

**UNIVERSIDADE DE UBERABA  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**PALOMA SILVA NEIVA**

**CAPACIDADE TÉRMICA E PODER CALORÍFICO DE BIOMASSA**

**UBERABA - MG**

**2018**

**PALOMA SILVA NEIVA**

**CAPACIDADE TÉRMICA E PODER CALORÍFICO DE BIOMASSA**

Trabalho de conclusão do curso de graduação apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade de Uberaba como requisito para a obtenção do título de graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer

UBERABA - MG

2018

**PALOMA SILVA NEIVA**

**CAPACIDADE TÉRMICA E PODER CALORIFICO DE BIOMASSA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao curso de Engenharia Química da  
Universidade de Uberaba como requisito para a obtenção do título de graduação em  
Engenharia Química.

Áreas de concentrações: Operações Unitárias.

Aprovado em: \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

UNIVERSIDADE DE UBERABA

---

UNIVERSIDADE DE UBERABA

---

UNIVERSIDADE DE UBERABA

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço minha família e meus amigos por todo o carinho, amor e força. Sou grata, especialmente, a minha mãe, Simone que tanto lutou pela minha educação e nunca me deixou perder a fé. Obrigada, Letícia, minha irmã querida, por me ouvir e ser meu abrigo nos momentos difíceis. Agradeço com todo amor ao meu namorado Diego, que jamais me negou apoio, carinho e incentivo. Agradeço também a empresa Duratex S.A. de Uberaba-MG divisão painéis e a seu representante Mário Celso Martins por acreditar e nos proporcionar a oportunidade de realizar esse trabalho. E por fim sou muita grata também ao Finzer, responsável pela orientação do meu projeto; muito obrigado por esclarecer tantas dúvidas e ser tão atencioso e paciente.

## RESUMO

A utilização de energia desde sua forma primária é vista desde os primórdios da humanidade. Com avanço tecnológico, aumento da produtividade e com isso também de consumo viu-se que é necessário o desenvolvimento de formas alternativas de energia, como as fontes renováveis, que tornam os processos sustentáveis. A biomassa é amplamente utilizada como forma de geração de energia em diversas indústrias, sendo ela na maioria de sua parte um subproduto ou resíduo, ela é reaproveitada para geração de energia tornando uma forma sustentável para vários processos. A biomassa de madeira pode ser encontrada em forma de lenha, cavaco, tabique, casca ou painéis de madeira reconstituída é uma forma extremamente eficaz de se obter energia através da queima. Nas análises foram levados em consideração cinco tipos de biomassas, o cavaco de eucalipto, casca de eucalipto, chapa de MDP triturada, chapa de MDF triturada e pó de MDP e MDF proveniente de lixamento de chapas. Para queima eficiente é necessário equacionar a reação de combustão e verificar através dos coeficientes estequiométricos (previamente definidos através de uma análise elementar) a quantidade ar necessária para combustão completa desse material, definindo a relação de ar e combustível já calculando o ar em excesso que deverá ser utilizado para que mesmo que apresente perdas seja completa. Também é de extrema importância determinar o poder calorífico da biomassa em questão para verificar o potencial de geração de energia desse material e com isso validar se é viável essa queima. Para biomassa cavaco de eucalipto a relação ar/combustível calculada estequiometricamente foi 5,41 kg/kg e o poder calorífico superior 16,46 MJ/kg, para a casca de eucalipto a relação foi de 5,78 kg/kg e o PCS 13,92 MJ/kg, chapa de MDF triturada a relação 6,02 kg/kg e o PCS 21,50 MJ/kg, chapa de MDP triturada 5,73 kg/kg e PCS 21,07 MJ/kg e para o Pó de MDP e MDF a relação 5,82 kg/kg e o PCS 19,03 MJ/kg. Foram realizadas análises experimentais do poder calorífico para comparação com os valores teóricos.

**Palavras chave:** Biomassa, Eucalipto, Cavaco, Casca, Pannel, Poder calorífico, PCI.

## ABSTRACT

The use of energy from its primary form has been seen since the beginnings of mankind. With advances in technology, increased productivity and with this also of consumption, it has become necessary to develop alternative forms of energy, such as renewable sources, that make processes sustainable. Biomass is widely used as a form of energy generation in several industries, most of it being a by-product or waste, it is reused for power generation making it a sustainable way for various processes. Wood biomass can be found in the form of firewood, chip, septum, bark or panels of reconstituted wood is an extremely effective way of obtaining energy through burning. Five types of biomass were analyzed: eucalyptus, eucalyptus bark, crushed MDP, shredded MDF and powder of MDP and MDF from sheet sanding. For efficient burning it is necessary to equate the combustion reaction and to verify through the stoichiometric coefficients (previously defined through an elementary analysis) the quantity of air necessary for complete combustion of this material, defining the ratio of air and fuel already calculating the excess air that should be used so that even if it presents losses it is complete. It is also of extreme importance to determine the calorific value of the biomass in question to verify the potential of energy generation of this material and with that to validate if this burning is feasible. For eucalyptus biomass the air / fuel ratio calculated stoichiometrically was 5.41 kg / kg and the calorific value was 16.46 MJ / kg, for the eucalyptus bark the ratio was 5.78 kg / kg and PCS 13 , 92 MJ / kg, MDF sheet comminuted at 6.02 kg / kg and PCS 21.50 MJ / kg, MDP shredded 5.73 kg / kg and PCS 21.07 MJ / kg and for Powder of MDP and MDF at a ratio of 5.82 kg / kg and PCS 19.03 MJ / kg. Experimental analyzes of calorific power were performed for comparison with theoretical values.

