

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

ANDERSON LUIZ PIRES DE LIMA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO USO DE BIOMASSA FLORESTAL  
COMO FONTE DE ENERGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

DOIS VIZINHOS

2015

ANDERSON LUIZ PIRES DE LIMA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO USO DE BIOMASSA FLORESTAL  
COMO FONTE DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de conclusão de Curso 2 do Curso Superior de Engenharia Florestal da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR câmpus Dois Vizinhos, como requisito para obtenção de nota parcial.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Flávia Alves Pereira.

Co-orientador: Prof. M. Ramiro Faria França.

DOIS VIZINHOS

2015

L732a Lima, Anderson Luiz Pires de.  
Análise comparativa do uso de biomassa florestal como fonte de energia. / Anderson Luiz Pires de Lima – Dois Vizinhos: [s.n], 2015.  
41f.:il.

Orientadora: Flávia Alves Pereira  
Co-orientador: Ramiro Faria França  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curso de Engenharia Florestal. Dois Vizinhos, 2015.  
Bibliografia p.36-40

1.Biomassa florestal. 2.Energia térmica I.Pereira, Flávia Alves, orient. II.França, Ramiro Faria, co-orient.  
III.Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Dois Vizinhos. VI.Título

CDD: 634.9



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná**  
Câmpus Dois Vizinhos  
Curso de Engenharia Florestal



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**Análise comparativa do uso de biomassa florestal como fonte de  
energia**  
por

Anderson Luiz Pires de Lima

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 03 de dezembro de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal. O (a) candidato(a) foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Flávia Alves Pereira  
Orientador(a)

---

Prof. Dr. Eleandro José Brun  
Membro titular (UTFPR)

---

Prof. Dr. Marcos Aurélio Mathias de Souza  
Membro titular (UTFPR)

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico à todos que colaboraram para a realização deste trabalho.

Dedico à minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por permitir esta conquista e por guiar meus passos.

Agradeço à minha família em especial minha mãe Valentina Pires de Lima e meu pai Antonio Luiz Pires de Lima, pelo apoio em todas as horas, pelo carinho e amor incondicional.

Aos meus irmãos Odélio, Marco Aurélio, Antonio Junior e Ederson que contribuíram e me apoiaram de uma forma ou outra para que essa conquista se tornasse realidade.

Aos meus sobrinhos que trazem alegria para toda nossa família e nos estimulam a melhorar.

Agradeço a minha namorada Íris Cristina Bertolini pelo amor e apoio em todas as horas e ser um porto seguro nos momentos difíceis.

As meus amigos e colegas por todas as horas de estudos e diversão juntos.

As minhas amigas Aline Delfino Germano, Thayllane de Campos e Raquel Restofe Rutz pela convivência e amizade verdadeira conquistada ao longo dos anos e todas as horas de estudos e debates sobre a vida, política e religião “intermináveis”.

Ao professor Eleandro José Brun por ter sido um excelente tutor no decorrer dos anos de bolsista PET e aos colegas petianos pela boa convivência e parceria.

A minha orientadora professora Flávia Alves Pereira, pela paciência ao orientar e ensinar, por dedicar e dividir seu tempo para a realização deste trabalho e as horas de boa conversa.

Ao meu co-orientador professor Ramiro Faria França pelo apoio e sugestões que valorizaram o trabalho.

A empresa Araupel na pessoa do Sr. Rodrigo Costa por ceder as amostras de biomassa para este trabalho fornecer todas as informações necessárias para conclusão com sucesso do mesmo.

A Embrapa Florestas – Colombo pela realização das análises importantes para o trabalho.

A UTFPR – DV na pessoa do professor Marcos Aurélio Matias por ceder o laboratório de tecnologia da madeira para realização das análises do trabalho.

“Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer”.

Mahatma Gandhi

## Resumo

LIMA, Anderson L. P. **Análise comparativa do uso de biomassa florestal como fonte de energia** 2015. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Florestal da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR câmpus Dois Vizinhos, 2015.

O intuito deste trabalho foi atestar a viabilidade de uso da biomassa florestal para geração de energia térmica com três espécies florestais a *Araucaria angustifolia* (Bertol) Kuntze, *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus grandis* Hill (ex Maiden) em suas diversas formas de obtenção. Utilizou-se a casca de pinus e de araucária, madeira de pinus e de araucária, madeira com casca de pinus, madeira com casca de eucalipto e pellets de madeira de pinus, comparando-os com três outros combustíveis, o diesel, energia elétrica e gás liquefeito de petróleo (GLP). Através de análises laboratoriais com a biomassa florestal determinou-se o teor de umidade, composição química imediata e poder calorífico superior (PCS). Com o auxílio de equações matemáticas foi estimado o poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico líquido (PCL) para determinação da quantidade de energia gerada pela biomassa. Com os dados do poder calorífico e consumo foi realizada análise econômica do custo de produção de energia de cada combustível. Conclui-se que a utilização de biomassa florestal para geração de energia térmica é viável economicamente, ambientalmente e socialmente quando comparada com a energia elétrica, diesel e GLP.

Palavras chave: Biomassa florestal. Energia térmica. Viabilidade. Combustível



## Abstract

LIMA, Anderson L. P. **Comparative analysis of use of forest biomass as an energy source** 2015. 41 f Work Course Conclusion of Forestry from the Federal Technological University of Paraná Engineering - UTFPR campus Dois Vizinhos, 2015.

The purpose of this study was to certify the feasibility of use of forest biomass for thermal energy with three forest species *Araucaria angustifolia*, *Pinus taeda* and *Eucalyptus grandis* in its various forms to obtain. Were used the bark of pines and *Araucaria* pine wood and *Araucaria*, wood with pine bark, wood with eucalyptus bark and pine wood pellets, comparing them with three other fuels, diesel, electricity and liquefied petroleum gas (LPG). By laboratory tests with forest biomass was determined the moisture content, instant chemical composition and higher heating value (PCS). With the aid of mathematical equations was estimated the lower heating value (LHV) and net calorific value (PCL) to determine the amount of power generated by biomass. With the data of the calorific value and consumption was carried out economic analysis of the cost of each fuel energy production. We conclude that the use of forest biomass for thermal power generation is economically viable, environmentally and socially compared to electricity, diesel and LPG.

Keywords: Forest biomass. Thermal energy. Viability. Fuel.

## SUMÁRIO

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                  | <b>9</b>  |
| <b>2. OBJETIVOS</b>                   | <b>10</b> |
| 2.1. Objetivo geral                   | 10        |
| 2.2. Objetivo específico              | 10        |
| <b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>       | <b>11</b> |
| 3.1. BIOMASSA FLORESTAL               | 11        |
| 3.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA               | 11        |
| 3.2.1. Composição elementar           | 11        |
| 3.2.2. Composição imediata            | 12        |
| 3.3. TEOR DE UMIDADE                  | 13        |
| 3.4. PODER CALORÍFICO                 | 13        |
| 3.4.1. Poder calorífico superior      | 13        |
| 3.4.2. Poder calorífico inferior      | 14        |
| 3.4.3. Poder calorífico líquido       | 14        |
| 3.5. PELLETS                          | 14        |
| 3.6. DIESEL                           | 15        |
| 3.7. GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO       | 16        |
| 3.8. ENERGIA ELÉTRICA                 | 17        |
| 3.9. ANÁLISE ECONÔMICA                | 17        |
| <b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b>          | <b>19</b> |
| 4.1. COLETA DE CAVACOS                | 19        |
| 4.2. TEOR DE UMIDADE                  | 20        |
| 4.3. PODER CALORÍFICO                 | 20        |
| 4.4. ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA         | 21        |
| 4.5. DIESEL, ENERGIA ELÉTRICA E GLP   | 23        |
| 4.6. DELINEAMENTO ESTATÍSTICO         | 23        |
| 4.7. ANÁLISE ECONÔMICA                | 24        |
| <b>5.0. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>    | <b>25</b> |
| 5.1. QUÍMICA IMEDIATA                 | 25        |
| 5.2. PODER CALORÍFICO                 | 30        |
| 5.3. CUSTOS DE GERAÇÃO                | 31        |
| <b>6.0. CONCLUSÃO</b>                 | <b>35</b> |
| <b>7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> | <b>36</b> |
| <b>ANEXOS</b>                         | <b>41</b> |

## 1.0 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um país é condicionado a vários fatores, e um suprimento adequado de energia é imprescindível nesse processo, seja ela térmica, elétrica ou química. Atualmente, existem diferentes formas de geração de energia, mas nem todas são sustentáveis e limpas. Com isso, tem-se buscado, nos últimos anos, alternativas para suprir essa demanda, que diminuam problemas relacionados à escassez dos recursos naturais e aos impactos causados ao meio ambiente.

A diversificação da matriz energética é importante, para que eventuais problemas de falta de energia, como os ocorridos no Brasil nos últimos anos, devido às secas, sejam minimizados.

A matriz energética brasileira é baseada na produção hídrica, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2014, p.14) “em 2013 as hidroelétricas foram responsáveis por 79,3% da energia gerada no país”.

A descentralização da geração de energia é relevante, pois os custos com a transmissão desta têm ficado cada vez mais altos, devido às longas distâncias a serem vencidas, a dificuldade de acesso a algumas localidades e o custo com transporte dos combustíveis.

A utilização da energia da biomassa florestal tem ganhado importância, tendo em vista o aumento dos preços de outros combustíveis, principalmente os derivados de petróleo e a disponibilidade em todas as regiões do país.

A facilidade de manuseio, a alta produção, a baixa exigência de tecnologia para o processamento e transporte e por não requerer embalagens ou cuidados especiais, contribui para que a biomassa florestal tenha larga utilização.

