal	Calorias
TCz	Cinzas
MV	Materiais Voláteis
CF	Carbono Fixo
J	Joules
PCS	Poder Calorífico Superior
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCU	Poder Calorífico Útil
NO _x	Óxidos de nitrogênio
SO _x	Óxidos de enxofre
TU	Teor de umidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Biomassa Vegetal	4
3.2 Disponibilidade da biomassa para geração de produtos compactados	5
3.3 Propriedades e fatores da biomassa	6
3.4 <i>Pellets</i>	7
3.4.1 Produção dos <i>pellets</i> de madeira.....	8
3.4.2 Normas e padrões de qualidade para os <i>pellets</i>	11
3.5 Teor de umidade e poder calorífico	14
3.6 Densidade e volume da biomassa florestal	14
3.7 Teor de cinzas da biomassa	15
3.8 Emissões dos poluentes na combustão da biomassa.....	15
4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	17
4.1 Material	17
4.2 Métodos.....	17
4.2.1 Teor de umidade dos <i>pellets</i>	17
4.2.2 Determinação da análise imediata	18
4.2.2.1 Determinação do teor de cinzas	18
4.2.2.2 Determinação do teor de material volátil	19
4.2.2.3 Determinação do teor de carbono fixo	19
4.2.3 Determinação da Densidade a granel.....	20
4.2.4 Determinação das dimensões dos <i>pellets</i>	20
4.2.5 Determinação do poder calorífico superior, inferior e útil.....	20
4.2.6 Determinação da durabilidade mecânica dos <i>pellets</i>	22

4.2.7 Determinação da condutividade iônica e ph.....	23
4.2.8 Análise de gás da combustão dos <i>pellets</i>	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1 Caracterização física dos <i>pellets</i>	26
5.2 Análise imediata dos <i>pellets</i>	27
5.3 Condutividade Iônica e pH.....	27
5.4 Caracterização térmica dos <i>pellets</i>	28
5.4 Durabilidade mecânica dos <i>pellets</i>	29
5.5 Análise das emissões gasosas na combustão dos <i>pellets</i>	30
6. CONCLUSÕES.....	31
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
Anexos.....	33

1. INTRODUÇÃO

Baseando-se na matriz energética mundial onde as reservas em declínio e preços flutuantes de combustíveis fósseis fez com que aumentasse a busca por alternativas para substituição ou complementação dos derivados do petróleo e carvão mineral, como fonte de combustível principal. Além de questões ambientais como emissões de dióxido de carbono (CO₂), e econômicas, o petróleo vem sendo substituído por outras formas de energia.

Com o avanço das pesquisas em relação a biocombustíveis houve a diminuição dos descartes de resíduos florestais e agroindustriais, já que estes são utilizados como matéria-prima para geração de produtos energéticos, os chamados co-produtos. Para a geração de energia tem-se usado resíduos da biomassa, pois são considerados como ótimos co-produtos, tanto em forma de biodiesel, biogás, bioóleo ou para geração de produtos compactados, como *pellets* e briquetes (TOLMASQUIM, 2011).

Os produtos são compactados através da compressão dos resíduos da biomassa, sobre alta pressão, gerando desta forma um material sólido com elevada densidade, assim os resíduos são utilizados e aproveitados para geração de energia térmica renovável.

A procura por energia limpa e renovável torna os *pellets* de madeira um biocombustível promissor. Os *pellets* possuem formato de pequenas pelotas cilíndricas de madeira, compactadas e densas que são produzidas com baixo teor de umidade (geralmente menor que 10%), permitindo maior eficiência na combustão. Sua geometria regular permite tanto a alimentação automática num sistema industrial quanto a alimentação manual, nos aquecedores residenciais, porque é um produto de origem natural (madeira), já que não necessita de aditivos e, em sua maioria, não contém elementos tóxicos na sua composição. Sua principal aplicação é no aquecimento comercial e residencial de ambientes, mas também podem ser utilizados como combustível para a geração de energia elétrica em plantas industriais ou, até mesmo, em usinas termoelétricas. Couto (2014) cita que atualmente, a busca por fontes renováveis de energia é uma tendência global que tem se fortalecido muito mais por questões ambientais do que econômicas.

Nos últimos anos o mercado americano (EUA e Canadá) de *pellets* atende principalmente a exportação para os países europeus, isso é devido ao elevado consumo em diversas aplicações. No entanto, estudos mostram o surgimento de um novo cenário para o consumo desses produtos, países como Coreia do Sul, Japão e China podem aumentar o uso

desses produtos com intuito de diminuir as emissões de gases (CO, CO₂, NO_x, SO_x) causadas pelo efeito estufa.

2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo caracterizar e comparar os *pellets* produzidos com diferentes composições e procedência, quanto as suas propriedades físicas, químicas e térmicas em relação aos padrões internacionais de qualidade, para fins energéticos.

2.1 Objetivos Específicos

- Determinar o teor de umidade dos *pellets*;
- Avaliar as análises imediatas dos materiais, conforme a determinação dos teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas;
- Determinar o poder calorífico superior e inferior dos *pellets*;
- Determinar a durabilidade mecânica dos biocombustíveis.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Biomassa vegetal

Visando a diminuição das emissões de CO₂ na atmosfera e na eliminação de desperdícios de subprodutos de indústrias madeireiras e agroindustriais, a biomassa vegetal surge como uma importante fonte de energia.

Biomassa é todo recurso renovável proveniente de matéria orgânica de origem vegetal ou animal, que pode ser utilizado para produção de energia. As formas vegetais como a lenha, casca de arroz, casca de coco, bagaço de cana de açúcar, palha de milho, resíduos de indústrias madeireiras e do setor de papel e celulose entre outros materiais lignocelulósicos, estes materiais liberam emissões de gases do efeito estufa, porém são considerados como praticamente nulas suas emissões, pois as plantas ao realizarem o processo de fotossíntese absorvem o CO₂ liberado através do processo de combustão para geração de energia provindo desses materiais, com isso, o balanço geral de emissões é considerado como neutro.

Se comparada com os demais combustíveis fósseis, a biomassa apresenta algumas vantagens, tais como:

- Possui baixo teor de enxofre e hidrogênio, gerando então emissões bem mais baixas de NO_x e SO_x;
- Teor de voláteis dos combustíveis lignocelulósicos que variam geralmente entre 80 a 90%, é pelo menos o dobro do carvão. Já com relação ao teor de cinzas é muito baixo em torno de aproximadamente 1% na maioria das amostras de madeira;
- A utilização de combustíveis gerados a partir de resíduos de madeira entre outros materiais florestais e agroindustriais, o que torna uma fonte de energia mais barata e renovável;
- Menor corrosão dos equipamentos (caldeiras, fornos, etc.);
- Emissões não contribuem para o efeito estufa.

Apresenta também desvantagens como:

- Menor poder calorífico (devido a umidade).

Segundo Lima (1998), para utilizar os resíduos da biomassa vegetal como fonte de energia aproveitando-se de todas as suas vantagens, precisa-se minimizar os inconvenientes e as limitações que este biocombustível apresenta, tais como: baixa densidade, transporte oneroso, heterogeneidade, umidade variável e baixo poder calorífico.

Atualmente a biomassa vem sendo uma das principais fonte de energia, fornecendo cerca de 14% das necessidades de energia mundial, o que para alguns países industrializados representa de 9 a 14% do total das fontes de energia, já nos países em desenvolvimento vem crescendo de 35 a 40%, chegando a muitos deles a 90%, sendo em grande parte não comercial.

3.2 Disponibilidade da biomassa para geração de produtos compactados

A matéria-prima geralmente utilizadas na produção de combustíveis a partir da biomassa e para geração de energia, provem de atividades madeireiras, agrícolas ou agroindustriais.