**Keywords:** Biomass, Eucalyptus, Cavaco, Bark, Panel, Heat power, PCI.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema simplificado do ciclo do carbono .....	15
Figura 2 - Esquema consumo de energia.....	16
Figura 3 - Processos de conversão energética da biomassa de madeira.....	17
Figura 4 - Exemplo de Biomassa.....	19
Figura 5 - Umidade x Poder Calorífico .....	19
Figura 6 - Tamanhos de Cavaco .....	20
Figura 7 - Cavaco Eucalipto .....	21
Figura 8 - Casca de Eucalipto.....	22
Figura 9 - Fluxograma Simplificado Produção de MDP .....	23
Figura 10 - Chapa de MDP.....	23
Figura 11 - Fluxograma Simplificado Processo de fabricação MDF .....	24
Figura 12 - Chapa de MDF.....	25
Figura 13 - Pó de Madeira .....	25
Figura 14 - Filtro Manga .....	26
Figura 15: Amostra de pó de MDP e MDF .....	36
Figura 16: Amostra de Cavaco .....	36
Figura 17 - Amostra de Casca de Eucalipto .....	36
Figura 18 - Amostra de MDF .....	37
Figura 19 - Amostra de MDP .....	37
Figura 20 - Poder Calorífico - Experimental x Teórico.....	71
Figura 21 - Diferença Experimental x Teórico.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Massa molar dos componentes. ....	38
Tabela 2: Composição química Cavaco Eucalipto. ....	38
Tabela 3: Percentual de cinzas na composição química de Cavaco de Eucalipto. ....	39
Tabela 4: Composição química Cavaco de Eucalipto - Redistribuição sem cinzas. ....	39
Tabela 5: Composição química Casca Eucalipto. ....	45
Tabela 6: Percentual de cinzas na composição química de Casca de Eucalipto. ....	45
Tabela 7: Composição química Casca de Eucalipto - Redistribuição sem cinzas. ....	45
Tabela 8: Composição química Chapa MDF .....	51
Tabela 9: Percentual de cinzas na composição química de Chapa MDF. ....	51
Tabela 10: Composição química Chapa MDF - Redistribuição sem cinzas. ....	51
Tabela 11: Composição química Chapa MDP .....	57
Tabela 12: Percentual de cinzas na composição química de Chapa MDP. ....	58
Tabela 13: Composição química Chapa MDP - Redistribuição sem cinzas. ....	58
Tabela 14: Composição química Pó de MDP e MDF .....	64
Tabela 15: Percentual de cinzas na composição química do Pó de MDP e MDF. ....	64
Tabela 16: Composição química do Pó de MDP e MDF - Redistribuição sem cinzas. ....	65
Tabela 17: Comparativos Poderes Caloríficos Biomassas .....	70

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	11
2. OBJETIVOS .....	13
2.1 OBJETIVO GERAL .....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
3. REFERENCIAL TEÓRICO .....	14
3.1 BIOMASSA .....	14
3.2 Biomassas de Estudo.....	20
3.2.1 Cavaco Eucalipto.....	20
3.2.2 Casca Eucalipto .....	21
3.2.3 MDP .....	22
3.2.4 MDF .....	24
3.2.5 PÓ DE MADEIRA .....	25
3.3 Combustão de Biomassa .....	27
3.3.1 Secagem, pirólise, gaseificação e combustão.....	29
3.3.2 Variáveis operacionais e de especificação que afetam o processo de combustão.....	30
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	33
4.1 Matéria-prima e Materiais.....	33
4.2 Métodos.....	34
4.2.1 Análise elementar.....	34
4.2.2 Análise de Umidade .....	35
4.2.3 Poder Calorífico (Superior e Inferior).....	35
4.2.4 Determinação do percentual de cinzas .....	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	37
5.1 Cálculos de ar estequiométrico e relação ar/combustível e Poder Calorífico .....	37
5.1.1 Biomassa 1 - Cavaco de Eucalipto.....	38
5.1.2 Biomassa 2 - Casca de Eucalipto .....	44

5.1.3 Biomassa 3 - Chapa de MDF .....	50
5.1.4 Biomassa 4 - Chapa de MDP .....	56
5.1.5 Biomassa 5 - Pó de MDP e MDF .....	63
5.1.6 Comparativo Poder Calorífico das Biomassas .....	70
6. CONCLUSÃO .....	73
7. REFERÊNCIAS .....	74

## 1. INTRODUÇÃO

O homem sobreviveu por muitos anos como nômade; o uso de fogo foi iniciado a centenas de milhares de anos. Em Pequim a cerca de 400 mil anos iniciou-se o primeiro avanço tecnológico relacionado a essas atividades com a caça e a pesca. Há mais ou menos doze mil anos ocorreu a primeira evolução no setor energético, no início do período neolítico o homem passa a usar a energia derivada de diversos tipos de conversores e deixa de utilizar somente a energia primária fornecida pela natureza e com isso inicia-se a produção agrícola e a pecuária. São utilizados conversores biológicos como o transporte, armazenamento e a preparação de alimentos. Com a utilização de animais para força tem-se a potência disponível aumentada de no mínimo um fator quatro vezes maior (MARQUES FARIAS; AFONSO SELLITTO, 2011).

Com o aparecimento de grandes civilizações a cerca de 4000 A.C, apresentou-se um grande marco para aproveitamento energético, as civilizações começaram a apropriarem-se de solos férteis no oeste e sudoeste da Ásia e em vales aluviais e utilizarem a energia dos conversores vegetais, desenvolvendo técnicas sendo assim capazes de armazenar quantias cada vez maiores em forma de alimentos (MARQUES FARIAS; AFONSO SELLITTO, 2011).

Grandes transformações ocorreram na idade média. O desenvolvimento de tecnologias, através da engenharia, matemática e geometria catalisaram o domínio e a transformação das formas de energia disponíveis na natureza. Arquimedes (287-212 A.C.) criou alavancas e mecanismos para movimentar objetos muito pesados e descobriu o princípio da hidrostática. O uso dos equipamentos mecânicos tornou possível a multiplicação dessa força extraída de todas as formas de energia conhecidas pelo homem (MARQUES FARIAS; AFONSO SELLITTO, 2011).

Um grande acontecimento para o desenvolvimento humano foi a invenção das máquinas a vapor na revolução industrial, o que ajudou na criação de diversas máquinas, alavancando as indústrias da época. Já na segunda fase da revolução, com o avanço das tecnologias, iniciou-se a utilização de outras formas de energia como a eletricidade e uso de combustíveis fósseis.

Com esse grande crescimento populacional e acompanhado da necessidade de um uso crescente de energia, viu-se a necessidade de se desenvolver novas formas de energia para atender a grande demanda da população.

A energia é a capacidade de trabalho, apareceu e aparece de muitas formas, como energia solar, elétrica, geotérmica, solar, marítima, combustíveis fósseis, nuclear, entre outras. Apesar da grande variedade de fontes de energia, a energia proveniente de combustíveis fósseis ainda é amplamente utilizada, diminuindo a sua quantidade disponível na natureza e colaborando de forma direta com a poluição do ar atmosférico.