Outra questão que reforça seu uso é a ambiental, pois é uma alternativa de se produzir energia de maneira sustentável, além de apresentar um ciclo de carbono zero, quando queimada em condições adequadas. Além disso, evita o uso de outras fontes de energia que causem impactos ao meio ambiente e podem ser utilizadas em áreas consideradas degradadas ou impróprias para agricultura.

O impacto social do uso da biomassa florestal também é positivo, pois cria toda uma cadeia de serviços e empregos na região produtora. Além da construção de infraestrutura viária e injeção de recursos na economia local.

## 2.0 OBJETIVOS GERAIS

### 2.1. OBJETIVO GERAL.

Avaliar o potencial de uso da biomassa florestal para geração de energia, no formato de cavaco (*in natura*) e pellets, e realizar análise econômica de custos em comparação com combustíveis fósseis e energia elétrica.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Determinar a composição química imediata e o poder calorífico superior, inferior e útil de:

- Casca *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze e de *Pinus taeda* L.;
- Madeira *Araucaria angustifolia* e de *Pinus taeda* L.;
- Madeira com casca de *Pinus taeda* L. e de *Eucalyptus grandis* W. Hill;
- Pellets de *Pinus taeda* L.;

b) Comparar o consumo de biomassa florestal, energia elétrica, diesel e GLP na geração de energia;

c) Realizar análise de viabilidade de uso da biomassa florestal em relação ao diesel, GLP e Energia elétrica;

d) Comparar a geração de energia entre as fontes de biomassa florestal estudadas.

### 3.0. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. BIOMASSA FLORESTAL

O termo biomassa, segundo Silva et al. (2008, p. 128) “é a matéria vegetal gerada através da fotossíntese e os seus derivados”. Ainda de acordo com Soares et al. (2006, p. 2) “os organismos fotossintéticos (autótrofos) são capazes de transformar a energia solar em energia química, mediante a atuação biogeoquímica dos cloroplastos contidos na clorofila das plantas”.

“A biomassa florestal, historicamente, constitui-se em um importante insumo energético para a humanidade” (MULLER, 2005 p. 4). As formas de uso da biomassa mais comuns são a lenha e o carvão, mas segundo Brand (2010, p.4) “a biomassa florestal inclui folhas, galhos, serapilheira, raízes, frutos, extrativos (gomas, resinas, graxas), resíduos da indústria (casca, cavacos, serragem, refilhos, destopos, pó) ou licor negro”.

O uso da biomassa requer alguns cuidados, segundo Migliorini (1980, p.2) “quando se pretende utilizar a biomassa florestal, como fonte de energia, deve-se conhecer todas as suas características, de modo a se aproveitar todas as vantagens e eliminar os inconvenientes”.

A queima da biomassa para geração de energia gera alguns produtos como calor, cinzas, produtos químicos e gases. Brito e Barrichello (1979, p. 1) afirmam que “a combustão completa produz vapor d'água e CO<sub>2</sub> juntamente com calor e cinzas não combustíveis. Quando a combustão é incompleta ocorre a formação de CO, hidrocarbonetos e outros gases”.

#### 3.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

##### 3.2.1. Composição elementar

A composição química elementar “corresponde ao conteúdo percentual em massa dos principais elementos que constituem a biomassa, geralmente referido à matéria seca, ou seja, sem considerar a presença de água” (NOGUEIRA; LORA, 2003, p. 43). Esta composição influencia diretamente nas suas propriedades.

Os principais constituintes da biomassa segundo Protássio et al. (2011, p. 114) são “carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N) e cinzas (A)”. As cinzas agregam todos os elementos não combustíveis, como os minerais. Ainda segundo o autor, “esses componentes não são os únicos presentes na biomassa vegetal, mas são os de maior relevância a serem estudados devido às relações entre esses elementos (C, H, O, A) e o poder calorífico”.

Estes elementos formam as substâncias orgânicas da biomassa, através dos processos químicos ocorridos na fotossíntese, formando as substâncias poliméricas, carboidratos e extrativos que vão formar os tecidos vegetais. Segundo Brand (2010, p. 24) “comparando-se as substâncias que constituem a parede celular das plantas é importante ressaltar que a lignina é rica em carbono e hidrogênio, que são os elementos que produzem calor”.

### 3.2.2. Composição química imediata

A composição química imediata de uma amostra de biomassa, “é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono fixo (F), voláteis (V), umidade (W) e cinzas (A)” (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2011, p.48).

O teor de materiais voláteis “se determina como fração em massa do combustível que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada em atmosfera inerte, até a temperatura de 850 °C, por 7 minutos” (NOGUEIRA; LORA, 2003, p.43). O conhecimento do índice de materiais voláteis permite estimar o grau de combustão de um combustível.

Na biomassa o teor de voláteis e o carbono fixo são inversamente proporcionais, Brand (2010, p. 28) afirma que “combustíveis com altos índices de carbono fixo (baixo índice de voláteis) deverão queimar-se mais lentamente. Portanto, eles poderão requerer longo tempo de residência na fornalha para queima total”.

O teor de cinzas é o percentual de resíduos ao final do processo de combustão da biomassa, advindo das substâncias inorgânicas que participam da nutrição do vegetal, mas não participam das reações de combustão. De acordo com Vieira (2012, p. 16) “as cinzas são constituídas de composto de silício (Si), potássio (K), sódio (Na), enxofre (S), cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg) e ferro (Fe). Quando em alta concentração podem diminuir o poder calorífico (PC)”.

### 3.3. TEOR DE UMIDADE

A umidade “é a quantidade de água na biomassa e que pode ser avaliada pela diferença entre os pesos de uma amostra, antes e logo após ser submetida à secagem” (NOGUEIRA; LORA, 2003, p.43). A determinação da umidade pode ser feita de dois modos, em base seca e base úmida.

O teor de umidade é umas das variáveis que mais influencia no uso da biomassa para geração de energia, pois é inversamente proporcional ao poder calorífico. Brand (2010, p. 31) relata que “quanto maior o teor de umidade, menor será a quantidade de energia útil para o sistema de geração de energia”.

### 3.4. PODER CALORÍFICO

#### 3.4.1. Poder calorífico superior (PCS)

A biomassa é um material heterogêneo, por isso apresenta diversas variações e essas tem relação direta com suas propriedades térmicas. Jara (1989. apud GARCIA, 2010, p. 38) ressalta que “o poder calorífico superior da biomassa lignocelulósica recebe influência, além da umidade, da constituição química, principalmente da lignina e dos extrativos”.

O poder calorífico superior é determinado em bomba calorimétrica e neste processo “a energia não é perdida, devido ao recipiente ser fechado e após a produção de vapor d ‘água, o mesmo torna a condensar na parede do recipiente, permanecendo em um ciclo fechado” Brand (2010, p. 35), deste modo não se perde energia no processo.

De acordo com Souza (2010, p. 27), “O poder calorífico superior se refere à quantidade de calor liberado durante a condensação do vapor de água”. Devido a queima da biomassa se dar em altas temperaturas, “em instalações industriais, a temperatura dos gases de saída geralmente é maior que a temperatura de condensação, portanto o calor latente não é utilizado” (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2011, p. 51).

### 3.4.2. Poder calorífico Inferior (PCI)

O poder calorífico inferior é a quantidade de calor produzido por unidade de massa, descontando-se o valor da umidade impregnada no combustível. “De maneira simplificada pode-se dizer que o poder calorífico inferior refere-se ao calor efetivamente possível de ser utilizado nos combustíveis” (BRAND, 2010, p. 35).

Segundo (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2011, p. 51) o poder calorífico inferior é, “quando não se considera o calor latente de condensação da umidade presente nos produtos de combustão”, ou seja, o calor gasto na evaporação da umidade é perdido no processo de combustão.

O poder calorífico do combustível é o principal parâmetro a ser observado no dimensionamento de sistemas de combustão. Nogueira e Lora (2003, p. 45) ressaltam que nos “cálculos de eficiência e perdas de calor em fornos e caldeiras, como o calor de condensação da umidade dos gases, é tecnicamente irrecuperável, parece ser preferível o uso do PCI”.

### 3.4.3. Poder calorífico líquido (PCL) ou Poder calorífico útil (PCU)

O PCL advém do PCI, descontando a energia consumida para evaporar a água presente no material recém cortado, e se mantém aproximadamente estável até sua destinação às caldeiras. Representa a energia efetiva disponível ao sistema, sendo também influenciado pelo teor de inorgânicos no material, que reduzem seu potencial (FERREIRA et al., 2007, p 2).

De acordo com Brand (2010, p. 36), para chegarmos ao poder calorífico líquido devemos descontar “além da energia perdida para a liberação do hidrogênio de constituição é descontada também a energia para evaporar a água livre do combustível”.

## 3.5. PELLETS

A pelletização é constituída basicamente de três fases, Stahl e Berghel (2011, apud ALMEIDA, 2015, p. 23) afirmam que o “processo de pelletização de biomassa é definido como o produto resultante do processo de secagem, moagem e prensagem (compressão) de uma matéria prima usando uma matriz de pelletização”.



O processo de moagem das partículas da biomassa tem grande importância, “pois tem a finalidade de uniformização do tamanho das partículas da biomassa e para a diminuição do tamanho o que favorece a qualidade e diminuição de forças de pelletização” (Almeida, 2014, p. 25).