De acordo com FAPESP (2010), os tipos de biomassa mais utilizados para geração de energia térmica no Brasil são: a madeira (lenha) e seus resíduos e o bagaço de cana de açúcar.

Devido à grande produção agrícola no Brasil, são geradas elevadas quantidades de resíduos com potencial energético.

Segundo Feitosa (2008), a madeira é a responsável pela maior porcentagem dos resíduos gerados pelas atividades madeireiras, levando em consideração também cascas e aparas, o que representa cerca de 71% de todos os descartes de indústrias de madeira. A serragem é responsável por aproximadamente 22%, e a maravalha 7% dos resíduos de madeira.

Em relação ao processo de beneficiamento dos produtos agrícolas, estes podem gerar cerca de 80% de resíduos com elevado potencial de combustão (COUTO et al., 2004a).

O responsável pela maioria das gerações de resíduos é o setor moveleiro, através dos processos de beneficiamento da madeira em geral.

Através da madeira e seus derivados é possível gerar energia, e o Brasil tem grande potencial para este setor, pois possui grande área de reflorestamento. De acordo com Silva (2009) o Brasil é capaz de gerar benefícios econômicos, ambientais e sociais com a implantação de florestas energéticas.

Devido a fatores como uniformidade no crescimento, alta produtividade, facilidade de adaptação em diferentes ambientes e curto tempo de crescimento, portanto as espécies

vegetais mais utilizadas para gerar energia são as coníferas e uma folhosa, o eucalipto (PEREIRA et al., 2010; NOGUEIRA; LORA, 2003). As espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* são responsáveis pelas maiores quantidades de resíduos industriais, que por sua vez são usados na produção de energia. Isso se dá por suas características morfológicas (como: células, vasos, fibras e componentes de formação).

As áreas ocupadas por plantios florestais no Brasil no ano de 2011 as áreas ocupadas resultaram em 6.515.844 ha, sendo 74,8 e 25,2%, dos gêneros de *Eucalyptus* e *Pinus*, respectivamente. As áreas com povoamentos do gênero *Pinus* estão concentradas principalmente na região sul do país, representando 83% de um total de 1.641.892 ha plantados no Brasil (ABRAF, 2012).

3.3 Propriedades e fatores que influenciam as variáveis da biomassa para a produção energética

Segundo Brand (2010), com relação à produção energética, as análises em torno da composição química da biomassa vegetal são fundamentais e de grande importância, pois os resultados qualificam a biomassa com relação à disponibilidade de seu potencial de energia.

A análise imediata se enquadra dentro dos processos de análise química, e esta relacionada com a avaliação da quantidade de carbono fixo, materiais voláteis, cinzas e umidade contidas na biomassa para fins energéticos (NOGUEIRA; LORA, 2003).

A melhor matéria prima para o processo de compactação para geração de energia, é a que consiste de materiais lignocelulósicos. Os materiais que tem maior teor de lignina favorecem a combustão, já que auxilia na formação de um material mais compacto, com maiores ligações entre as partículas da biomassa.

O uso de serragem através da forma de briquetes ou *pellets*, possuem grandes vantagens, pois é constituído a partir de um gerenciamento sustentável destes resíduos, gerando assim energia em volumes compactados através de um processo natural renovável, e também não possui o efeito poluidor se comparado com outras fontes de energia fósseis.

A densidade, o poder calorífico, o teor de umidade e o teor de cinzas, são alguns aspectos considerados fundamentais para aumentar o potencial de produção da biomassa na forma de compactação, para fins energéticos (BRAND, 2010).

3.4 *Pellets*

Devido à escassez de atuais fontes de energia não renováveis e altamente poluentes, como o petróleo e carvão mineral, o uso de *pellets* surge como uma forma de energia alternativa, já que possuem grande potencial, além de suprir as necessidades de energia ainda proporciona menor impacto ambiental. A procura por energia limpa e renovável torna os *pellets* de madeira ou de outros materiais lignocelulósicos um biocombustível promissor, além de promover o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos. Os *pellets* são densos e podem ser produzidos com baixo índice de umidade, pois assim permitira uma elevada eficiência na sua combustão. Com relação a sua geometria, permite uma alimentação manual, como por exemplo em aquecedores residenciais, ou também automática em um sistema industrial.

Com isto, surge um novo cenário energético mundial com a biomassa vegetal em constante fortalecimento, já que, dentre fontes de energia renováveis, os *pellets* se destacam por possuírem preços cada vez mais competitivo e causarem menor impacto ambiental.

Quanto a questões econômica, o sistema de combustão com *pellets* proporciona uma importante e grande economia, podendo variar entre 30% a 60%, que depende do combustível utilizado, por ser uma fonte de calor de alto desempenho, com baixo valor e por necessitar de menos mão de obra no processo. Redução de emissão de fumaça Os materiais e a qualidade dos produtos desenvolvidos para a combustão dos *pellets* têm capacidade de redução significativa das emissões gasosas atmosféricas (poluentes que podem causar doenças ao ser humano), principalmente se comparado com outros combustíveis à base de biomassa. Devido uma das fontes de matéria-prima para a fabricação dos *pellets* serem os resíduos provenientes da limpeza florestal (resíduos florestais), existe através do aproveitamento desses materiais uma contribuição significativa para a redução do risco de incêndios em florestas.

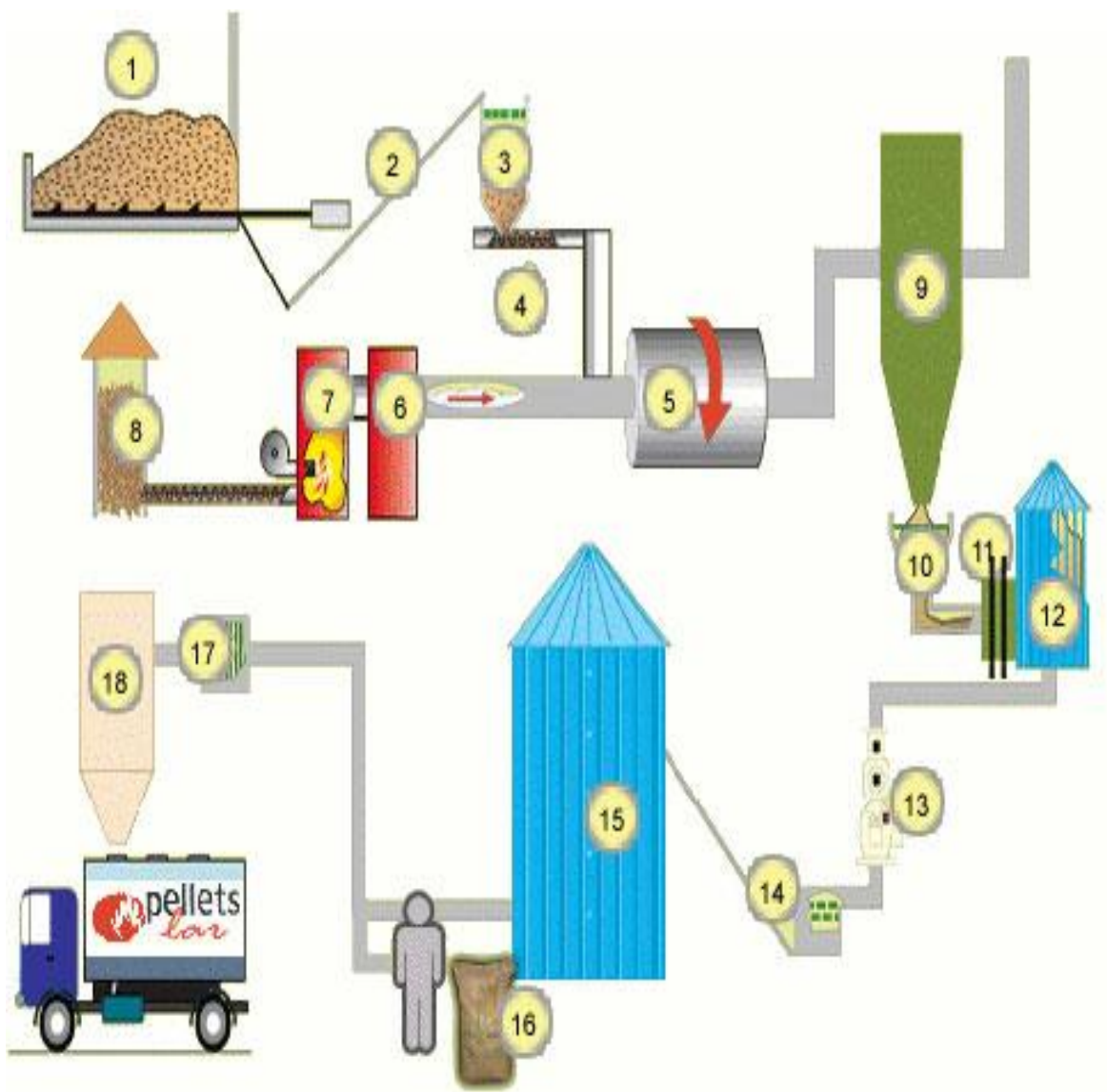
Figura 1: *Pellets* de madeira.