Os combustíveis fósseis são os hidrocarbonetos: compostos orgânicos formados de cadeias de carbono e hidrogênio. Os hidrocarbonetos são os responsáveis pela origem de praticamente todas as fontes de energia fóssil. São formados através da decomposição de animais e plantas por baixo de rochas por milhões de anos. Entre as formas mais utilizadas desses combustíveis se tem a gasolina, gás natural, diesel, carvão mineral.

O uso do petróleo foi importante para o desenvolvimento da humanidade, porém por ser uma fonte de energia não renovável, na atualidade, as pesquisas são voltadas para diminuir a utilização de combustíveis fósseis e desenvolver novas formas de obtenção de energia.

Atualmente é possível perceber a grande expectativa para o aumento do uso de biomateriais e biocombustíveis, o foco é a substituição dos combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis. Quanto mais escasso for o petróleo, maior será a demanda e o crescimento do desenvolvimento do uso de biomassas e biocombustíveis.

Como uma fonte de energia renovável a biomassa é amplamente utilizada como alternativa energética no mundo todo, e por milhares de anos vem sendo utilizada por toda a humanidade como fonte de energia primária, na sua forma de vegetal, a mais utilizada. As plantas, através da fotossíntese, combinam o dióxido de carbono do ar e a água do solo para produzir carboidratos de vários tipos, que constituem os tecidos vegetais e têm um razoável valor energético (ao contrário de seus formadores — CO<sub>2</sub> e água) (PIVA, 2010).

Entre os variados tipos de biomassa, tem-se a biomassa florestal. Em seu uso primário, a biomassa florestal pode ser plantada para esse fim, sendo usada como lenha ou picada em toras ou cavacos ou em seu uso secundário pode ser matéria orgânica residual gerada nos processos das indústrias de transformação da madeira, tais como, serrações, fábricas de celulose, tábuas e contraplacados, carpintarias e indústrias de mobiliário ou indústrias de painéis de madeira reconstituída.

A sua eficiência pode ser medida pelo seu potencial de queima, calculando-se a quantidade de ar necessário para queima desse biocombustível, em uma combustão completa obtendo o seu poder calorífico e analisando o quanto de energia é gerado em determinada quantidade de material. Com isso é possível prever a quantidade de biomassa que é necessária

para suprir variados tipos de equipamentos de geração de energia, como caldeiras, fornalhas, gaseificadores entre outros.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

- Determinar o potencial energético de cinco tipos de biomassa, comparando os valores experimentais com os resultados dos cálculos teóricos.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Calcular a quantidade necessária de ar para queima dos cinco tipos biomassa.
- Calcular a relação de ar/combustível de cada amostra.
- Calcular e comparar o poder calorífico de todas as biomassas.

### **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

Para contextualizar o presente trabalho, realizou-se uma revisão bibliográfica com o objetivo de demonstrar quais os tipos de biomassa provenientes da madeira de eucalipto, qual o poder calorífico de cada biomassa citada e qual a sua capacidade térmica.

#### **3.1 BIOMASSA**

Desde início da existência da humanidade têm-se registros do homem utilizando fogo, força animal e a energia gerada através do vento ou de quedas de água para atender as necessidades diárias de consumo e construção, e é de conhecimento de todos, que o avanço da humanidade, está diretamente ligado com esse aumento de consumo de energia e com uso controlado das diversas formas que são possíveis de se obtê-la (SOARES e col, 2006).

Com o avanço da tecnologia, que veio se modificando junto ao mundo moderno, apoiou-se cedo à ideia de utilizar preferencialmente os combustíveis de fontes não renováveis, como o carvão mineral, gás natural e o petróleo. Esse consumo crescente obrigou o ser humano a aumentar drasticamente o consumo de combustíveis fósseis a tal ponto que essas reservas, presumivelmente, segundo vários especialistas têm grandes chances de se esgotarem nos próximos cem anos (SOARES e col, 2006).

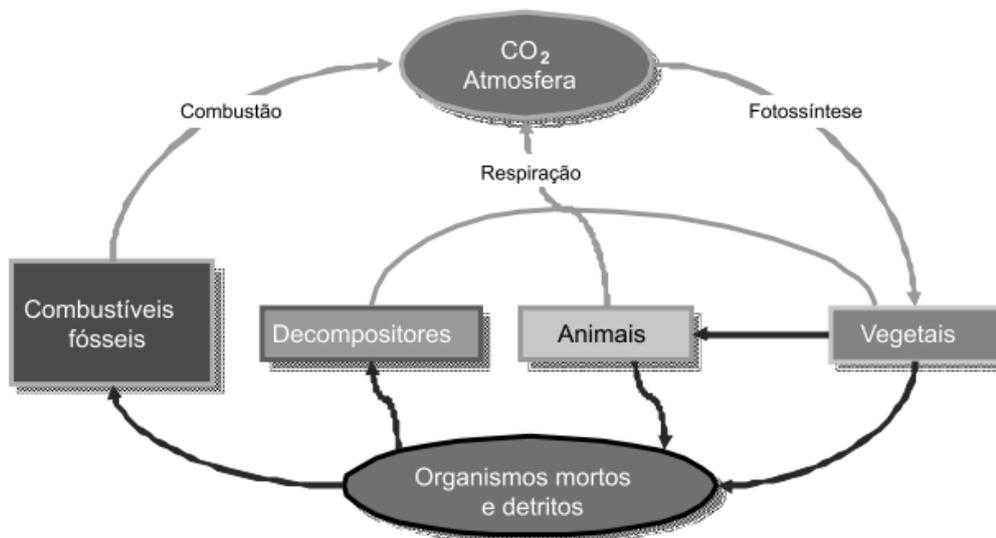
A cada dia mais, os processos de fabricação são e serão processos mais tecnológicos, que produzem em maior escala e com isso mais industrial, o que tem levado a humanidade a estudar e desenvolver outras formas de geração de energia, com fontes que sejam renováveis e que causem um menor impacto ao meio ambiente, ampliando assim a sustentabilidade nos processos.

Visto isso, a utilização de biomassa como fonte alternativa de energia, torna-se essencial.

Segundo o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (2011), no século XX quando o petróleo se tornou acessível em grande escala a biomassa de madeira era a fonte de energia mais importante para a humanidade. Até 1800, a biomassa de madeira era correspondente a 90% da energia e do combustível dos Estados Unidos da América. Já na atualidade, nos países mais pobres do planeta, a madeira continua sendo a principal fonte de energia para aquecer e cocção.