A secagem da matéria prima até teores de umidade adequados é fundamental para a produção de pellets, pois influencia diretamente nas características físicas e principalmente no seu poder calorífico. Segundo Garcia (2010, p. 50) “a matéria prima para fabricação de pellets deve ter baixo teor de umidade para que tenha alto poder calorífico”. O teor de umidade do pellet deve estar abaixo de 10%, segundo a norma europeia EN PLUS.

Segundo Consufor (2010, p. 1) “a prensagem do pellet é feita por extrusão, onde a matéria prima é forçada por rolos a passar em uma matriz aço, que possui um arranjo de furos com diâmetros que variam entre 6 mm e 10 mm”. A pelletização de acordo com Barros (2013, p. 33) “ocorre a temperaturas elevadas, que podem atingir 110-130 °C, consequência da fricção e da pressão na ordem dos 210 a 450 MPa, causadas pela força dos rolos sobre a matriz”.

A alta temperatura empregada é fundamental no processo de pelletização, pois “ao aquecer, a lignina da madeira torna-se mais plástica, promovendo a agregação das partículas, sem que haja necessidade de adicionar materiais adesivos” Carvalho (2011, p. 16).

O processo de resfriamento tem grande influência sobre a qualidade do pellet, Garcia (2010, p. 23) ressalta que “ao final da etapa de pelletização, o combustível sai com uma temperatura em torno de 95 °C”. O processo de resfriamento e acomodação é crítico para os pellets porque estão relacionados à resistência e durabilidade dos mesmos.

### 3.6. DIESEL

O óleo diesel é um combustível derivado do petróleo e sua constituição, segundo Mazzuco (2004, p. 16) é formado:

“Basicamente por hidrocarbonetos, que variam de 8 a 38 átomos de carbono em sua cadeia (C8 a C38), sendo que aproximadamente 40% são de n-alcanos; 39%, de iso e cicloalcanos; 20%, de hidrocarbonetos aromáticos; e o restante é formado por isoprenóides como enxofre, oxigênio e nitrogênio”.

O óleo diesel “é formulado por meio da mistura de diversas correntes como gasóleos, nafta pesada, diesel leve e diesel pesado, provenientes das diversas etapas de processamento do petróleo bruto” (SOUZA; POLITO; MÓDOLO, 2008, p. 539).

De acordo com Guimarães (2004, p. 3), “a combustão do diesel dentro do motor não é completa, o que gera gases e resíduos particulados que saem do escapamento dos veículos”, causando graves impactos ao meio ambiente e a saúde humana.

Braun; Appel; Schmal (2003 p. 473) afirmam que os compostos emitidos na combustão dos motores à diesel podem ser classificados em dois tipos:

“Os que não causam danos à saúde, ou seja, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e N<sub>2</sub>; e os que apresentam perigos à saúde, sendo esses subdivididos em compostos cuja emissão está regulamentada, que são: CO, os hidrocarbonetos (HC), os óxidos de nitrogênio (NOX), os óxidos de enxofre (SOX) e material particulado (MP); e aqueles que ainda não estão sob regulamentação: aldeídos, amônia, benzeno, cianetos, tolueno e hidrocarbonetos aromáticos polinucleares (HPA)<sup>34</sup>”.

### 3.7. GLP (GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO)

O GLP é um produto derivado do refinamento do petróleo, e tem alto poder calorífico. Carvalho (2008, p. 30) revela que “a formação do GLP se dá um pouco abaixo da temperatura ambiente, o butano e o propano condensam-se, formando o gás liquefeito de petróleo ou GLP”.

De acordo com Ribeiro e Vicari (2005, p. 4) o GLP “normalmente comercializado em botijões no estado líquido, torna-se gasoso à pressão atmosférica e temperatura ambiente, e é caracterizado por sua grande aplicabilidade como combustível”, isso se deve à facilidade de armazenamento e transporte já que pode ser engarrafado em vasilhames como botijões, cilindros e outros.

O GLP apresenta algumas vantagens como facilidade de transporte e armazenagem, devido suas características líquido no botijão e gasoso na atmosfera, apresenta grande poder combustível, entrega por unidade de massa, mais energia que a lenha, carvão, gás natural e óleo. Apresenta também algumas desvantagens por ser de uma fonte esgotável derivado de petróleo um combustível fóssil e ainda os riscos de explosões ou incêndios (BARCELOS, 2011, p. 4).

### 3.8. ENERGIA ELÉTRICA

A energia elétrica pode ser proveniente de vários sistemas de geração, pode ser hidráulica, eólica, solar, etc., mas também possui a propriedade de se transformar em outro tipo de energia, segundo Gonçalves Filho e Toscano (2008, p. 287) “sabemos que, enquanto uma corrente elétrica se estabelece em um circuito, está havendo transformação de energia. No caso dos aparelhos resistivos, a transformação é de energia elétrica em térmica e denomina-se efeito joule”.

“A unidade básica de potência, o watt, nome dado em homenagem ao físico escocês James Watt (1736-1819), equivale a um joule por segundo. Os prefixos quilo (k) e mega (M) multiplicam as unidades por mil e milhão, respectivamente. Outra unidade bastante usada é o watt-hora (Wh), definido como a energia necessária para fazer funcionar durante uma hora uma máquina com potência de um watt. Em eletricidade utiliza-se ainda o watt de pico (Wp), para indicar a máxima potência que um sistema pode oferecer” (PEREIRA; COLLE, 2015, p. 9).

A potência de um aparelho indica a quantidade de energia elétrica que está sendo transformada em outras formas de energia num certo intervalo de tempo. “Pode-se dizer que ela representa a rapidez com que se realiza um trabalho, por exemplo: uma lâmpada de 150W transforma 150 J de energia elétrica em energia térmica a cada segundo de funcionamento” (GONÇALVES FILHO; TOSCANO, 2008, p. 278).

### 3.9. ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica é uma técnica imprescindível para avaliação de investimentos em novos projetos. A Economiabr (2015) afirma que “análise econômica é a aplicação da realidade econômica do método científico de decomposição em elementos mais facilmente compreensíveis que o todo, visando a inseri-los em um esquema explicativo”.

A análise dos investimentos “é o modo de antecipar, por meio de estimativas os resultados oferecidos pelos projetos, empregar um conjunto de técnicas que possibilitem comprovar os resultados de diferentes alternativas e auxiliar a tomada de decisões” (Megliorini; Vallim, 2009 apud Costa, 2012, p.13).

De acordo com Mesquita (2015, p. 2) “a avaliação de projetos de investimentos comumente envolve um conjunto de técnicas que buscam determinar sua viabilidade econômica e financeira, considerando uma determinada taxa mínima

de atratividade”. Essa avaliação preliminar permite ao investidor estimar os lucros do empreendimento.

#### 4.0. MATERIAL E MÉTODOS

Para realização do trabalho foram realizadas análises do teor de umidade, composição química imediata e poder calorífico de várias formas de biomassa proveniente de *Pinus taeda*, *Araucaria angustifolia* e *Eucalyptus grandis* e foram comparados os custos para geração de energia térmica entre as biomassas, o diesel, energia elétrica e GLP.

As análises do teor de umidade e química imediata dos cavacos e pellets foram realizadas no Laboratório de Tecnologia da Madeira da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Dois Vizinhos. As análises de poder calorífico superior foram realizadas no Laboratório de Tecnologia da Madeira da EMBRAPA Florestas (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) – Colombo.

##### 4.1. COLETA DOS CAVACOS

As amostras de cavaco e pellets foram fornecidas por empresa da região, que fica situada na cidade de Quedas do Iguaçu, região oeste do estado do Paraná. O cavaco de pinus com casca é proveniente da ponteira da árvore conforme Figura 1 e o cavaco de eucalipto com casca foi obtido de árvores inteiras. Estas foram trazidas do campo após a colheita e processadas no picador. As toras de pinus tem diâmetro máximo de 10 cm.

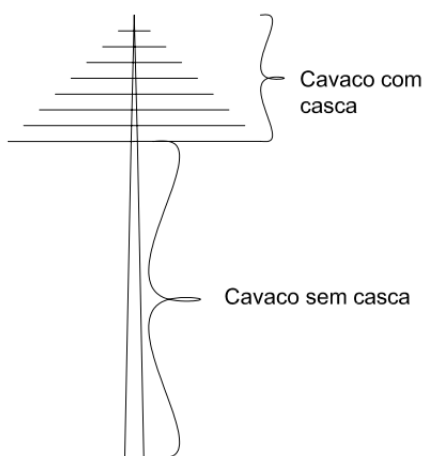


Figura 1. Partes da árvore de *Pinus taeda* onde foram retiradas as amostras de cavaco.

As amostras de cavaco de pinus e araucária sem casca foram obtidas de destopos e costaneiras, gerados durante o desdobro primário das toras na serraria. Neste caso, a casca foi retirada em descascadores.

As amostras de casca de pinus e araucária foram coletadas após a retirada das mesmas no descascador de toras e processamento em picador florestal para uniformizar a granulometria.

As amostras de pellets foram coletadas após o resfriamento, que é a última fase da produção, onde o produto é ensacado para comercialização.

Todas as amostras foram armazenadas em sacos plásticos selados para evitar a troca de umidade com o ambiente durante o transporte.