3.4.1 Produção dos *pellets* de madeira

Geralmente os *pellets* de madeira podem ser produzidos a partir de resíduos gerados por indústrias madeireiras, tais como: cavacos, serragem, maravalhas, galhos, resíduos agroindustriais entre outros materiais lignocelulósicos. O processo de produção de *pellets* na indústria é realizado a partir das seguintes etapas, apresentadas na Figura 2, e que serão discutidas a seguir.

Figura 2: Processo de fabricação dos pellets.



Etapa 1: É desde a chegada da serragem ou resíduos florestais e agroindustriais (abastecimento). Este é o processo de recepção da matéria-prima que será deixada no pátio da indústria. Porém se for serragem, vai direto para o estoque, no caso de toras seguem direto para o pátio para ser picado.

Etapa 2: O material é levado a partir de um transportador de correia, que será levado para um silo.

Etapa 3: Em seguida será realizada a limpeza primária da matéria-prima.

A serragem passa pelo silo para retirar as impurezas ou objetos estranhos que possam estar misturados junto à matéria prima.

Etapa 4: Regulador de quantidade de matéria-prima.

Esse equipamento irá regular a quantidade de matéria-prima que deve ser transportada para o secador.

Etapa 5: Tambor de secagem da matéria-prima.

O secador de tambor retira a umidade da matéria-prima, através de movimentos circulares e ação do ar quente deixando a umidade geralmente de 10 a 12%.

Etapa 6: Recuperador de cinzas da queima do combustível.

A madeira deixa pequena quantidade de cinzas no final da combustão e elas são removidas do processo neste local.

Etapa 7: Gerador de ar quente para o processo de secagem.

Estufa de geração do ar quente através da combustão de resíduos da madeira.

Etapa 8: Silo de serragem para combustível – Queima direta.

Os resíduos e partículas com geometrias irregulares que não são utilizados para a fabricação dos pellets são queimados para a geração do calor.

Etapa 9: Ciclone Separador por vapor.

É onde ocorre o ajuste da umidade deixando todas as partículas de madeira com a mesma umidade. Pois o ar quente é forçado a passar pelas partículas removendo a umidade.

Etapa 10: Limpeza secundária da matéria-prima, com a finalidade de garantir uma melhor qualidade dos *pellets*.

Processo de limpeza secundária utilizada para garantir que só existe madeira no processo.

Etapa 11: Picador e triturador de partículas finas, para homogeneizar o material.

Durante esta fase a matéria-prima é triturada para o seu obter seu tamanho final e ser uniformizada.

Etapa 12: Estoque de serragem homogênea – Pronto para densificação.

Estoque de matéria prima com umidade e tamanho desejados para a compactação.

Etapa 13: Prensas granuladoras, neste processo irão ocorrer à prensagem do material.

A matéria-prima é então levada a peletizadora e em condições de alta temperatura e pressão são compactadas e cortadas em tamanhos pré-definidos.

Etapa 14: Resfriamento e acomodação dos materiais formadores dos pellets.

Esta fase de acomodação é muito importante porque os pellets saem com temperatura em torno de 95°C e deve chegar lentamente à temperatura ambiente para não influenciar nas propriedades mecânicas do produto.

Etapa 15: Silo de *pellets* pronto.

Então os produtos são armazenados, finalizados e prontos para venda.

Etapa 16: Ensacamento por aspirador e gravidade.

O produto é colocado em sacos de vários tamanhos para ser distribuído nos pontos de vendas.

Etapa 17: Limpeza do silo.

Local para efetuar a limpeza da esteira de transporte e esvaziar o silo para limpeza.

Etapa 18: Silo de carga para caminhões por aspiração.

Este silo é utilizado para carregar caminhões tanques que transportarão os pellets.

Etapa 19: E por fim a entrega e venda dos pellets ao consumidor final.

Geralmente o diâmetro dos *pellets* varia de 6 a 8 mm, e seu comprimento esta compreendido entre 5 a 30 mm. Os considerados de boa qualidade tem uma densidade que varia em torno de 600 a 750 kg/m³. O uso de resíduos florestais e também dos desperdícios provenientes da indústria da madeira permite a obtenção da matéria-prima com custo mais acessível.

3.4.2 Normas e padrões de qualidade para os *pellets*

Quando a expansão do mercado no setor doméstico ocorreu, tornou-se necessário garantir a segurança operacional e baixas emissões dos aquecedores residenciais que utilizavam *pellets* e os padrões surgiram para garantir que estas exigências fossem cumpridas (VIAK, 2000).

No Brasil não há normas para padronização e caracterização dos *pellets* de madeira. Existem algumas normas brasileiras específicas para briquetes e carvão vegetal que são adaptadas para a utilização com eles. Por esse motivo, as avaliações foram feitas com base em normas européias e ou americanas.

A normalização é utilizada sempre como um meio para se alcançar a qualidade exigida pelo cliente, mantendo ou melhorando a qualidade dos produtos oferecidos. No Brasil, ainda não existe nenhuma norma para a padronização de combustíveis sólidos como os *pellets*.

O padrão sueco (Tabela 1) para os *pellets* de madeira foi estabelecido em 1999 (norma SS187120), classificando-os em três grupos de acordo com seus padrões de qualidade.

A legislação austríaca publicada em 2000 (ONORM M7135) reforça padrões de emissão para estufas residenciais e, um sistema de certificação dos *pellets*, assegura altos padrões de qualidade do combustível, exigindo o uso somente de matéria-prima natural. Além disso, outras normas garantem a qualidade de toda a cadeia produtiva dos combustíveis como

a norma ONORM M7136, que assegura o controle da qualidade durante o transporte, o armazenamento e a distribuição, e a ONORM M7137, que lista critérios de qualidade para os locais onde os *pellets* serão armazenados indicando temperatura ideal e umidade relativa do ar, por exemplo.

Tabela 1: Normas de padronização austríaca e sueca para os *pellets*.