A biomassa só é uma fonte de energia renovável se utilizada da maneira correta, sendo também sustentável. O processo de renovação realiza-se pelo ciclo de carbono, em que as plantas capturam o CO<sub>2</sub> da atmosfera conforme demonstrado na Figura (1).

**Figura 1** - Esquema simplificado do ciclo do carbono



Fonte: BNDES, 2011.

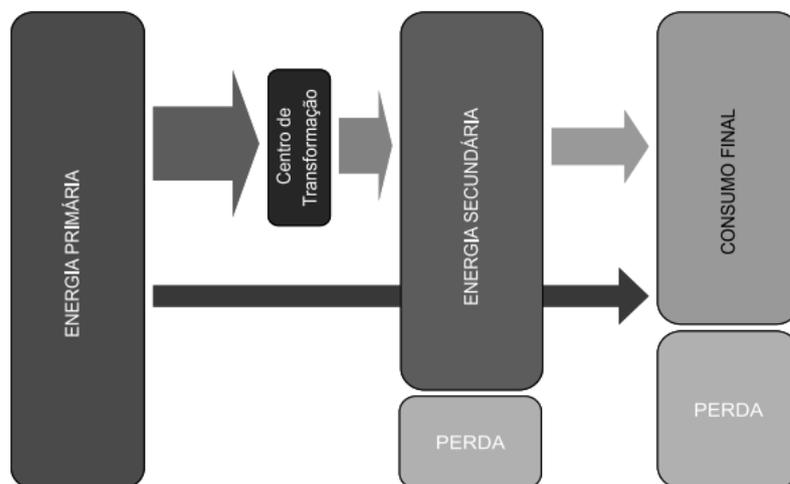
A utilização de biomassa é sustentável, quando a produção de insumos necessários é produzida com um manejo florestal adequado, ou seja, o que é consumido é plantado novamente equilibrando o ciclo de carbono, ou quando a fonte se dá através de resíduos florestais sendo eles provenientes de processos industriais ou urbanos. (BNDES, 2011)

A biomassa ou massa biológica, não fóssil, é uma determinada quantidade de matéria orgânica produzida em uma determinada área. Tem energia química no seu interior, incluindo assim todas as vegetações aquáticas ou terrestres, árvores, biomassa virgem, lixo orgânico, resíduos de agricultura, esterco de animais e outros tipos de restos industriais. Já a biomassa de madeira inclui todo o material da árvore: tronco, ramos, folhas, casca, cavacos e raízes. O termo biomassa tem sido amplamente citado nos últimos anos, principalmente em função da preocupação da humanidade em utilizar fontes de energia que sejam renováveis e não só consumir fontes de energia não renovável, como já vem sendo feito há algum tempo. (BNDES, 2011)

Essa energia que é gerada pela biomassa, se dá pela decomposição dos materiais orgânicos. Temos como exemplo a madeira, o esterco, resíduos agrícolas, restos de alimentos, bem como outros vegetais que também podem ser fontes de energia, como a mandioca, o trigo, arroz entre outros.

A geração de energia da biomassa pode ser classificada como primária, que já é intrínseca ao material, ou seja, já é o estado natural da biomassa, para madeira ou resíduos florestais, ou mesmo na energia secundária existente no estado não natural da biomassa, como no carvão vegetal e na eletricidade. A biomassa tem baixos níveis energéticos no seu estado natural, ou bruto, uma parte pequena de energia primária é destinada para o consumo final. Em maior parte, é consumida em centros de transformação onde é convertida em fontes secundárias. Em todas as etapas de transformação, há perdas de parte do conteúdo energético existente, essa perda se dá pela soma das perdas na sua forma primária, em todas as outras etapas de transformação e no consumo final.

**Figura 2** - Esquema consumo de energia

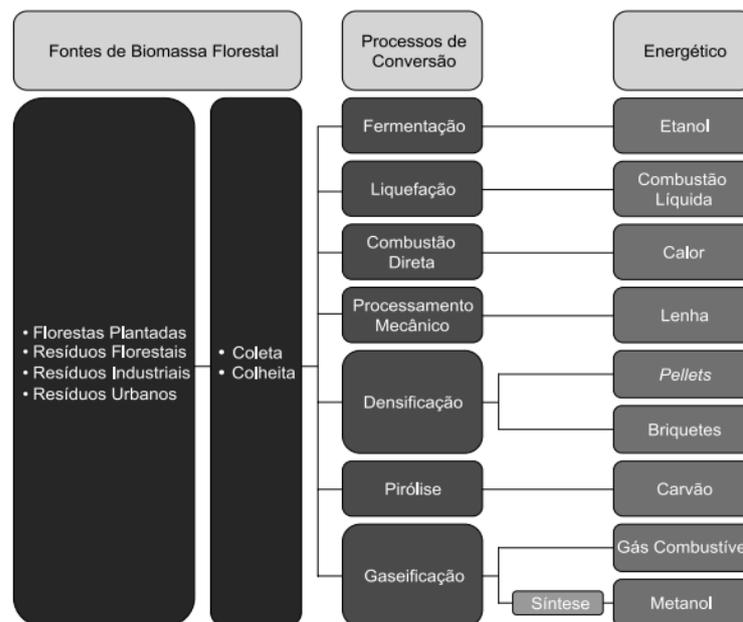


Fonte: BNDES, 2011.

É possível classificar a utilização da energia de biomassa em duas categorias, o método tradicional, que é obtido pela combustão direta do material (lenha, cavaco, casca, pó) ou por métodos avançados de conversão como geração de eletricidade ou produção de biocombustíveis.

Uma das maiores vantagens da utilização de biomassa para obtenção de energia é que mesmo que tenha uma eficiência menor, existe uma grande diversidade na sua forma de utilização e pode-se aproveitá-la de forma simples, como combustão em fornos ou caldeiras. A transformação energética da biomassa está baseada nos seus processos químicos, biológicos, termoquímicos e físicos. Na figura (3), estão representadas as formas de aproveitamento da biomassa, tendo não só geração de energia. Cada processo se adequa conforme suas necessidades, materiais, equipamentos, ou seja, sua infraestrutura e o que as condições que o mercado permite. É importante medir não só o poder calorífico do produto final, mas sim a quantidade energia utilizada para obter a biomassa, ou seja, conversão e transporte até a sua utilização. (BNDES, 2011)

**Figura 3** - Processos de conversão energética da biomassa de madeira



Fonte: BNDES, 2011.