#### 4.2. TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade foi determinado em base seca, de acordo com a metodologia descrita na norma NBR 14929/2003 Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. A metodologia consiste em deixar a amostra na estufa com temperatura de  $103 \pm 2$  °C até atingir peso constante, tendo um intervalo de 1 hora entre as pesagens.

$$\%TU: (m_i - m_f)/m_f$$

Onde:

%TU: Teor de umidade

$m_i$ : massa inicial da amostra úmida

$m_f$ : massa final da amostra seca

#### 4.3. PODER CALORÍFICO

A análise do poder calorífico superior (PCS) da biomassa florestal foi em bomba calorimétrica, seguindo a metodologia descrita na norma NBR 8633:1984 Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico - Método de ensaio. Este ensaio fornece o poder calorífico superior e o poder calorífico inferior foi estimado com base na fórmula determinada por Brand (2010, p. 36) onde o teor de hidrogênio da madeira é considerado “no caso da madeira, o valor pode variar de 5,8 a 6,2% de

hidrogênio. No entanto, para efeitos práticos, utiliza-se o valor de 6%” (BRAND, 2010, p. 35).

$$PCI = PCS - 600 \times 9 H/100$$

Onde:

PCI = Poder calorífico inferior

PCS = Poder calorífico superior

H = % de hidrogênio no material

O poder calorífico líquido foi estimado por equação determinada por Doat (1977) citado por Brand (2010, p.37) onde os valores da umidade da madeira e o teor de cinzas são considerados.

$$PCL = \{[PCI - (6 \times W)] / (100 + W)\} \times 100$$

Onde:

PCL = Poder calorífico líquido

PCI = Poder calorífico inferior a 0% de umidade

W = Umidade da madeira na base seca

#### 4.4. ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA

A análise química imediata da biomassa florestal, para determinação de materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo foi determinada de acordo com a norma NBR 8112/86.

##### 4.4.1 Determinação do teor de Materiais Voláteis

Para determinação dos materiais voláteis foi colocado um grama da amostra após controle de granulometria em peneira de 40 mesh em cadinho com tampa, sob os seguintes passos:

- Aquecimento da mufla à 950°C.
- Com a porta da mufla aberta, posicionar os cadinhos, por dois minutos na parte externa da mufla sobre a porta (temperatura aproximadamente 300°C);
- Por três minutos, colocação dos cadinhos na beira da abertura da mufla ainda com a porta aberta (temperatura aproximadamente 500°C);
- Finalmente, inserção das amostras no fundo da mufla por seis minutos, com a porta fechada.

- Esfriadas as amostras em dessecador por 1 hora e feita a pesagem. Para determinação dos materiais voláteis foi utilizada a equação:

$$MV: ((m_2 - m_3)/m_2) \times 100$$

Onde:

MV: materiais voláteis em %.

m<sub>2</sub>: massa de cadinho + massa de carvão depois da retirada umidade na estufa.

m<sub>3</sub>: massa de cadinho + massa de carvão depois de retirada da determinação de voláteis.

#### 4.4.2. Determinação do teor de Cinzas

Para determinação das cinzas a mufla foi aquecida a 750 °C, então colocado o cadinho sem tampa com a amostra após a realização da análise dos voláteis seguindo os passos:

- A amostra foi inserida na mufla e deixada por seis horas para queima completa da biomassa.

- Terminada a incineração, o cadinho foi colocado em dessecador por 1 hora. Após a pesagem foi utilizado a equação:

$$C = ((m_1 - m_0)/m) \times 100$$

Onde:

C: cinzas em %.

m<sub>1</sub>: massa do cadinho mais resíduo em (g)

m<sub>0</sub>: massa do cadinho em (g).

m: massa da amostra em (g).

#### 4.4.3. Determinação do Carbono Fixo

A determinação do carbono fixo foi feita por diferença. Calculadas as porcentagens de materiais voláteis e cinzas, a diferença entre 100 e a soma dessas duas porcentagens dará a porcentagem do carbono fixo, utilizando a equação:



$$CF = 100 - (\%MV + \%Z)$$

Onde:

CF: carbono fixo em %.

%MV: porcentagem de materiais voláteis.

%Z: porcentagem de cinzas.

#### 4.5. DIESEL, ENERGIA ELÉTRICA E GLP.

Os valores de poder calorífico do diesel, GLP e energia elétrica serão encontrados através de revisão bibliográfica para posterior comparação com as espécies florestais (anexos 1 e 2).

Os preços da tonelada de cavaco de *Araucaria angustifolia*, *Pinus taeda* e *Eucalyptus grandis* foram tomados com base em pesquisa de mercado na região sudoeste do Paraná bem como o diesel e o GLP. O preço da energia elétrica será tomado com base na tabela de preços da COPEL – Companhia Paranaense de Energia Elétrica.

#### 4.6. DELINEAMENTO ESTATÍSTICO

Com os dados da umidade, química imediata e poder calorífico das biomassas florestais, foi efetuado o delineamento experimental inteiramente casualizado. Para a variável teor de umidade, foram realizadas 10 repetições de cada tratamento totalizando 70 amostras. O PCS foi obtido a partir de 2 repetições totalizando 12 amostras e análise química imediata (teor de cinzas, matérias voláteis e carbono fixo) a partir de 5 repetições totalizando 35 amostras.

A análise de variância e a comparação de médias foram realizadas através do teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando-se o programa estatístico ASSISTAT<sup>®</sup>.

#### 4.7. ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica de viabilidade de uso da biomassa foi realizada com base no comparativo entre o consumo de cada combustível para geração de 100.000 kcal/h e no seu preço unitário.

A quantidade de energia gerada foi baseada em um pequeno consumidor com um aquecedor de passagem à biomassa com potência de 100 000 kcal/h.

A análise econômica foi baseada nos custos de geração de energia de cada combustível, sendo analisado o preço unitário de cada combustível pela quantidade de energia gerada.

## 5.0. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA

Os valores de umidade das amostras são visualizados na Tabela 1. Observa-se que os menores teores de umidade média foram dos pellets (7,08%). Este baixo teor de umidade se deve ao processo de pelletização, onde a madeira sofre secagem forçada. Segundo Stahl et al (2004, p. 625) “teores de umidade abaixo de 8% prolongam o tempo de estocagem do produto minimizando a proliferação de micro-organismos como fungos, que vão deteriorar a madeira”. Dentre as biomassas *in natura* o *Eucalyptus grandis* apresentou o menor teor de umidade sendo de 77,11% enquanto o *Pinus taeda* com casca apresentou umidade média de 154,66% seguido de madeira e de casca de *Araucaria angustifolia* com 135,17% e 130,37%, respectivamente.

Tabela 1. Teor de umidade das amostras de Pellets e cavacos de *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* sem casca, Casca de *Pinus taeda*, Casca de *Araucaria angustifolia*, *Araucaria angustifolia* sem casca, *Pinus taeda* com casca.

| Tratamentos                                       | Umidade (%) |
|---|-------------|
| Pellets   | 7,08 e      |
| Cavaco de <i>Eucalyptus grandis</i>               | 77,11 d     |
| Cavaco de <i>Pinus taeda</i> sem casca            | 104,53 c    |
| Cavaco de Casca de <i>Pinus taeda</i>             | 118,59 bc   |
| Cavaco de <i>Pinus taeda</i> com casca            | 154,66 a    |
| Cavaco de Casca de <i>Araucaria angustifolia</i>  | 130,37 b    |
| Cavaco de <i>Araucaria angustifolia</i> sem casca | 135,17 ab   |

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: O autor, 2015.

O alto teor de umidade apresentado pelos cavacos das espécies apresentadas na Tabela 1, indicam que o gasto de energia da biomassa para eliminação da umidade presente compromete o desempenho energético das mesmas. “Quanto maior o teor de umidade, menor será a quantidade de energia útil para o sistema de geração de energia (o calor latente de evaporação é perdido com os gases de combustão)” (BRAND, 2010, p. 31).

Em estudo com biomassa de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda* provenientes de processamento secundário em indústria madeireira, Menezes (2013 p. 33) encontrou teores de umidade de 11,34% e 11,30% respectivamente. Os valores obtidos foram inferiores aos encontrados neste trabalho devido ao tempo de estocagem e aos processos que a madeira foi submetida, sendo a desdobro da tora e posterior usinagem na plaina moldureira. Outro fator que pode ter contribuído para o baixo teor de umidade é a estocagem do material coletado em laboratório até a realização das análises.

GARCIA (2010, p. 68) analisou 4 marcas de pellets produzidas no Brasil, sendo 1 em São Paulo (P1), 2 no Paraná (P2 e P3) e 1 em Santa Catarina (P4). As espécies utilizadas na produção destes pellets não foram descritas, pois os produtos foram obtidos em embalagem comercial onde não constava a espécie utilizadas ou se eram provenientes de mistura de 2 ou mais espécies. No mesmo trabalho foram avaliados cavaco de pinus, casca de pinus e serragem de eucalipto. Os resultados do teor de umidade média dos pellets foram de 8,34% sendo semelhantes aos encontrados neste trabalho.

Ainda o mesmo autor encontrou valores para o teor de umidade do cavaco de pinus foi de 10,76%, para casca de pinus foi de 19,22% e para a serragem de eucalipto foi de 14,24%. Estes valores foram inferiores aos encontrados neste trabalho, devido ao processo de secagem primária ao ar livre em pátio de estocagem, ao qual estas biomassas foram submetidas.

Os valores do teor de materiais voláteis das amostras são visualizados na Tabela 2. Onde a madeira de *Pinus taeda* apresentou 89,92% enquanto a casca de *Araucaria angustifolia* foi de 67,84%.

Tabela 2. Teor de voláteis das amostras de Pellets e cavacos de *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* sem casca, Casca de *Pinus taeda*, Casca de *Araucaria angustifolia*, *Araucaria angustifolia* sem casca, *Pinus taeda* com casca.

| Tratamentos  | Voláteis (%) |
|--|--------------|
| Pellets  | 84,43 b      |
| Cavaco de <i>Eucalyptus grandis</i> com casca      | 85,71 b      |
| Cavaco de Madeira de <i>Pinus taeda</i>            | 89,92 a      |
| Cavaco de Casca de <i>Pinus taeda</i>              | 73,22 c      |
| Cavaco de <i>Pinus taeda</i> com casca             | 85,82 b      |
| Cavaco de Casca de <i>Araucaria angustifolia</i>   | 67,84 d      |
| Cavaco de Madeira de <i>Araucaria angustifolia</i> | 83,58 b      |

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: O autor, 2015.