Especificação	Unid.	Áustria		Suécia		
		ÖNORM M7135		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
		madeira	casca			
Diâmetro [Ø]	mm	4 a 20	20 a 120		4 ≤ Ø ≤ 10	
Comprimento	mm	máx. 100	máx. 400	4. Ø	5. Ø	6. Ø
Densidade a granel	kg/m ³	> 600		≥ 600	≥ 500	
Finos < 3mm	%	máx. 1		≤ 0,8	≤ 1,5	
Densidade Real	kg/m ³	≥ 1,0				
Teor de umidade	%	≤ 12	≤ 18	≤ 10		≤ 12
Teor de cinzas	%	≤ 0,50	≤ 6,0	≤ 0,7		≤ 1,5
PCI	MJ/kg	≥ 18		16,9		15,1
Enxofre	%	≤ 0,04	≤ 0,08	≤ 0,08		Indicar
Cloro	%	≤ 0,02	≤ 0,04	≤ 0,03		Indicar
Aditivos	%	máx. 2 (natural)		Indicar na embalagem		
Durabilidade	%	≥ 95,0		≥ 95,0		

As normas de qualidade dos *pellets* na Alemanha (DIN 51731) (Tabela 2) são muito rigorosas quanto à concentração de certos elementos químico e estabelecem valores máximos para essas emissões. Ela divide-os em classes de diâmetros e, desde 2002, criou um selo de qualidade para as empresas o “DIN Plus” que estabelece padrões de conformidade de todo o processo produtivo, bem como de transporte e armazenamento. Para receber este selo (DIN Plus), a empresa deve ser vistoriada constantemente e apresentar as análises realizadas no produto. A norma proíbe qualquer aditivo ou substância artificial como plásticos, adesivos, tintas ou preservantes de madeira.

Por outro lado, permite o uso de material para auxiliar a pressão, facilitar a compactação da madeira e diminuir o desgaste das ferramentas, desde que sejam naturais como os óleos vegetais.

Os Estados Unidos seguem normas não oficiais recomendadas pelo PFI (Pellets Fuel Institute) apresentado na Tabela 2, que determina padrões específicos para os combustíveis densificados desde 1995. Os próprios produtores têm que garantir a qualidade informando as principais características numa etiqueta junto com o produto.

Tabela 2: Normas de padronização alemã e americana para os *pellets*.

Especificação	Unid.	Alemanha	EUA			
		DIN 51731 HP1 ²	Recomendações PFI ¹			
			SP ³	P ⁴	S ⁵	U ⁶
Diâmetro [Ø]	mm	$4 \leq \text{Ø} \leq 10$	6,35 a 7,25			
Comprimento	mm	$\leq 5 \cdot \text{Ø}$	$\leq 25,4$			
Densidade a granel	kg/m ³	> 600	640 a 736	608 a 736		
Finos < 3mm	%	máx. 1	$\leq 0,50$			
Teor de umidade	%	< 12	≤ 6	≤ 8	≤ 10	
Teor de cinzas	%	< 1,5	< 1	< 3		
PCI	MJ/kg	17,5 a 19,5	Especificar o teor			
Durabilidade	%	$\geq 95,0$	$\geq 97,5$	$\geq 95,0$		

¹ PFI=Pellets Fuel Institute; ² HP1=Holz *pellets*; ³ SP=Super Premium,

⁴ P=Premium; ⁵ S=Standard; ⁶ U=Utilitário

A União Européia através da CEN (Comitê Europeu de Normalização) estabeleceu, desde 1995, todas as formas e propriedades relevantes dos combustíveis sólidos que inclui as informações normativas para as análises, as formas, as classes, as propriedades, as características físicas e químicas que devem ser fornecidas. A norma CEN/TS 14961 de 2005 regulamenta os padrões de qualidade exigidos para os *pellets* que são semelhantes à norma alemã.

No Reino Unido não há uma norma oficial publicada para o estabelecimento de padrões de qualidade para os *pellets*. Os produtores seguem um código de boas práticas que especifica dois tipos de combustível: Premium e Standard. O primeiro, é usado no aquecimento residencial, possui baixo teor de cinzas, já o segundo, é indicado para uso comercial e industrial. Seguir o código é voluntário, mas todos os produtores são estimulados a cumprir com as recomendações que tem como base o Comitê Europeu de Normalização.

De acordo com Hahn (2004) há, basicamente, dois critérios para se julgar a qualidade dos *pellets*: a composição química e as características físicas. A seguir, alguns parâmetros comuns utilizados para esta previsão, bem como os efeitos na combustão, transporte e logística, de acordo com esta classificação do autor:

3.5 Teor de umidade e poder calorífico

O teor de umidade e a composição química, principalmente a lignina e os extrativos da madeira, influenciam no poder calorífico da biomassa. Quanto maior o teor de extrativos e de lignina, maior será o poder calorífico superior, sendo assim as coníferas que geralmente apresentam maior teor de extrativos e lignina, tendem a possuírem maior poder calorífico que as folhosas. Quanto ao teor de umidade presente na madeira será vaporizada durante a combustão, e para isso é necessário uma parcela da energia liberada na combustão. Por isso quanto menor o teor de umidade da madeira, maior a energia disponível (JARA, 1989), ou seja maior o poder calorífico útil. Para obter a massa verdadeira da biomassa é necessário calcular o seu teor de umidade.

O poder calorífico superior (PCS) pode ser compreendido como a mensuração de um nível mais elevado de calor quando comparado ao poder calorífico inferior (PCI). O poder calorífico superior também pode ser determinado quando ocorre à combustão a volume constante. Neste processo a água formada irá se condensar de forma que não ocorra perda de calor latente do vapor d'água (PROTÁSIO et al., 2011; REGUEIRA et al., 2002).

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 usado.

O poder calorífico superior e o poder calorífico inferior são calculados sem umidade, pois a água presente nos biocombustíveis evapora, em um processo que consome parte do calor gerado, produzindo o poder calorífico inferior na base úmida ou poder calorífico líquido (BRAND, 2010).

3.6 Densidade e volume da biomassa florestal

A madeira é medida industrialmente através de seu volume (m^3), já que em algumas utilidades como na construção civil, tem-se dimensões padronizadas.

A densidade a granel (kg/m^3), é o método mais utilizado para determinar a densidade de materiais não uniformes e com geometrias irregulares e de diversos formatos, pois considera o volume total da amostra o que inclui o volume do sólido, os espaços vazios entre as partículas e sua porosidade.

O estado físico em que a madeira se encontra é de grande importância para a determinação da densidade que esta sendo medida, além de fatores como dimensões e espécies de madeira.

Os *pellets* e briquetes são algumas formas de serem usadas para a densificação da biomassa, com objetivo de reduzir os custos com o transporte, minimizar a área de estocagem e facilitar o manuseio dos biocombustíveis.

3.7 Teor de cinzas da biomassa

O teor de cinzas é a porcentagem de componentes minerais contidos na biomassa vegetal. As cinzas são compostos inorgânicos, formados nos seguintes elementos: Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e SiO₂, durante a combustão (BRAND, 2007).

Nos processos industriais as cinzas são consideradas componentes indesejáveis, principalmente no uso doméstico porque quanto maior for o teor de cinzas do material, maior será a quantidade de resíduos a ser removida no final da queima, e menor o poder calorífico do material combustível.

Quanto ao teor de cinzas, a biomassa vegetal apresenta valores considerados muito baixos se comparado por exemplo, ao carvão mineral (Tabela 3).

Tabela 3: Teor de cinzas de combustíveis.

Combustível	Teor de cinzas base seca (%)
Carvão mineral	40
Carvão vegetal	4
Bagaço de Cana	1,5
Madeira seca	0,8

Fonte: Garcia (2002).

3.8 Emissões dos poluentes na combustão da biomassa

Segundo Loo e Koppejan (2008), a falta do oxigênio para a reação, mistura inadequada do ar e combustível na câmara de combustão, baixas temperaturas de combustão e curto tempo de residência do combustível na câmara, são os principais fatores que influenciam na combustão incompleta da biomassa.

Para reduzir as emissões da combustão incompleta da biomassa deve se realizar uma otimização destes fatores, estes podem ser divididos em dois grupos principais, onde o primeiro encontra-se as emissões de poluentes não queimados, geralmente influenciado pelo processo e equipamento, já o segundo grupo considera as emissões inertes para cada tipo de combustível (WERTHER et al., 2000).