A biomassa é uma boa opção de geração de energia, por ser renovável, ser pouco poluente, contribuindo consequentemente com a diminuição do efeito estufa e com aquecimento global. No Brasil as biomassas tem uma grande significância na matriz de energia. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (2008) no Brasil, em 2007, a biomassa, com um percentual de 31,1% da matriz energética, ficou como a segunda principal fonte de energia, sendo ultrapassada apenas por petróleo e derivados. Com isso, também segundo a Segundo Agência Nacional de Energia Elétrica (2008), para o mercado

internacional, o Brasil se destacou como o segundo maior produtor de etanol em 2007, obtido através da cana-de-açúcar, com capacidade similar aos Estados Unidos e União Europeia.

A principal forma de utilizar a biomassa florestal é através da conversão de energia termoquímica ou pela combustão e queima que são maneiras de aproveitá-la como energia primária. (FOELKEL, 2016)

A combustão direta da biomassa é a transformação da energia química dos combustíveis em calor por meio de reações dos elementos de sua formação com o oxigênio.

Para obtenção de energia, a combustão direta ocorre essencialmente em fogões (cozimento de alimentos), fornos (metalurgia) e caldeiras (geração de vapor). Embora simples o processo de combustão direta seja de baixa eficiência para os principais combustíveis provenientes da madeira, pela existência de elevada umidade intrínseca ao material (20% ou mais no caso da lenha) e da baixa densidade energética (lenha, palha e resíduos), o que também dificulta o transporte e o armazenamento em razão da necessidade de grandes volumes para a geração contínua de energia. (BNDES, 2011)

O processo de geração de energia através de biomassa é viável para industriais que geram resíduos florestais, pois necessita de uma alimentação contínua para não haver queda de rendimento, o que ajuda a dar um destino aos resíduos e não acumular grandes volumes desses resíduos.

A composição química da madeira que é utilizada para queima, segundo o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (2011), varia de acordo com a espécie. Os principais elementos químicos da madeira são o carbono (50%), o hidrogênio (6%), o oxigênio (45%), o nitrogênio (0,1% a 1%) e as cinzas (cálcio, potássio e magnésio). Os componentes orgânicos formam a celulose, as hemiceluloses a lignina, pequenas quantidades de pectina e outros extrativos.

A grande variedade de uso da biomassa para os setores de produção inclui produção de energia até a fabricação de móveis, chapas, celulose e papel.

Na Figura (4) têm-se alguns exemplos de biomassa, sendo elas casca de eucalipto, MDP, MDF, cavaco de eucalipto e pó de MDP e MDF proveniente do lixamento dos mesmos.

**Figura 4** - Exemplo de Biomassa

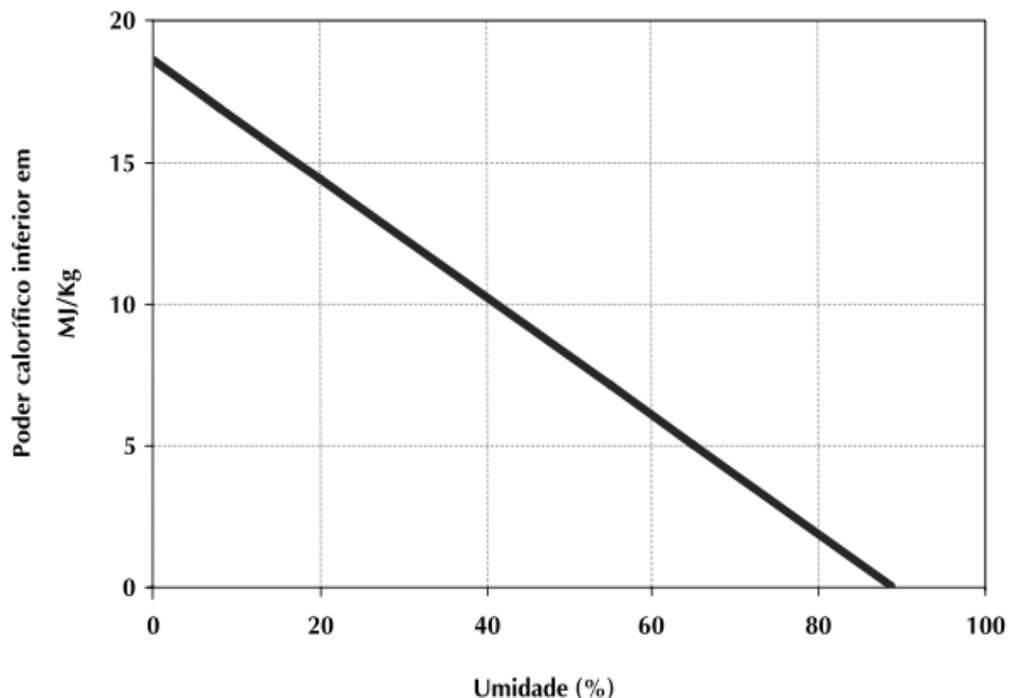


Fonte: Autor, 2018

As propriedades mais importantes para biomassa são a densidade e umidade residual. A baixa densidade influencia nos custos elevados de transporte e armazenamento se comparado aos combustíveis fósseis, já a umidade residual, que é a quantidade água livre na composição da biomassa. A presença de água na madeira representa menor poder calorífico, em razão da quantidade energia que tem que ser gasta para evaporá-la.

Na Figura (5), mostra o acompanhamento do poder calorífico comparado ao aumento da umidade residual.

**Figura 5** - Umidade x Poder Calorífico



Fonte: BNDES, 2011.