Os resultados estão de acordo com Brand (2010, p. 28) que afirma que “o teor de materiais voláteis é inversamente proporcional ao teor de carbono fixo”. Isso se comprova na Tabela 3, que apresenta os valores do teste de correlação de Pearson, que demonstra que o carbono fixo é inversamente proporcional aos materiais voláteis ao nível de 1% de probabilidade. Ainda de acordo com Cortez; Lora; Gómez (2011, p. 48) Os voláteis têm um papel importante durante a ignição e as etapas iniciais de combustão de biomassa.

Tabela 3. Correlação de Pearson entre poder calorífico superior e química imediata de Pellets e cavacos de *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* sem casca, Casca de *Pinus taeda*, Casca de *Araucaria angustifolia*, *Araucaria angustifolia* sem casca, *Pinus taeda* com casca.

| VA/VA           | PCS | Carbono | Cinzas   | Voláteis |
|-----------------|-----|---------|----------|----------|
| <b>PCS</b>      | -   | 0,2550  | - 0,0101 | - 0,0543 |
| <b>Carbono</b>  | ns  | -       | 0,8356   | - 0,8208 |
| <b>Cinzas</b>   | ns  | **      | -        | - 0,8793 |
| <b>Voláteis</b> | ns  | **      | **       | -        |

\*\* valores significativos ao nível de 1% de probabilidade.

Fonte: O autor, 2015

Os materiais voláteis da madeira segundo Nogueira e Lora (2003, p. 43), “expressam a facilidade de se queimar um material”. Isso indica que a madeira de *Pinus taeda* tem maior facilidade de queima seguida do *Pinus taeda* com casca, *Eucalyptus grandis* com casca, madeira de *Araucaria angustifolia* e pellets.

Em trabalho com pellets de bagaço-de-cana, Almeida; Sola; e Behaine (2014, p. 8) encontraram valores para o teor de materiais voláteis de 77,27%. Já Barros (2013, p. 75) em experimento com 4 tipos de pellets, sendo 1 produzido a partir de serragem de *Pinus spp.* (SP), 1 a partir de granulado de cortiça (GC), 1 a partir de uma mistura de 70% de serragem de pinus e 30% de granulado de cortiça (70S-30G) e 1 a partir de uma mistura de 30% de serragem de pinus e 70% de granulado de cortiça (30S-70G). Foram obtidos os seguintes valores 72,1% para pellet (SP), 76,6% para pellet (GC), 73,1% para pellet (70S-30G) e 71,9% para pellet (30S-70G).

Os valores do teor de cinzas das amostras podem ser visualizados na Tabela 4. A casca de *Pinus taeda* e a casca de *Araucaria angustifolia* tiveram resultados semelhantes sendo 7,33169% e 7,01480% respectivamente. Estes valores encontrados são caracterizados pela presença de minerais na casca destas espécies. Segundo Vale et al. (2007, p. 418) “a quantidade de cinzas está diretamente relacionada com a quantidade e qualidade de minerais presentes na biomassa, como cálcio, potássio, fósforo, magnésio, ferro e sódio, que provocam redução nos teores de carbono fixado”.

Tabela 4. Teor de cinzas das amostras de Pellets e cavacos de *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* sem casca, Casca de *Pinus taeda*, Casca de *Araucaria angustifolia*, *Araucaria angustifolia* sem casca, *Pinus taeda* com casca.

| Tratamentos  | Cinzas (%) |
|--|------------|
| Pellets  | 0,47 c     |
| Cavaco de <i>Eucalyptus grandis</i> com casca      | 0,60 bc    |
| Cavaco de madeira de <i>Pinus taeda</i>            | 0,60 bc    |
| Cavaco de Casca de <i>Pinus taeda</i>              | 7,33 a     |
| Cavaco de <i>Pinus taeda</i> com casca             | 1,57 b     |
| Cavaco de Casca de <i>Araucaria angustifolia</i>   | 7,01 a     |
| Cavaco de Madeira de <i>Araucaria angustifolia</i> | 0,85 bc    |

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: O autor, 2015.

O pellet, a madeira de *Pinus taeda*, *Eucalyptus grandis*, e a madeira de *Araucaria angustifolia* não apresentaram diferença significativa no teor de cinzas ao nível de 5% de probabilidade.

Balonne (2009, p. 32), em estudo com *Pinus elliottii*, encontrou valores do teor de cinzas de 0,41% semelhante aos valores observados neste trabalho com *Pinus taeda*.

O teor de cinzas de uma biomassa indica a quantidade de resíduos inorgânicos que vão sobrar ao final da queima da mesma. Isto significa que o produtor ao utilizar a casca de pinus e araucária na geração de energia terá que fazer a retirada deste material com mais frequência do queimador e dar o destino correto.

A tabela 5 apresenta os valores de carbono fixo das amostras. Os maiores teores de carbono foram a casca de *Araucaria angustifolia* com resultados iguais a 25,14%, seguido da casca de *Pinus taeda* com 19,45%. Os resultados de carbono fixo tanto da casca de *Araucaria angustifolia* quanto *Pinus taeda*, foram em média 10% maior que o teor de carbono fixo da madeira destas espécies. A casca segundo BOM (2011, p. 2) “tem como função proteger o vegetal contra o ressecamento, ataques fúngicos, injúrias mecânicas e variações climáticas”, isto pode explicar o maior teor de carbono fixo nas cascas.

Tabela 5. Teor de carbono fixo das amostras de Pellets e cavacos de *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* sem casca, Casca de *Pinus taeda*, Casca de *Araucaria angustifolia*, *Araucaria angustifolia* sem casca, *Pinus taeda* com casca.

| Tratamentos  | Carbono fixo (%) |
|--|------------------|
| Pellets  | 15,10 c          |
| Cavaco de <i>Eucalyptus grandis</i> com casca      | 13,69 c          |
| Cavaco de Madeira de <i>Pinus taeda</i>            | 9,48 d           |
| Cavaco de Casca de <i>Pinus taeda</i>              | 19,45 b          |
| Cavaco de <i>Pinus taeda</i> com casca             | 12,61 cd         |
| Cavaco de Casca de <i>Araucaria angustifolia</i>   | 25,14 a          |
| Cavaco de Madeira de <i>Araucaria angustifolia</i> | 15,58 c          |

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: O autor, 2015.

A madeira de *Pinus taeda* apresentou teor de carbono fixo de 9,48% seguido do *Pinus taeda* com casca com 12,61%. O *Pinus taeda* com casca por ser proveniente das ponteiros das árvores, com diâmetro máximo de 10 cm que é basicamente formada por lenho juvenil, o que influencia na composição da biomassa.

Outro dado importante é a diferença significativa do teor de carbono fixo entre a madeira de *Pinus taeda* e o pellet que é proveniente da mesma matéria prima, sendo 37,18% maior no pellet. Isto se deve a temperatura que ocorre o processo de peletização. Segundo Carvalho (2013) “no processo de prensagem é necessário aquecer a serragem até temperaturas da ordem de 120 – 130 °C”, e com isso pode ocorrer a liberação de materiais voláteis da madeira. Esta variação pode ser observada na Tabela 2.

Em trabalho com 43 tipos de biomassa de diferentes espécies da Amazônia sendo espécies madeiras, cascas de árvores, cascas de côco, fibras de côco, cascas de palmeiras e etc. Netto et al. (2006, p. 7) observou valores médios de teor de voláteis iguais a 80,06%, a espécie com o maior teor de voláteis foi o Melancieiro com 93,87% e o menor foi o Angelim com 70%.

No mesmo trabalho o teor de carbono fixo médio foi de 17,77% a biomassa com o maior teor de carbono fixo foi a casca de Castanha do Pará e a espécie que apresentou o menor teor foi o Melancieiro com 5,35%. O teor de cinzas médio foi de 2,17%. A espécie com maior teor de cinzas foi o Angelim com 14,85% e o menor valor foi a *Dinizia excelsa* (Angelim Vermelho) com 0,05%.

## 5.2. PODER CALORÍFICO

A tabela 6 apresenta os dados do poder calorífico superior das amostras. As biomassas que apresentaram maior PCS foram o pellet, a madeira de *Pinus taeda* e casca de *Araucaria angustifolia*.



Tabela 6. Poder calorífico superior das amostras de Pellets e cavacos de *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* sem casca, Casca de *Pinus taeda*, Casca de *Araucaria angustifolia*, *Pinus taeda* com casca.

| Tratamentos                                      | PCS (Kcal/kg) |
|--|---------------|
| Pellets  | 4 589 b       |
| Cavaco de <i>Eucalyptus grandis</i> com casca    | 4 237 a       |
| Cavaco de Madeira de <i>Pinus taeda</i>          | 4 496 b       |
| Cavaco de Casca de <i>Pinus taeda</i>            | 4 251 a       |
| Cavaco de <i>Pinus taeda</i> com casca           | 4 241 a       |
| Cavaco de Casca de <i>Araucaria angustifolia</i> | 4 564 b       |

As médias seguidas da mesma letra, não diferem estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade.

Fonte: O autor, 2015.