No primeiro grupo, estão o monóxido de carbono, hidrocarbonetos, voláteis, entre outras substâncias. O segundo grupo, a emissão de poluentes depende da composição da biomassa a ser utilizada. De acordo com Werther et al. (2000), as principais emissões são de compostos de nitrogênio (NO_x e N_2), óxidos de enxofre (SO_x) e metais pesados (Pb, Zn e Cd).

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado nos Laboratórios de Análise Instrumental e Energia da Biomassa do Câmpus de Itapeva da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP).

4.1 Material

Neste trabalho foram utilizados três tipos de *pellets* de madeira, designadas como P1 - *pellets* de *Pinus* ssp. com 15% em massa de finos de carvão vegetal, P2 - *pellets* de maravalhas de *Pinus* ssp. e P3 - *pellets* de maravalhas de *Eucalyptus* ssp.

Os *pellets* P1 foram cedidos por uma empresa do setor localizada na cidade de Itapeva-SP, já os *pellets* P2 e P3 foram cedidos por uma empresa do Estado de São Paulo, em embalagens de 20 kg (Figura 3).

Figura 3: *Pellets* analisados.



4.2 Métodos

4.2.1 Teor de umidade dos *pellets*

O teor de umidade (%TU) das amostras de *pellets* foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 9656. Em pesa-filtro previamente tarado adicionou-se 1,0000 g de

amostra, que foi levado à estufa ($105\pm 3^\circ\text{C}$) por aproximadamente 4 horas. Em seguida, transferiu-se o pesa-filtro para um dessecador até atingir massa constante.

O teor de umidade base úmida dos *pellets*, foi determinado pela seguinte expressão (Equação 1):

$$\%TU = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad [1]$$

Onde:

$\% TU$ = porcentagem do teor de umidade;

m_1 = massa de amostra úmida, em gramas;

m_2 = massa de amostra seca, em gramas.

4.2.2 Determinação da análise imediata

A análise química imediata das amostras de *pellets* foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 8112/83. Neste procedimento determinou-se o teor de cinzas (TCz), teor de materiais voláteis (MV) e carbono fixo (CF), no qual realizou-se três repetições para cada amostra.

4.2.2.1 Determinação do teor de cinzas

Para a determinação deste material inorgânico, utilizaram-se cadinhos de porcelana previamente tarados à 575°C . Foi pesado aproximadamente 2,0000 g de amostra no cadinho e levados à mufla numa temperatura de 575°C por 4 horas (Figura 4). As amostras calcinadas foram colocadas em um dessecador para resfriamento até massa constante. Para a determinação do teor de cinzas foi utilizada a Equação 02:

$$\%TCz = \frac{m_c}{m_a} \times 100 \quad [2]$$

Onde:

$\%TCz$ = porcentagem do teor de cinzas;

m_c = massa de cinzas, em gramas;

m_a = massa de amostra seca, em gramas.

Figura 4: (a) Mufla e (b) Cadinhos com as cinzas.



(a)



(b)

4.2.2.2 Determinação do teor de material volátil

Para determinação do teor de material volátil, tomou-se uma porção da amostra absolutamente seca, aproximadamente 1,0000 g, e colocou-se em um cadinho de porcelana com tampa, previamente seco e tarado. Aqueceu-se previamente a mufla a $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ e colocou-se o cadinho com material sobre a porta da mufla por 3 minutos. Em seguida tampou-se o cadinho e levou-o para o interior da mufla, fechou a porta da mufla e deixou por mais 10 minutos. Retirou-se o cadinho da mufla e esfriou-se em dessecador, por fim pesou-se. O teor de material volátil é calculado de acordo com a equação 3.

$$\%MV = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad [3]$$

onde:

$\%MV$ = teor de material volátil, em %

m_1 = massa inicial da amostra, em gramas

m_2 = massa final da amostra, em gramas

4.2.2.3 Determinação do teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo é uma medida indireta e foi calculado através da equação 4.

$$\%CF = 100 - (\%MV + \%TCz) \quad [4]$$

Onde %CF é o teor de carbono fixo, em %.

4.2.3 Determinação da densidade a granel

A densidade a granel foi determinada segundo a metodologia estabelecida pela norma ABNT NBR 6922, para carvão vegetal. Em função da quantidade limitada de pellets de madeira e da homogeneidade granulométrica dos mesmos, promoveu-se uma adaptação da norma, utilizando-se um cilindro de PVC com volume conhecido de 5,0 litros, que foi preenchido até a borda com os *pellets* e, sua massa, obtida numa balança. Foram realizados cinco repetições para cada tipo de *pellets*.

4.2.4 Determinação das dimensões dos *pellets*

O diâmetro e o comprimento dos *pellets* foram determinados de acordo com a norma austríaca ONORM M 7135, através da medida individual do comprimento e do diâmetro de quarenta *pellets* selecionados aleatoriamente, de cada amostra. Com o auxílio de um paquímetro digital verificou-se o diâmetro e altura de cada um deles. A média dos valores do comprimento (h) e do diâmetro foi calculada através do método estereométrico. Foram realizadas três análises independentes de cada amostra.

4.2.5 Determinação do poder calorífico superior, inferior e útil

Os materiais foram caracterizados quanto ao poder calorífico superior segundo a norma ABNT NBR 8633/84 em um calorímetro IKA WERKE, modelo C 5000 Control conforme ilustra a Figura 5. Realizaram-se cinco repetições para cada amostra de *pellets*.

Figura 5: Calorímetro IKA WERKE, modelo C 500 Control.



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 usado. O valor do PCI foi calculado de acordo com a Equação 05.

$$PCI = PCS_{0\%} - 1356,52 \quad [5]$$

Onde:

PCI = Poder calorífico inferior da amostra em quilojoules por quilograma (kJ/kg);

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

$$PCU_{\%TU} = PCI_{0\%} \times \frac{\%a.s.}{100} - \Delta H_v \times \frac{\%TU}{100} \quad [6]$$

Onde:

PCU_{%TU} = Poder calorífico útil da amostra na umidade da amostra, em kJ/kg;

%a.s. = absolutamente seco da amostra (100 - %TU), em %;

$\Delta H_v = 2512,08 \text{ J} = 600 \text{ cal}$ (1 cal = 4,1868 J): é a quantidade de energia (calor latente) necessária para evaporar 540 g de água formada na combustão de 1,0 kg de biomassa vegetal livre de umidade (seca), considerando o teor médio de hidrogênio elementar de 6% na madeira seca;

$\%TU$ = teor de umidade da amostra, em %.

4.2.6 Determinação da durabilidade mecânica dos *pellets*

Para determinação da durabilidade mecânica dos *pellets*, utilizou-se as especificações técnicas de acordo com a norma CEN/TS 15210-1 de 2005, onde se usou 500,0 g de cada amostra de *pellets*, que foram colocados numa caixa fechada, de 300x300x125 mm confeccionada em MDF de 15mm de espessura (Figura 6).

Foi utilizada uma peneira de 3,0 mm, para obter a quantidade de *pellets* retida depois de realizado o experimento. A durabilidade mecânica foi expressa através da quantidade de massa retida na peneira (m_r) e a massa inicial (m_i), segundo a Equação 7:

$$Du(\%) = 100 - \left(100 * \frac{m_r}{m_i} \right) \quad [7]$$

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.

Figura 6: (a) Conversor de rotação e (b) Equipamento e caixa (suporte).