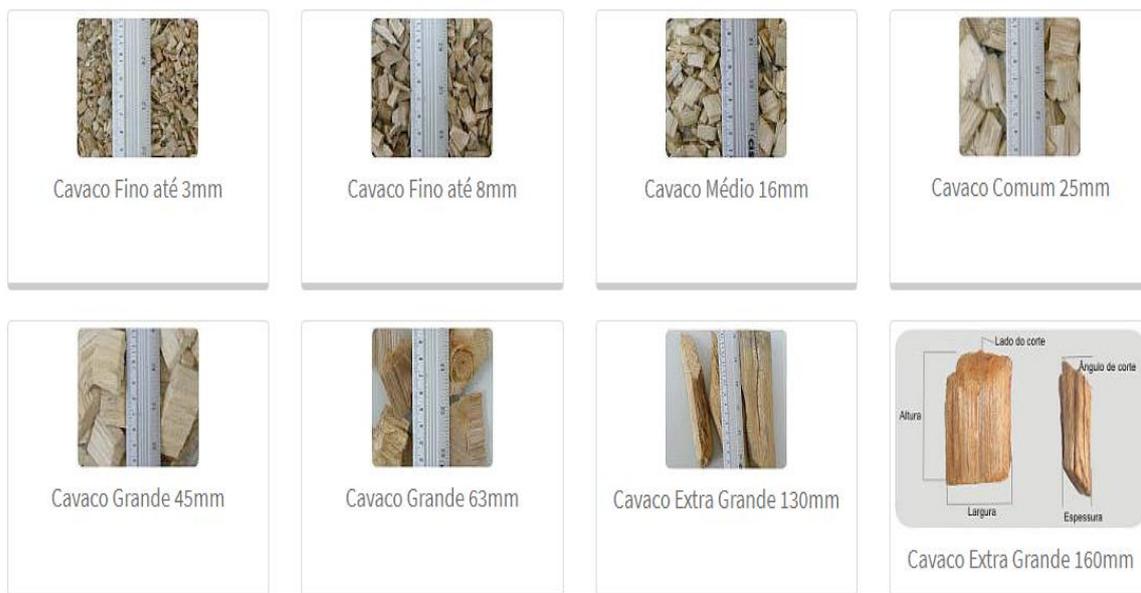
Quanto maior a umidade, menor o poder calorífico. A umidade é um fator muito importante para definir se é viável a utilização da biomassa como combustível ou não, e se existe a possibilidade de aperfeiçoar esse processo de queima, secando o material.

### 3.2 Biomassas de Estudo.

#### 3.2.1 Cavaco Eucalipto

O cavaco é o resultado de um processo de picagem de madeira; suas dimensões dependem do tamanho ajustado no aparelho picador e também varia em função de qual tipo de madeira está sendo picada (LIPPEL, 2014).

Figura 6 - Tamanhos de Cavaco



Fonte: LIPPEL, 2014

Segundo detalha Gisele Bolzani - gerente de consultoria em negócios florestais da Pöyry - “A biomassa de origem florestal para produção de energia pode ser produzida a partir de lenha de resíduos da colheita florestal ou de cavacos, seja de plantios florestais especificamente conduzidos para este fim ou resíduos de outros processos florestais, como serrarias. As caldeiras à biomassa florestal moderna e de alta capacidade tendem a usar exclusivamente cavaco como combustível”. Visto isso, é notável que a utilização do cavaco como fonte de geração de energia tem grande importância na matriz energética do país.

Visto isso, muitas indústrias principalmente do setor de produção de painéis de madeira reconstituída, sendo em fibras (MDF) ou em partículas e camadas (MDP), empresa de papel e celulose, também empresas de produção de grãos que demandam de uma grande quantidade de energia para o processo, alimentam sua linha de geração de energia com cavaco.

Na Figura (7), tem-se um exemplo de uma amostra de cavacos de eucalipto.

**Figura 7** - Cavaco Eucalipto



Fonte: Autor, 2018.

### **3.2.2 Casca Eucalipto**

A casca de árvores, em especial do eucalipto, representa uma das maiores fontes de biomassa vegetal disponível no Brasil. Com uma área de floresta plantada correspondente a cerca de 4,5 milhões de hectares (em 2009), as árvores de eucalipto vêm sendo cada vez mais utilizadas como fonte de extração de casca para aproveitamento desse recurso como meio de biomassa energética. Seu potencial energético é inegável, visto que atualmente, uma significativa parcela da casca de eucalipto como biomassa vem sendo consumida para geração de energia; alimentando caldeiras de força em fábricas de painéis de madeira. (FOELKEL, 2010).

**Figura 8** - Casca de Eucalipto



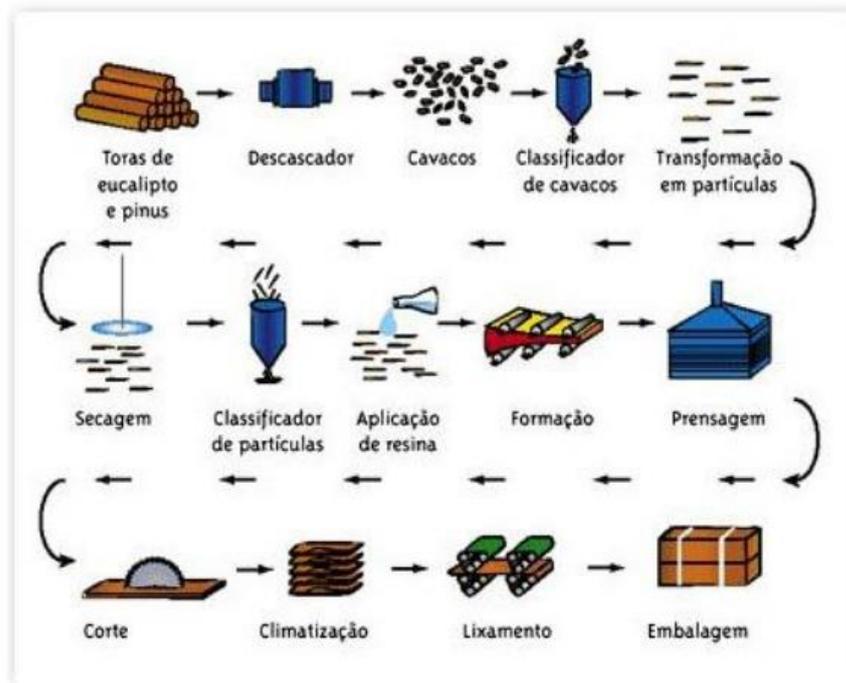
Fonte: Autor, 2018.

### **3.2.3 MDP**

O MDP, ou Medium Density Particleboard, é um painel de madeira aglomerada que é produzido com partículas de madeira, combinadas com aditivos aglutinadores sintéticos e consolidado com base na aplicação de altos níveis de calor e pressão. (MALONEY, 1993).

No que diz respeito à estrutura, no MDP as partículas são posicionadas de forma diferente, sendo que as maiores são colocadas no centro, e as menores constituem as superfícies, formando assim um painel com três camadas. Tais partículas são aglutinadas e compactadas com a adição de uma resina sintética através da exposição de pressão e calor em uma prensa contínua. Tal processo gera um painel homogêneo e de boa estabilidade, sendo bastante resistente à flexão e ao arranque de parafusos. Entretanto, apresenta baixa resistência a usinagem (ABIPA, 2010). Abaixo na Figura (9) está representado um fluxograma simplificado do processo de fabricação do MDP.