Os fatores que influenciam o poder calorífico da biomassa são a composição química e tipo de biomassa, teor de umidade e teor de cinzas afirma (BRAND, 2010, p. 39). Isso explica a diferença entre o poder calorífico entre a casca e madeira de *Pinus taeda*.

Em trabalho realizado com pellet produzido a partir de bagaço de cana-de-açúcar, Almeida; Sola; Behaine (2014, p. 8) verificaram valores de poder calorífico de 4384 Kcal/Kg. Já Garcia (2010 p. 71) observou valores para 4 tipos de pellets comercializados sendo 4492 Kcal/Kg para P1; 4635 Kcal/Kg para P2; 4569 Kcal/kg para P3 e 4468 Kcal/Kg para P4, sendo semelhantes aos deste trabalho.

Trabalhando com maravalha de *Araucaria angustifolia* e *Pinus spp.* Menezes (2013, p. 38) encontrou valores de 4136 Kcal/Kg e 4115 Kcal/Kg respectivamente. O valor encontrado para o *Pinus spp.* foi menor que o encontrado neste trabalho, isto pode ter ocorrido por se tratar de outra espécie. Balloni (2009, p. 32) em trabalho realizado com madeira de *Pinus elliottii* encontrou valores para o poder calorífico de 4322 Kcal/Kg sendo semelhante aos encontrados para o *Pinus taeda*.

### 5.3 CUSTOS DE GERAÇÃO

Os valores do poder calorífico superior determinados em laboratório, do poder calorífico inferior e poder calorífico líquido das amostras estimados com as equações propostas, podem ser visualizados na tabela 7.

Tabela 7. Poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico líquido (PCL) das amostras de Pellets e cavacos de *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* sem casca, Casca de *Pinus taeda*, Casca de *Araucaria angustifolia*, *Araucaria angustifolia* sem casca, *Pinus taeda* com casca.

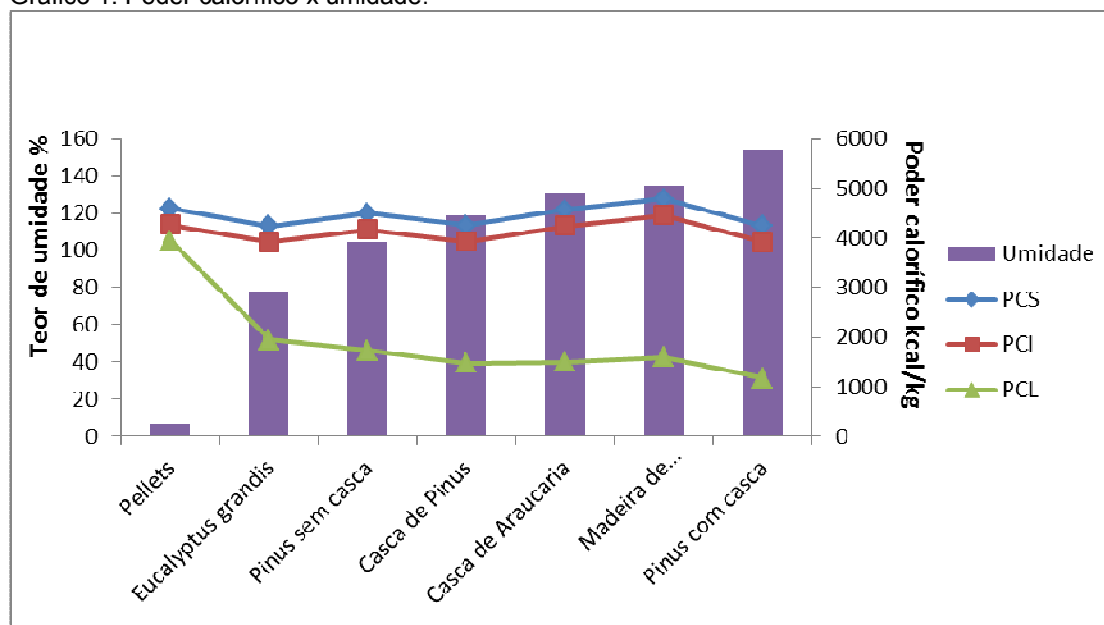
| <b>Tratamentos</b>                            | <b>PCS</b>     | <b>PCI</b>     | <b>PCL</b>     |
|---|----------------|----------------|----------------|
|   | <b>kcal/kg</b> | <b>kcal/kg</b> | <b>kcal/kg</b> |
| Pellets                                       | 4 589 b        | 4265 a         | 3943 a         |
| Cavaco de <i>Eucalyptus grandis</i> com casca | 4 237 a        | 3912 b         | 1947 b         |
| Cavaco madeira de <i>Pinus taeda</i>          | 4 496 b        | 4172 a         | 1733 c         |
| Cavaco casca de <i>Pinus taeda</i>            | 4 251 a        | 3927 b         | 1471 d         |
| Cavaco <i>Pinus taeda</i> com casca           | 4 241 a        | 3917 b         | 1174 e         |
| Cavaco casca de <i>Araucaria angustifolia</i> | 4 564 b        | 4240 a         | 1501 d         |

As médias seguidas da mesma letra, não diferem estatisticamente ao nível de 5 % de probabilidade.  
Fonte: O autor, 2015.

Analisando os dados da Tabela 7, observamos através do teste de médias que a umidade diminuiu significativamente o poder calorífico das biomassas *in natura*. O pellet apresentou maior poder calorífico líquido dentre todas as biomassas estudadas diferindo estatisticamente entre todas. O cavaco de *Pinus taeda* com casca apresentou menor poder calorífico líquido, isso se justifica, pois apresentou maior teor de umidade dentre as biomassas estudadas como pode ser visto na Tabela 1. Brand (2010, p. 31) relata que “quanto maior o teor de umidade, menor será a quantidade de energia útil para o sistema de geração de energia”.

Com relação ao poder calorífico líquido observamos no Gráfico 1, o comportamento em relação a umidade da biomassa, demonstrando que o PCL é inversamente proporcional a umidade.

Gráfico 1. Poder calorífico x umidade.



Fonte: O autor, 2015.

O preço unitário dos combustíveis pode ser observado na Tabela 8. Os preços foram levantados com pesquisa de mercado, identificando o preço médio de cada combustível.

Tabela 8. Preço dos combustíveis tomado com pesquisa de mercado na região sudoeste do Paraná.

| Combustível                                   | Unidade | Preço R\$ |
|---|---------|-----------|
| Pellets                                       | Kg      | 0,435     |
| Cavaco de <i>Eucalyptus grandis</i> com casca | Kg      | 0,09      |
| Cavaco madeira de <i>Pinus taeda</i>          | Kg      | 0,065     |
| Cavaco casca de <i>Pinus taeda</i>            | Kg      | 0,03      |
| Cavaco <i>Pinus taeda</i> com casca           | Kg      | 0,08      |
| Cavaco casca de <i>Araucaria angustifolia</i> | Kg      | 0,02      |
| Energia elétrica                              | Kwh     | 0,74      |
| GLP   | Kg      | 5,00      |
| Diesel  | Kg      | 3,10      |

Fonte: O autor, 2015.

Os custos de geração de energia térmica de cada combustível em relação ao seu custo unitário, poder calorífico útil para as biomassas e poder calorífico

inferior no caso dos combustíveis fósseis, são visualizados na tabela 9. O cálculo foi realizado com base no consumo de 100000 kcal por hora de funcionamento. Consistindo em determinar a quantidade necessária de cada combustível para gerar 100000 kcal e posterior multiplicação pelo seu preço unitário.

Tabela 9. Custo de geração de energia de cada combustível.

| <b>Combustíveis</b>                           | <b>PCL<br/>kcal/kg</b> | <b>Custo<br/>Ud<br/>R\$/kg</b> | <b>Quant.<br/>Combustível<br/>Kg</b> | <b>Custo<br/>R\$/hr</b> |
|---|------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Pellets                                       | 3943                   | 0,435                          | 25,35                                | 11,03                   |
| Cavaco <i>Eucalyptus grandis</i> com casca    | 1948                   | 0,09                           | 51,33                                | 4,62                    |
| Cavaco de <i>Pinus taeda</i> sem casca        | 1733                   | 0,065                          | 57,70                                | 3,75                    |
| Cavaco de casca de <i>Pinus taeda</i>         | 1470                   | 0,03                           | 67,98                                | 2,03                    |
| Cavaco de <i>Pinus taeda</i> com casca        | 1173                   | 0,08                           | 85,19                                | 6,81                    |
| Cavaco casca de <i>Araucaria angustifolia</i> | 1500                   | 0,02                           | 66,63                                | 1,33                    |
| Energia elétrica                              | 860                    | 0,74                           | 116,27                               | 86,73                   |
| GLP   | 11100                  | 5,00                           | 9,00                                 | 45,04                   |
| Diesel  | 10100                  | 3,10                           | 9,90                                 | 30,69                   |

Fonte: O autor, 2015.

É importante ressaltar que o preço da biomassa pode variar conforme a distância a ser transportada. Em alguns casos o valor do transporte pode ser maior que o custo da biomassa.

O menor custo de geração de calor foi da casca de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda*, isso se deve ao baixo preço praticado na venda destes materiais. Um dos fatores que reduzem o consumo deste tipo de biomassa é a geração de cinzas ao final da sua queima, nas análises realizadas com o material constatamos um percentual de 7,33 % para o pinus e 7,01% para araucária como pode ser visualizado da Tabela 4, fator que dificulta seu manuseio pós queima.