(a)



(b)

4.2.7 Determinação da condutividade iônica e pH

Para determinação do pH, foram colocadas 1,5000 g a.s. de amostra em um béquer, em seguida adicionado 150 mL de água destilada. O béquer foi coberto com um vidro de relógio e colocado em banho-maria a 100 °C, durante 10 minutos. Depois o béquer foi retirado do banho e resfriado em um banho com água fria. Após 2 horas e 24 horas do início a temperatura de 25 °C foi medido o pH e a condutividade iônica de cada amostra do material, com um pHmêtro e condutímetro (Figura 7), respectivamente. Foram feitas três repetições para cada amostra, e usado uma amostra com água como referencial.

Figura 7: (a) pHmêtro e (b) Medidor de condutividade iônica.



(a)



(b)

4.2.8 Análise de gás da combustão dos *pellets*

Essa análise foi realizada em um analisador Eletroquímico Portátil modelo UNIGAS 3000 MK III (Figura 8), fabricado pela EUROTRON, para verificar as análises de emissões gasosas e determinação da composição química dos gases da combustão.

Figura 8: Analisador de gás UNIGAS 3000 MK III.



Este equipamento determina a composição dos gases (O_2 , CO, CO_2 , NO, NO_x e SO_2) através de um detector eletroquímico, onde este estava acoplado no centro do duto por onde passavam os gases, também determina a temperatura do gás na saída da chaminé e a temperatura ambiente. Na Tabela 4 estão apresentadas as características e propriedades do equipamento, de acordo com os limites de erro e faixa de medição adequados.

Tabela 4: Características do analisador portátil UNIGAS 3000 MKIII.

Parâmetros	Tipo de sensor	Faixa de Medição	Resolução	Limite de erro
O_2	Eletroquímico	0 - 25%	0,10%	$\pm 0,1\%$ volume
CO compensado para H_2	Eletroquímico	0 - 8000 ppm	1 ppm	± 10 ppm <300 ppm $\pm 4\%$ até 2000 ppm $\pm 10\%$ >2000 ppm
CO	Eletroquímico	0 - 2000 ppm	1 ppm	± 10 ppm <300 ppm $\pm 4\%$ até 2000 ppm $\pm 10\%$ >2000 ppm
NO	Eletroquímico	0 - 4000 ppm	1 ppm	± 5 ppm <125 ppm $\pm 4\%$ até 4000 ppm
NO_2	Eletroquímico	0 - 1000 ppm	1 ppm	± 5 ppm <125 ppm $\pm 4\%$ até 4000 ppm
SO_2	Eletroquímico	0 - 4000 ppm	1 ppm	± 5 ppm <125ppm $\pm 4\%$ até 4000 ppm
Temperatura do ar	Pt100	-10 a 100°C	1°C	$\pm (0,2\% + 0,15^\circ C)$
Temperatura do gás	TC-K	0 a 1000°C	1°C	$\pm (0,3\% + 0,3^\circ C)$
Excesso de ar	Calculado	1 a infinito	0,01%	0 - 250 %

Fonte: Manual técnico do analisador UNIGAS MKIII, apud. Garcia(2010).

A faixa de operação deste equipamento é de 0 a 25% para oxigênio (O_2), de 0 a 20000 ppm para monóxido de carbono (CO), de 0 a 4000 ppm para os óxidos de nitrogênio (NO e NO_2) e de 0 a 99% para o dióxido de carbono.

Figura 9: (a) Abastecedor do queimador (b) Queimador.



(a)



(b)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos quanto a caracterização física, química e térmica dos *pellets* são apresentados a seguir.

5.1 Caracterização física dos *pellets*

Os resultados com relação às características físicas dos *pellets* estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Propriedades físicas dos *pellets*.

Propriedades Físicas	Unidade	P1	P2	P3	Média	DP	CV	Literatura
Diâmetro Médio	mm	6,67	6,67	6,66	6,67	0,01	0,15	6,2 a 6,6
Comp. Médio	mm	14,41	11,23	16,15	13,93	2,49	17,9	11,5 a 22,1
Comp. Máximo	mm	26,06	20,86	35,12	27,35	7,22	26,40	19,2 a 34,4
Comp. Mínimo	mm	5,55	6,74	6,41	6,23	0,61	9,79	6,6 a 13,2
<i>Pellets</i> / 100g	Unidade	232	398	273	301	86,47	28,73	198 a 545
Densidade a Granel	kg/m ³	660,61	645,60	675,00	660,40	14,70	2,23	638 a 647,4
Durab. mecânica	%	96,73	95,91	98,83	97,16	1,51	1,55	96,3 a 98,1

Observa-se que com relação ao número de *pellets* contido em 100 gramas, que houve variação conforme a espécie de cada material, variando de 232 para os *pellets* P1 a 398 para os *pellets* P2, obtendo-se assim 28,73 de coeficiente de variação com relação à análise das médias. Quanto ao comprimento máximo os resultados mostraram que teve diferença significativa entre os *pellets* P2 e P3, sendo 20,86 e 35,12 mm respectivamente, resultando em um coeficiente de variação de 26,40.

Valores superiores a 600 kg/m³ são aceitos para quase todas as normas indicadas para combustíveis com elevado padrão de qualidade. Na Europa, mais especificamente na Suécia, se aceita valores de *pellets* acima de 500 kg/m³ para densidade a granel, usada geralmente em sistemas industriais. Segundo Garcia, (2012), apud Obernbenrger e Thek (2012) ressaltam que menores valores de densidade a granel geram maior custo de transporte, o que ira afetar na capacidade de estocagem de produtores e consumidores.

5.2 Análise imediata dos *pellets*

Os resultados da análise imediata dos *pellets*, com seus respectivos valores médios, desvio padrão e o coeficiente de variação de Pearson estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Análise química imediata dos *pellets*.

Propriedades	P1	P2	P3	Média	DP	CV	Literatura
Análises, %	(% massa)						
Carbono fixo	22,30	18,03	13,74	18,02	4,28	23,8	14,56 a 15,63
Materiais voláteis	76,62	80,86	85,27	80,92	4,33	5,35	83,4 a 84,9
Teor de cinzas	1,08	1,11	0,99	1,06	0,06	5,89	0,33 a 0,93
Teor de umidade	9,02	12,36	4,95	8,78	3,71	42,3	6,76 a 10,25

Os *pellets* de madeira em geral apresentaram altos valores de teor de voláteis, geralmente entre 76,62% para os *pellets* P1 a 85,27% para P3.

Segundo Brito e Barrichello (1982), os teores de materiais voláteis e carbono fixo devem estar na faixa de 75 a 85% e 14 a 25%, respectivamente. E ainda complementam que, combustíveis com elevada quantidade de carbono fixo devem ter queima mais lenta.

5.3 Condutividade iônica e pH

Os resultados obtidos na determinação do pH e condutividade elétrica estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: pH e condutividade térmica dos *pellets*.

Parâmetros	P1	P2	P3	Água*	Média	DP	CV
pH	5,69	4,72	5,36	7,77	5,26	0,49	9,38
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	69,82	39,23	55,75	0,818	54,93	15,31	27,87

*Água deionizada utilizada na preparação da amostra.

Os resultados mostram que os *pellets* tem um pH ácido, ou seja, pH equivalente ao encontrado para as madeiras. Quanto a condutividade elétrica ou iônica, as amostras apresentaram baixa condutividade, o que significa baixo teor de íons nas amostras, já que a condutividade mede a mobilidade dos íons em solução e altos valores de condutividade em amostras podem contribuir para possível corrosão dos equipamentos.

5.4 Caracterização térmica dos *pellets*

Para poder quantificar volumes de materiais com geometrias irregulares, é de grande importância a determinação da densidade a granel, pois irá fornecer informações muito úteis na questão de logística e transporte do material, pois fornece valores reais quanto ao volume que esta diretamente ligado ao transporte, e leva em consideração os espaços vazios entre uma partícula e outra. A densidade a granel é também importante para se obter a densidade energética da amostra. Para a realização dos cálculos da densidade a granel foram utilizados os seguintes dados conforme apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Determinação da densidade a granel dos *pellets*.