**Figura 9** - Fluxograma Simplificado Produção de MDP



Fonte: PEREIRA, 2014

Todo processo existe perdas, na produção de MDP não é diferente, cada empresa define suas especificações, dentro das legislações aplicáveis, qual é o seu modelo de produto ideal. As chapas pertinentes a essa perda, se tornam um empasse e cada indústria destina esse material para um fim. Algumas destas utilizam a chapa de MDP como forma de geração de energia, através da trituração da mesma, é possível obter um material que pode ser alimentado na maioria das caldeiras. O material possui baixa umidade, em torno de xxx, o que aumenta o seu poder calorífico, apesar de ter um custo para produzi-la torna-se viável a sua queima visto que essa chapa não será comercializada. Na Figura (10), tem-se um exemplo de chapa de MDP, picada.

**Figura 10** - Chapa de MDP



Fonte: Autor, 2018.

### 3.2.4 MDF

Medium-density fiberboard – placa de fibra de média densidade, em tradução livre – mais comumente conhecido como MDF, é um painel obtido através da aglutinação de fibras de madeira com resina ureia-formaldeído e formado através de prensagem à alta temperatura e pressão (IWAKIRI, 2005).

Esse painel é resultante de uma produção desenvolvida com base em um processo a seco, contando com a incorporação de aditivos químicos que são combinados a fim de favorecer algumas propriedades, tais como o nível de resistência do produto final, sua estabilidade dimensional, dentre outros (MALONEY, 1993).

Devido a sua composição de fibras aglutinadas que ocasiona a solidez do painel, o MDF possui características que se assemelham às características da madeira maciça. É um produto superior em características quando comparado aos outros tipos de painéis feitos de partículas aglomeradas, ainda mais quanto à sua estabilidade dimensional e condições de usinagem. Sua densidade apropriada e homogeneidade resultante de sua estrutura proporcionada pelas fibras permitem que o painel MDF possa ser facilmente manuseado no que diz respeito à pintura, revestimento, torneamento e perfuração. Ademais, por não possuir imperfeições usualmente encontradas na madeira in natura, o MDF pode ser usinado de diversas formas sem que isso ocasione detrimento em sua estrutura. (ABIPA, 2008).

Na Figura (11), está representado um fluxograma simplificado do processo de fabricação de MDF:



Fonte: PORTAL MADEIRA, 2010

Todo processo existe perdas, na produção de MDF não é diferente, cada empresa define suas especificações, dentro das legislações aplicáveis, qual é o seu modelo de produto

ideal. As chapas pertinentes a essa perda, se tornam um empasse e cada indústria destina esse material para um fim. Algumas destas utilizam a chapa de MDF como forma de geração de energia, através da trituração da mesma, é possível obter um material que pode ser alimentado na maioria das caldeiras. O material possui baixa umidade, em torno de 7%, o que aumenta o seu poder calorífico, apesar de ter um custo para produzi-la torna-se viável a sua queima visto que essa chapa não será comercializada. Na Figura (12), tem-se um exemplo de chapa de MDP, picada.

**Figura 12** - Chapa de MDF



Fonte: Autor, 2018.

### **3.2.5 PÓ DE MADEIRA**

A geração de resíduos em indústrias madeireiras, em especial o pó de madeira, e a crescente preocupação com a reutilização ou descarte do mesmo vem, cada vez mais, despertando a percepção da necessidade de realizar estudos e projetos que visam tornar o ciclo de produção mais adaptado para meios alternativos da destinação desse subproduto.

**Figura 13** - Pó de Madeira

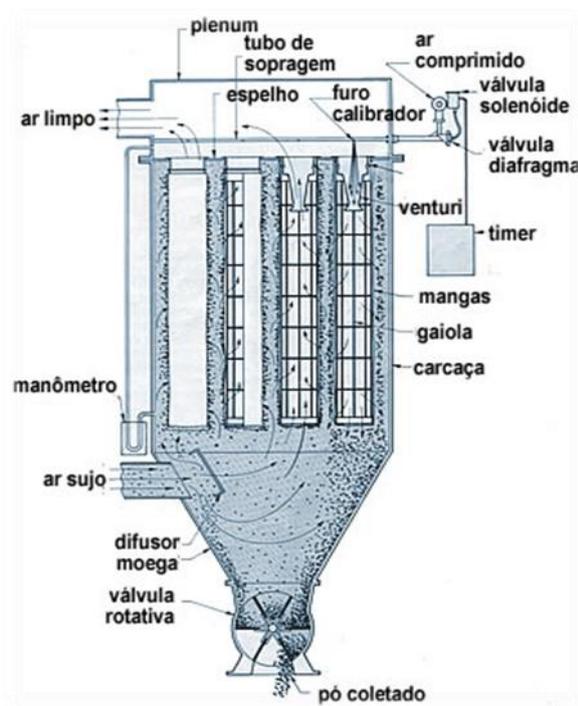


Fonte: TOOLS, 2016

O pó de madeira, resultado dos processos de serragem e lixamento de madeira nas indústrias (MASSON, 1992) é, ou descartado ao fim do processo, ou utilizado em sua grande maioria como biomassa energética, através de sua queima.

A queima do pó de madeira resulta na retirada de oxigênio da atmosfera, na liberação de gás carbônico e do vapor de água, o que acaba por agravar ainda mais a poluição ambiental. Sabendo disso, diversas indústrias apostam na utilização de equipamentos capazes de mitigar o impacto ambiental causado por esse processo; um exemplo disso seria a utilização dos filtros manga nessa etapa do processo produtivo. O filtro manga é um equipamento que tem a função de realizar a separação de partículas que são encontradas em gases emitidos em fluxos industriais. Segundo Lund., 1971 - "Um dos muitos processos que podem ser usados para eliminar partículas grandes e intermediárias por meio de filtros de tecido. Este aparelho opera de modo similar à bolsa de um aspirador de pó, deixando passar o ar e as partículas menores e retendo as partículas maiores".

Figura 14 - Filtro Manga



Fonte: SOLUÇÕES INDUSTRIAIS, 2015.