O pellet foi a biomassa que apresentou maior custo de geração, em contrapartida é o único que apresenta uniformidade na sua granulometria, umidade e durabilidade. A secagem forçada lhe corresponde maior resistência à deterioração por ataque de fungos ou decomposição. Outra vantagem do pellet é a que sua venda é feita em sacos plásticos selados ou big bags que se mantidos em local seco lhe proporcionam maior tempo de estocagem.

A limpeza e organização do estoque é outro ponto positivo em relação ao uso de pellets. Os pacotes podem ser estocados de forma organizada sem causar sujeira ou transtornos, evitando grandes quantidades de biomassa estocada, pois requereriam pátios com grandes áreas, além de atrair animais.

Dentre todos os combustíveis estudados a energia elétrica apresentou maior custo na geração de energia térmica, tendo custo superior aos outros combustíveis, o que a torna quase inviável para produção de calor.

O diesel e o GLP apresentaram valores inferiores a energia elétrica, mas muito superiores aos da biomassa. Em relação ao pellet, o custo do diesel é 1242,5% mais caro. Já o GLP tem custo 1823,4% maior que o pellet. Isso demonstra a viabilidade de uso do pellet em sistemas de queima para aquecimento em agroindústrias, comércios, residências e produtores rurais, substituindo estes combustíveis.

A questão de segurança é outro ponto positivo no uso da biomassa como combustível, pois não tem risco de explosão, vazamentos de gases tóxicos ou combustão instantânea como os combustíveis fósseis.

A utilização da biomassa na geração de energia térmica é menos agressiva para o meio ambiente, pois ao sofrer a queima completa é liberado somente CO<sub>2</sub> e água para o ambiente.

## 6.0 CONCLUSÃO

Houve diferença na composição química imediata das espécies e nas diferentes partes da árvore, como a casca e a madeira e essa característica tem influência no poder calorífico da biomassa.

O poder calorífico superior e inferior apresentou variação entre as biomassas estudadas, tendo como influência sua composição química. Já o poder calorífico líquido teve grande variação devido a grande variação do teor de umidade das amostras.

O consumo de biomassa para geração de energia térmica é maior em comparação com o diesel, GLP e energia elétrica, exigindo grandes volumes do material para gerar a mesma quantidade de energia. Este motivo pode ser um dos empecilhos do uso de biomassa *in natura* em pequenos comércios, residências ou pequenas indústrias. Entretanto o pellet surge como uma alternativa viável, pois é

comercializado em pacotes selados que evitam sujeira e podem ser estocados por longos períodos sem perda de qualidade.

Com base nos dados concluímos que o uso da biomassa é viável economicamente, ambientalmente e socialmente, pois tem custo inferior quando comparada com energia elétrica, diesel e GLP, é menos agressiva ao meio ambiente e promove a geração de riquezas nas regiões onde é produzida, já que este tipo de combustível é consumido geralmente na região produtora criando uma cadeia de geração de renda.

Através das análises podemos concluir que a pelletização melhora as características energéticas da biomassa, pois aumentou seu poder calorífico superior, inferior e líquido padronizando as partículas de biomassa em dimensões e umidade facilitando seu manuseio e transporte e garantindo ao consumidor maior carga energética.

## 7.0. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Leonardo F. P.; SOLA, Antonio V. H.; BEHAINNE, Jhon J. R. (**Análise físico-química do produto e processo de pelletização da biomassa bagaço de cana-de-açúcar**). 2014. Disponível em: <file:///C:/Users/anderson/Downloads/01411247361%20(2).pdf>. Acesso em 12 de Maio de 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Análise química imediata do carvão vegetal, NBR 8112**. 1986. Disponível em: <http://www.abntcatalogo.com.br>. Acesso em 25 de Maio de 2015.

\_\_\_\_\_. **Determinação do poder calorífico superior, NBR 8633**. 1984. Disponível em: <http://www.abntcatalogo.com.br>. Acesso em 25 de Maio de 2015.

\_\_\_\_\_. **Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa, NBR 14929**. 2003. Disponível em: <http://www.abntcatalogo.com.br>. Acesso em 25 de Maio de 2015.

BALLONI, Carlos J. V. **Caracterização física e química da madeira de *pinus elliottii***, 2006. Trabalho de conclusão de curso Engenharia Industrial Madeireira. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Itapeva, São Paulo, 2009.

BARCELOS, Bernardo da R. **Análise da substituição de gás liquefeito de petróleo por gás natural em um condomínio residencial.** 2011. Dissertação Mestrado em engenharia mecânica - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2011.

BARROS, Carla. S. A. **Produção de Pellets para valorização de resíduos provenientes da indústria corticeira.** 2013. Disponível em: <[http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/28198/1/tese\\_Carla%20Barros\\_2013.pdf](http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/28198/1/tese_Carla%20Barros_2013.pdf)>. Acesso em 13 de Maio de 2015.

BOM Pedro, R. **Estrutura da madeira.** União da Vitória, 2011. Disponível em: <<http://engmadeira.yolasite.com/resources/Estrutura%20da%20madeira.pdf>>. Acesso em 04 de Novembro de 2015.

BRAND Martha A. **Energia de biomassa florestal.** Rio de Janeiro: Interciência 2010.

BRAUN, Silvana; APPEL, Lucia G.; SCHMAL, Martin. A poluição gerada por máquinas de combustão interna movidas à diesel - a questão dos particulados. Estratégias atuais para a redução e controle das emissões e tendências futuras. **Revista Química Nova** v. 27, n. 3, p. 472-482, 2003.

BRITO, José O.; BARRICHELO, Luiz E. G.; usos diretos e propriedades da madeira para geração de Energia. **Circular técnica nº 52 junho/1979.** Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr052.pdf>>. Acesso em 2 Maio de 2015.

CARVALHO Natércia P. R. **Implementação do plano de controlo, inspeção e Ensaio na produção de pellets de madeira.** 2011. Dissertação mestrado em Tecnologias Ambientais. Disponível em: <<http://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/1116/1/Mestrado%20Tecnologias%20Ambientais.pdf>>. Acesso em 12 de Maio de 2015.

CARVALHO, Joaquim F. Combustíveis fósseis e insustentabilidade. **Ciência e Cultura.** São Paulo v.60 n. 3, p. 30-33, Setembro, 2008. Disponível em <[http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?pid=S000967252008000300011&script=sci\\_arttext](http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?pid=S000967252008000300011&script=sci_arttext)>. Acesso em 23 de Maio de 2015.

CONSUFOR. **Viabilidade econômica da produção de pellets de madeira no Brasil para exportação 2010.** Disponível em: <<http://intranet.gvces.com.br/cms/arquivos/viabilidade.pdf>>. Acesso em 24 de Fevereiro de 2015.

CORTEZ, Luis A. B.; LORA, Electo E. S.; GOMEZ, Edgardo O. **Biomassa para energia**. Campinas, Unicamp, 2008.

COSTA, Daniel J. A. **Aplicação de conceitos da análise econômica financeira de investimentos em uma cafeteria** 2012. Trabalho de conclusão de curso – MBA em Gestão Empresarial - Fundação Getúlio Vargas. Disponível em: <file:///C:/Users/anderson/Downloads/aplicacao-de-conceitos-da-analise-economica-financeira-de-investimentos-em-uma-cafeateria.pdf>. Acesso em 07 de Maio de 2015.

ECONOMIABR. Dicionário de economia – Análise econômica 2015. Disponível em: <[http://www.economiabr.net/dicionario/economes\\_a.html](http://www.economiabr.net/dicionario/economes_a.html)>. Acesso em 14 de Maio de 2015.

EN PLUS. **ISO 18134: Solid biofuels - Determination of moisture content**. Disponível em: <[http://www.enplus-pellets.eu/wp-content/uploads/2015/07/ENplusHandbook\\_part3\\_V3.0\\_PelletQuality\\_EPCinternational.pdf](http://www.enplus-pellets.eu/wp-content/uploads/2015/07/ENplusHandbook_part3_V3.0_PelletQuality_EPCinternational.pdf)>. Acesso em 08 de novembro de 2015.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética) 2014. **Balço energético nacional 2013**. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2014.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf)>. Acesso em 10 de Maio de 2015.

FEREIRA, Juliana C.; FURTADO, Thielly S.; NEVES, Márcio D.; BRAND, Martha A. **Influência do teor de umidade no poder calorífico em diferentes idades e componentes de árvores de Pinus taeda**. 2007. Disponível em: <<http://www.solumad.com.br/artigos/201011171820051.pdf>>. Acesso em 28 de Maio de 2015.

FERREIRA, Sérgio L; DOS SANTOS, Antônio M.; DE SOUZA, Gustavo R.; POLITO, Wagner L.; MÓDOLO, Délson L. Análise por cromatografia gasosa de btex nas emissões de motor de combustão interna alimentado com diesel e mistura diesel-biodiesel (b10). **Química Nova**. v. 31, n. 3, p. 539-545, 2008.

GONÇALVES FILHO, Aurélio; TOSCANO, Carlos. **Física**. São Paulo: Scipione, 2008.

GARCIA, Dorival P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. 2010. Disponível em: <[http://www.itapeva.unesp.br/Home/Posgraduacao/EngenhariaMecanica/garcia\\_dp\\_me\\_guara\\_prot.pdf](http://www.itapeva.unesp.br/Home/Posgraduacao/EngenhariaMecanica/garcia_dp_me_guara_prot.pdf)>. Acesso em 15 de Maio de 2015.

GUIMARÃES João R. P. De F. **Toxicologia das emissões veiculares de diesel: um problema de saúde ocupacional e pública, 2004**. Disponível em:



<[http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/trabalhador/pdf/texto\\_toxicologia.pdf](http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/trabalhador/pdf/texto_toxicologia.pdf)>. Acesso em 22 de Maio de 2015.