Materiais	Unid.	P1	P2	P3	Média	DP	CV	Literatura
Média	kg	3,303	3,228	3,375	3,302	0,074	0,022	3,19-3,24
Volume do cilindro	m ³	0,005	0,005	0,005	0,005	---	---	0,005
Densidade a granel	kg/m ³	660,6	645,6	675,1	660,4	14,76	0,022	638,0-647,4

Verifica-se que através da densidade a granel pode-se obter o grau de compactação de um material com relação ao outro. De acordo com Pastre (2012), os valores encontrados para densidade a granel estava entre 520,0 a 640,0 kg/m³, esses valores foram obtidos através de uma análise com 38 amostras diferentes de *pellets*.

Tabela 9: Valores energéticos dos *pellets*.

Propriedades	Unid.	P1	P2	P3	Média	DP	CV	Literatura
PCS _{0%}	MJ/kg	20,52	20,25	20,16	20,31	0,19	0,92	-
PCI _{0%}	MJ/kg	19,16	18,89	18,80	18,95	0,19	0,99	-
PCS _{TU%}	MJ/kg	18,67	17,75	19,16	18,53	0,72	3,86	18,71-19,48
PCI _{TU%}	MJ/kg	17,32	16,39	17,8	17,17	0,72	4,18	17,29-18,13
Densidade a granel	kg/m ³	660,64	645,58	675,1	660,44	14,76	2,24	638,0-647,4
Teor de umidade	%	9,02	12,36	4,95	8,78	3,71	42,28	6,76-10,25
Densidade energética	GJ/m ³	11,44	10,58	12,02	11,35	0,72	6,37	11,08-11,57

Através de uma bomba calorimétrica foi obtido o valor do PCS, já o PCI foi determinado através de cálculos, levando em consideração o teor de umidade do material.

O PCI e PCS dos *pellets* analisados, apresentaram baixo coeficiente de variação como pode ser observado na Tabela 8. O maior valor de PCS_{0%} obtido foram os *pellets* P1 com

20,52MJ/kg , já o $PCS_{TU\%}$ com maior valor foram os *pellets* P3 com 19,16 MJ/kg, isso demonstra que o teor de umidade influencia diretamente no poder calorífico dos *pellets*.

A partir da multiplicação da densidade a granel pelo PCI, obteve-se a densidade energética dos biocombustíveis. A partir dos resultados verifica-se que os *pellets* P3 possuem maior densidade energética com 12,02 GJ/m³, o que indica que apresentam maior quantidade por unidade de volume. O teor de umidade e o poder calorífico dos *pellets* esta ligado diretamente a este valor.

Com relação ao grau de exigência, o mercado europeu na parte residencial é extremamente criterioso quanto aos parâmetros de qualidade, se comparado com o setor industrial.

5.5 Durabilidade mecânica dos *pellets*

Os resultados de durabilidade são apresentados na Tabela 10. Observa-se que quanto maior o teor de umidade menor será a durabilidade mecânica.

Tabela 10 :Durabilidade mecânica dos *pellets* de madeira.

<i>Pellets</i>	Teor de Umidade (%)	Massa inicial (g)	Massa retida (g)	Durabilidade (%)
P1	8,86	499,15	16,33	96,73
P2	9,66	449,46	18,41	95,91
P3	4,74	502,31	5,88	98,83
Literatura	6,76 a 10,25	497 a 508,3	9,6 a 18,85	96,3 a 98,1

A partir dos resultados pode-se analisar que houve uma relação entre o teor de umidade de cada amostra e sua durabilidade mecânica, os *pellets* P3 apresentaram menor teor de umidade em comparação ao P2 e P3, obtendo assim então uma maior durabilidade mecânica de 98,83%, já os pellets P2 que obtiveram maior teor de umidade, confirmaram esta relação pois sua durabilidade foi à menor 95,91%

Conforme a norma CEN/TS 15210-1 de 2005, que diz que os *pellets* de madeira, possuem alta durabilidade mecânica, sendo superior a 80%, assim os *pellets* P1, P2 e P3, estão de acordo com essa norma, pois confirmam com seus respectivos valores 96,73%, 95,91% e 98,83%

5.6 Análise das emissões gasosas na combustão dos *pellets*

Para as análises de emissões gasosas, os dados foram coletados durante a combustão dos *pellets* através de uma chaminé no queimador da biomassa. Foram coletadas medidas a cada 30 segundos, durante 40 minutos, obtendo-se assim 80 resultados presentes através do fluxo de gás existe na chaminé.

Através do gráfico expresso na Figura 10 (a) é possível observar que a quantidade de emissões de NO_x dos *pellets* (P1) de *Pinus ssp.* com 15% de teor de carvão vegetal esta abaixo dos valores máximos exigidos pela norma CONAMA.

A partir do gráfico expresso na Figura 10 (e) nota-se que a quantidade de emissões de NO_x dos *pellets* de *pinus ssp.* esta abaixo dos valores máximos exigidos pela norma CONAMA.

Pelo gráfico expresso na Figura 10 (c) é possível observar que a quantidade de emissões de NO_x dos *pellets* de eucaliptos esta abaixo dos valores máximos exigidos pela norma CONAMA.

No do gráfico expresso na Figura 11 (a) é possível observar que a quantidade de emissões de CO dos *pellets* de *pinus ssp.* com 15% de carvão vegetal esta acima dos valores máximos exigidos pela norma CONAMA que é 3250mg/Nm³.

Pelo gráfico expresso na Figura (b) observa-se que a quantidade de emissões de CO dos *pellets* de *pinus ssp.* esta acima dos valores máximos exigidos pela norma CONAMA que é 3250mg/Nm³.

Através do gráfico expresso na Figura 11(c) nota-se que a quantidade de emissões de CO dos *pellets* de eucaliptos esta acima dos valores máximos exigidos pela norma CONAMA que é 3250mg/Nm³.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e mediante aos objetivos previamente traçados foi-se possível tirar algumas conclusões com relação ao delineamento proposto no trabalho.

Através dos resultados obtidos foi possível concluir que:

- Com relação ao teor de umidade dos *pellets*, os resultados mostraram que todos atingiram esse parâmetro de qualidade exigidos pelas normas de padrões internacionais.
- Quanto ao poder calorífico inferior dos *pellets* todos atingiram os valores mínimos exigidos pela norma austríaca $\geq 18\text{MJ/kg}$ e alemã que vai de 17,5 a 19,5MJ/kg.
- Todos os *pellets* atingiram os valores mínimos exigidos pelas normas de padrões internacionais quanto a sua durabilidade mecânica.
- Com relação a emissões gasosas de CO, nenhum dos *pellets* ficou dentro dos limites estipulados pelo norma CONAMA de 3250 mg/Nm³.
- Já com relação a emissões de NO_x todos apresentaram valores abaixo da faixa estipulada de 650 mg/Nm³ para referência de 8% de O₂.
- Porém quanto a emissões de SO_x, não foi detectada nenhuma quantidade durante a emissão dos *pellets*.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8112/86**. Carvão vegetal - Análise Imediata. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8633/84**. Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.

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

ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2012: Ano base 2011**. Brasília: 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL (Brasil). **Biomassa**. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: 27 setembro. 2013.

BRAND, M. A.; MUNIZ, G. I. B.; COSTA, V. J.; AMORIN, M.; BITTENCOURT, E. Influência do tempo de armazenamento sobre a perda da umidade de resíduos madeiráveis. In: III Encontro de Ciência e Tecnologia, 2004, Lages. **Anais ...** Lages: Universidade do Planalto Catarinense, 2004. p. 1-10.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.131 p.

BRITO, J. O. **O uso energético da madeira**. Estudos Avançados, Piracicaba, v. 21, n. 59, p.185-186, 2007.