MAZZUCO, Lilian M. **Atenuação natural de hidrocarbonetos aromáticos em aquíferos contaminados com óleo diesel**. 2004. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MENEZES, Marta J. S. **Poder calorífico e análise imediata da maravalha de pinus (*pinus sp*) e araucária (*Araucaria angustifolia*) de reflorestamento como resíduos de madeira**. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013.

MESQUITA, Marcelo. **Análise da Viabilidade de Empreendimentos 2015**. Disponível em: <<http://www.gerenciamento.ufba.br/MBA%20Disciplinas%20Arquivos/Viabilidade/Resumo%20de%20A.I..pdf>>. Acesso em 10 de Maio de 2015.

MIGLIORINI Antonio J. Desinficação de biomassa florestal. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v.1, n.2, p.C.1 – C.9, Jul.1980. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/stecnica/nr02/cap03.pdf>>. Acesso em 4 de Maio de 2015.

MULLER, Marcelo D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em itamarandiba, mg 2005**. Tese (Doutorado em ciência florestal) – Faculdade de engenharia florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

NETTO, Genésio B. F.; OLIVEIRA, Antonio G. P.; COUTINHO, Hebert W. M.; NOGUEIRA, Manoel F. M.; RENDEIRO, Gonçalo. Caracterização energética de biomassas amazônicas. 6º Encontro de Energia Meio Rural, 2006. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n6v1/035.pdf>>. Acesso em 04 de Novembro de 2015.

NOGUEIRA, Luiz A. H.; LORA, Electo E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro, Interciência, 2003.

PEREIRA, Enio B.; COLLE, Sérgio. **A energia que vem do Sol**. 1997. Disponível em: <[www.fisica.uems.br/arquivos/fismeioamb/energia\\_solar.doc](http://www.fisica.uems.br/arquivos/fismeioamb/energia_solar.doc)>. Acesso em 28 de Maio de 2015.

PROTÁSSIO, Thiago P.; BUFALINO, Lina; TONOLI, Gustavo H. D.; COUTO, Allan M.; TRUGUILHO, Paulo f.; JUNIOR, Mário G. Relação entre o poder calorífico

superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 113-122, abr/jun, 2011.

RIBEIRO, Ivano e VICARI, Cristian C. **Análise de Viabilidade Econômica para Secagem de Milho com Gás Liquefeito de Petróleo**. 2005. Disponível em <<http://www.unioeste.br/campi/cascavel/ccsa/IVSeminaro/IVSeminaro/Artigos/07.pdf>>. Acesso em 23 de Maio de 2015.

SILVA, Ana M. N.; ALBUQUERQUE, José de L.; SILVA, Elizandro S.; FILHO, Demorval S.; BARBOSA, Waldinilson B. **A biomassa florestal (lenha) como insumo energético para os artesãos da cidade de Tracunhaém/Pe**. 2009. Disponível em: <<http://www.custoseagronegocioonline.com.br/numero3v4/biomassa%20florestal.pdf>>. Acesso em 13 de Maio de 2015.

SOARES, Thelma. S.; CARNEIRO, Angélica de C. O.; GONÇALVES, Elzimar de O.; LELLES, José de G. **Uso da biomassa florestal na geração de energia**. 2006. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/florestal1\\_000gapwcajw02wx5ok04xjloyxd3fpu2.pdf](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/florestal1_000gapwcajw02wx5ok04xjloyxd3fpu2.pdf)>. Acesso em 14 de Maio de 2015.

SOUZA, Marina S. **Caracterização e viabilidade econômica do uso energético de resíduos da colheita e do processamento de pinus taeda I**. Dissertação (Mestrado tecnologia da madeira) - Departamento de Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

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**, Karlstad, Sweden, v. 27, n. 6, p. 621-628, December 2004.

VALE, Ailton T.; GENTIL, Luiz V.; GONÇALEZ, Joaquim C.; COSTA, Alexandre F. C. Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café (*Coffea arabica*, L) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*), Duke. **REVISTA CERNE**, vol. 13, núm. 4, outubro-dezembro, 2007, pp. 416-420. Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil.

VIEIRA Ana C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Pós-Graduação em energia na agricultura. - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

## Anexos

## Anexo 1. Tabela com fatores de conversão de GLP e diesel para Kcal/kg.

**FATORES DE CONVERSÃO, DENSIDADES E PODERES CALORÍFICOS INFERIORES**

Valores médios para o ano de 2011

| Produtos e unidades                    | Fator de conversão das unidades para bep | Densidade <sup>1</sup> (t/m <sup>3</sup> ) | Poder calorífico inferior (kcal/kg) |        |
|--|--|--|-------------------------------------|--------|
| Etanol Anidro                          | m <sup>3</sup>                           | 3,841                                      | 0,79100                             | 6.750  |
| Etanol Hidratado                       | m <sup>3</sup>                           | 3,666                                      | 0,80900                             | 6.300  |
| Asfaltos                               | m <sup>3</sup>                           | 7,219                                      | 1,02500                             | 9.790  |
| Biodiesel (B100)                       | m <sup>3</sup>                           | 5,698                                      | 0,88000                             | 9.000  |
| Coque Verde de Petróleo                | m <sup>3</sup>                           | 6,277                                      | 1,04000                             | 8.390  |
| Gás Natural Seco                       | 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>           | 4,685                                      | 0,00074                             | 8.800  |
| Gás Natural Úmido                      | 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>           | 5,286                                      | 0,00074                             | 9.930  |
| Gases Combustíveis de Refinaria        | 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>           | 4,714                                      | 0,00078                             | 8.400  |
| Gasolina A                             | m <sup>3</sup>                           | 5,552                                      | 0,74200                             | 10.400 |
| Gasolina C                             | m <sup>3</sup>                           | 5,535                                      | 0,75425                             | 10.200 |
| Gasolina de Aviação                    | m <sup>3</sup>                           | 5,536                                      | 0,72600                             | 10.600 |
| GLP                                    | m <sup>3</sup>                           | 4,408                                      | 0,55200                             | 11.100 |
| LGN                                    | m <sup>3</sup>                           | 4,469                                      | 0,58000                             | 10.710 |
| Nafta                                  | m <sup>3</sup>                           | 5,368                                      | 0,70200                             | 10.630 |
| Óleo Combustível Marítimo              | m <sup>3</sup>                           | 6,989                                      | 1,01300                             | 9.590  |
| Óleo Diesel                            | m <sup>3</sup>                           | 6,191                                      | 0,85200                             | 10.100 |
| Óleos Combustíveis <sup>2</sup>        | m <sup>3</sup>                           | 6,989                                      | 1,01300                             | 9.590  |
| Óleos Lubrificantes                    | m <sup>3</sup>                           | 6,370                                      | 0,87500                             | 10.120 |
| Outros Energéticos                     | m <sup>3</sup>                           | 6,340                                      | 0,86400                             | 10.200 |
| Outros não Energéticos                 | m <sup>3</sup>                           | 6,340                                      | 0,86400                             | 10.200 |
| Parafinas                              | m <sup>3</sup>                           | 6,141                                      | 0,82000                             | 10.410 |
| Petróleo Importado                     | m <sup>3</sup>                           | 6,229                                      | 0,84976                             | 10.190 |
| Petróleo Nacional (Mar e Terra)        | m <sup>3</sup>                           | 6,484                                      | 0,88445                             | 10.190 |
| Petróleo Nacional Exportado (Marítimo) | m <sup>3</sup>                           | 6,562                                      | 0,89516                             | 10.190 |
| QAV                                    | m <sup>3</sup>                           | 5,978                                      | 0,79900                             | 10.400 |
| Querosene Iluminante                   | m <sup>3</sup>                           | 5,978                                      | 0,79900                             | 10.400 |
| Solventes                              | m <sup>3</sup>                           | 5,624                                      | 0,74100                             | 10.550 |

Fonte: ANP/SPP.  
<sup>1</sup> À temperatura de 20 °C e 1 atm para os derivados de petróleo e de gás natural.  
<sup>2</sup> Óleos combustíveis ATE e BTE.

Fonte: ANP – Agência nacional do petróleo, 2015.

## Anexo 2. Tabela com fatores de conversão de energia elétrica em cal.

| de » para                              | Multiplicar por         |                         |                         |                          |                          |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
|  | J                       | Btu                     | cal                     | kWh                      | tep                      |
| joule (J)                              | 1,0                     | 947,8 x 10 <sup>6</sup> | 0,23884                 | 277,7 x 10 <sup>6</sup>  | 2,388 x 10 <sup>11</sup> |
| British Thermal Unit (Btu)             | 1,055 x 10 <sup>3</sup> | 1,0                     | 252,0                   | 293,07 x 10 <sup>6</sup> | 2,52 x 10 <sup>9</sup>   |
| caloria (cal)                          | 4,1868                  | 3,968 x 10 <sup>3</sup> | 1,0                     | 1,163 x 10 <sup>6</sup>  | 10 <sup>10</sup>         |
| quilowatt-hora (kWh)                   | 3,6 x 10 <sup>6</sup>   | 3.412,0                 | 860,0 x 10 <sup>3</sup> | 1,0                      | 8,6 x 10 <sup>5</sup>    |
| tonelada equivalente de petróleo (tep) | 41,87 x 10 <sup>9</sup> | 39,68 x 10 <sup>6</sup> | 10,0 x 10 <sup>6</sup>  | 11,63 x 10 <sup>6</sup>  | 1,0                      |

Exemplo de utilização: 1 J = 277,7 x 10<sup>6</sup> kWh

Fonte: ANEEL – Agência nacional de energia elétrica, 2015.