COUTO, L.; MULLER, M. D.; DA SILVA JÚNIOR, A. G.; CONDE, L. J. N. Produção de pellets de madeira – O caso da Bio-Energy no Espírito Santo. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 1, p.45-52, 2004a.

COUTO, L.; MÜLLER, M. D.; JUNIOR, A.G.S.; JOSÉ, L.; CONDE, N. Produção de pellets de madeira – o caso da Bio-energy no Espírito Santo. **Biomassa & Energia**. 2004. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/leresiduos1_000g823wk6y02wx5ok0u5nfp51d51dk.pdf>. Acesso em: 27 outubro. 2013.

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

FEITOSA, B. C. Aproveitamento dos resíduos de madeira no Pará. **Revista da Madeira**. Edição especial: Bioenergia. v.114. 2008. Disponível em: <<http://www.remade.com.br>>. Acesso em 28 de outubro de 2013.

FERREIRA-LEITÃO, V.; GOTTSCHALK, L. M. F.; FERRARA, M. A.; NEPOMUCENO, A. L.; MOLINARI, H. B. C.; BOM, E. P. S. **Biomass Residues in Brazil: Availability and Potential Uses**. Waste And Biomass Valorization, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p.65-76, 2010.

FUNDAÇÃO DE APOIO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO - FAPESP (São Paulo). **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho**. São Paulo: Fapesp, 2010. 208 p.

HAHN, B. **Pellets for Europe. Existing Guidelines and Quality Assurance for Fuel Pellets**. St. Pölten, Áustria, 2004, 20 p.

JARA, E.R.P. O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil. São Paulo: **Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT**, 1989.

LEHTIKANGAS, P. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark, **Biomass and Bioenergy**, v.19, p. 351-360, 2001.

LIMA, C. R. Viabilidade econômica da produção de briquetes a partir da serragem de Pinus sp. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO. **Anais...** São Paulo: CBPE, 1998. p.1-4.

LOO, S.V.; KOPPEJAN, J. **The handbook of biomass combustion & co-firing**. 1a. ed. Sterling: Earthscan, 2008. 465p.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2° ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 200 p.

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.

OSTREICHES NORMUNGS INSTITUT. **ONORM M 7135**. Compressed wood or compressed bark in natural state - Pellets and briquettes, Requirements and test specifications, Vienna, 2000.

OSTREICHES NORMUNGS INSTITUT. **ONORM M7136**: Compressed wood in nature-Woodpellets quality assurance in the field of logistics of transport as storage. Vienna, 2002. 7 p.

OSTREICHES NORMUNGS INSTITUT. **ONORM M7137**: Compressed wood in nature-Woodpellets Requirements for stage of pellets at the ultimate consumer. Vienna, 2003. 12 p.

PEREIRA, M.J. Energia: Eficiência e Alternativas. Rio de Janeiro: **Ciência Moderna**, 2009. 126 p.

PEREIRA, J. C. D.; HIGA, A. R.; SHIMIZU, J. Y.; HIGA, R. C. V. Comparação da qualidade da madeira de eucalipto para fins energéticos. **Revista da Madeira**, v. 20, n. 122, p.80-82, 2010.

PINHEIRO, G. F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J. T. Densidade energética de resíduos vegetais. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 2, n. 2, p.113-123, 2005. Disponível em: <<http://www.ufpa.br>>. Acesso em 29 de outubro de 2013

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P.F.; JUNIOR, GUIMARAES, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa florestal brasileira**, v.31, n. 66. p.113-122, 2011.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S.V.; ROTHMAN, H.; ROCHA, J.D.; ROCHA, M.P.G.D. **Uso da Biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Campinas, SP: UNICAMP, 2005. 447p.

SILVA, D. A. As florestas energéticas. **Revista da Madeira**, v. 20, n. 121, p.25-27, 2009.

SWEDISH STANDARDS. **SS 18 71 80**: Biofuels and Peat - Determination of mechanical durability of pellets and briquettes, pellets. Classification Swedish Standards. Stockholm, 1999.

STAHL, M.; GRANSTROM, K.; BERGHEL, J.; RENSTROM, R. Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets. **Biomass and Bioenergy**, v.27, n.6, p.621-628, 2004.

TEIXEIRA, F. N.; LORA, E. E. S. Capítulo 2 - *Suprimento energético para termelétricas*. In: LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. **Geração termelétrica. Planejamento, projeto e operação**. Rio de Janeiro: Interciência, v.1, p. 31–86, 2004.

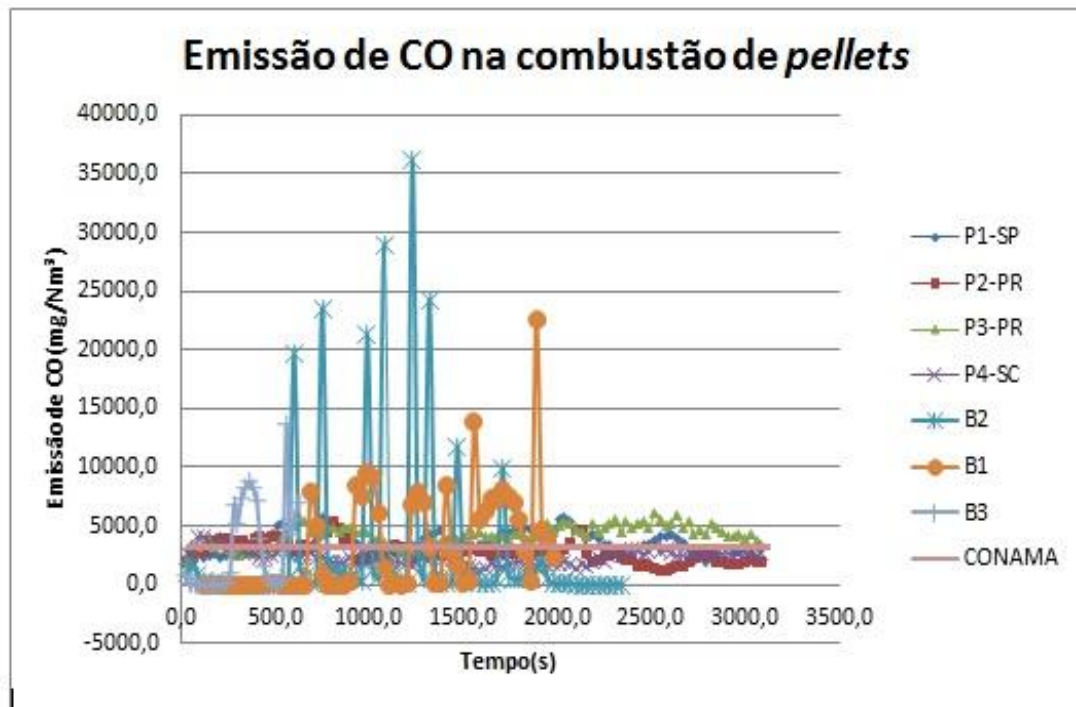
TOLMASQUIM, M. T. **Geração de energia elétrica no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2005. 79p.

TOLMASQUIM, M. T. **Novo modelo do setor elétrico brasileiro**. Rio de Janeiro: Synergia, 2011. 238p.

VIAK, A. Wood pellets in Europe - State of the art, technologies, activities, markets. Asplan Viak, AEBIOM, FastBränslePannor, Lambelet Heizungssysteme, Technische Universität München, Umdasch AG, Whitfield GmbH, **UMBERA**. Part of the Thermie B project. 2000.

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, E.U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of agricultural residues. **Progress in Energy and Combustion Science**. Hamburg, Germany, v.26, n.1, p.1-27.

Anexos



OS valores apresentados foram comparados com os valores segundo Garcia (2012), P1-SP, P2-PR, P3-PR, P4-SC, e conforme o CONAMA.