### 3.3 Combustão de Biomassa

A combustão de biomassa é o principal modelo de tecnologia da bioenergia, responsável por mais de 90% da contribuição global. A seleção e modelo de qualquer biomassa para o sistema de combustão são determinados principalmente pelas características do combustível, a legislação ambiental do local em questão, os custos e o desempenho do equipamento necessário ou disponível, bem como a energia e capacidade necessárias (calor, eletricidade). Além disso, as características dos combustíveis podem ser influenciadas para cumprir os requisitos tecnológicos e ecológicos de uma dada tecnologia de combustão. O pacote tecnológico mais adequado, portanto, pode variar de caso para caso, mas geralmente, devido à economia de efeitos de escala a complexidade do sistema de alimentação de combustível, a tecnologia de combustão e a limpeza dos gases de combustão sistemas de larga escala utilizam combustíveis de baixa qualidade (com características não homogêneas de no que diz respeito, por exemplo, ao teor de umidade, tamanho de partícula e comportamento de derretimento de cinzas), e combustíveis de alta qualidade são necessários para sistemas de pequena escala. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008)

As tecnologias de combustão de biomassa mostram, especialmente para aplicações de grande escala, desperdícios em sistemas de combustão isso especialmente quando são usados combustíveis de biomassa que não são tratados quimicamente, ou seja, naturais. As tecnologias de limpeza de gases de combustão necessárias são menos complexas e, portanto, mais barato. Além disso, as antigas tecnologias de combustão revelaram-se incapazes de lidar com combustíveis não homogêneos de biomassa e problemas de emissões e falhas de segurança ocorreram. Novas tecnologias de preparação de combustível, combustão e limpeza de gases foram desenvolvidas e introduzidas, são mais eficientes, mais limpos e mais rentáveis do que sistemas anteriores e pode ser utilizado para alimentação de diversos combustíveis. Isso abre novas oportunidades para aplicações de combustão de biomassa sobre condições, anteriormente demasiados dispendiosos ou inadequados, aumenta a competitividade desses sistemas e aumenta a disponibilidade da planta. A este respeito, a troca de conhecimentos entre organizações internacionais ou nacionais, bem como a criação de mecanismos de mercado e legislação conducentes essencial para uma introdução mais generalizada dos sistemas de energia de biomassa. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008)

A biomassa pode ser convertida em energia útil (calor ou eletricidade) ou transportadores de energia (carvão, óleo ou gás) por ambas as tecnologias de conversão

bioquímica e termoquímica. Para conversão bioquímica as tecnologias de conversão incluem a fermentação para produção de álcool e anaeróbio digestão para produção de gás enriquecido com metano. Já as tecnologias de conversão termoquímicas estão em estágios variados de desenvolvimento, onde a combustão é mais desenvolvida e mais frequentemente aplicada. Gaseificação e pirólise estão se tornando cada vez mais importantes.

Existem quatro tecnologias de conversão de biomassa termoquímicas para fins energéticos: pirólise, gaseificação, combustão direta e liquefação. Os principais produtos dessas tecnologias de conversão podem estar na forma de portadores de energia, como carvão, óleo ou gás ou como calor. Existem várias técnicas para a utilização desses produtos. Produtos secundários podem ser derivados através de processamento adicional. Em princípio, a maior parte do petróleo substâncias químicas atualmente em uso podem ser produzidas a partir de biomassa, mas algumas requerem rotas de síntese bastante circulares. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008)

O processo de combustão de biomassa envolve vários aspectos físicos e químicos de alta complexidade. A natureza do processo de combustão depende das propriedades do combustível e a aplicação de combustão. O processo de combustão pode ser dividido em vários processos: secagem, pirólise, gaseificação e combustão. O processo geral de combustão pode ser um processo de combustão contínua ou um processo de combustão por partes, e a adição pode ser realizada por meio forçado ou natural. A combustão em partes é usada em algumas unidades de combustão de pequena escala, algumas das quais também usam calado natural. Isso é típico para, por exemplo, fogões a lenha tradicionais. As unidades de combustão de média a grande escala são sempre aplicações de combustão contínua, com tiragem forçada. Secagem, pirólise e gaseificação serão sempre os primeiros passos na combustão de combustível sólido. A importância relativa desses passos varia, dependendo da tecnologia de combustão implantada, as propriedades do combustível e as condições do processo de combustão. No entanto, nas aplicações de combustão em batelada, haverá separação entre uma fase de combustão volátil e de carvão, tanto na posição como no tempo. Para partículas maiores, haverá um grau de sobreposição entre as fases, enquanto em lote processos de combustão, como na combustão de toras de madeira em fornos a lenha e lareiras, ser um grande grau de sobreposição entre as fases. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008)

### 3.3.1 Secagem, pirólise, gaseificação e combustão.

Para a secagem a umidade evapora a baixas temperaturas ( $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Como a vaporização usa energia liberada do processo de combustão, reduz a temperatura na combustão câmara, o que retarda o processo de combustão. Em caldeiras a lenha, por exemplo, Foi descoberto que o processo de combustão não pode ser mantido se a umidade da madeira conteúdo excede 60 por cento em base úmida. A madeira molhada exige muita energia para evaporar a umidade contida, e subsequentemente para aquecer o vapor de água, que as temperaturas são reduzidas abaixo da temperatura mínima necessária para sustentar a combustão. Consequentemente, o conteúdo de umidade é uma variável de combustível muito importante. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008)

A pirólise pode ser definida como degradação térmica (desvolatilização) na ausência de agente oxidante fornecido externamente. Os produtos de pirólise são principalmente alcatrão e carbonáceo carvão e gases de baixo peso molecular. Além disso, CO e CO<sub>2</sub> podem ser formados em quantidades consideráveis, especialmente de combustíveis ricos em oxigênio, como a biomassa. Tipo de combustível, temperatura, pressão, taxa de aquecimento e tempo de reação são todas variáveis que afetam quantidades e propriedades dos produtos formados. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008)

Os produtos de pirólise podem ser usados de várias maneiras. O char pode ser atualizado para Carvão ativado, usado na indústria metalúrgica, como combustível de cozinha doméstica ou para churrasco. O gás de pirólise pode ser usado para produção de calor ou geração de energia, ou sintetizado para produzir metanol ou amônia. O líquido alcatroado, óleo de pirólise ou bio-óleo pode ser atualizado para combustível líquido de hidrocarbonetos de alta qualidade para motores de combustão (por exemplo, transporte), ou utilizado diretamente para fins de produção ou aquecimento de eletricidade. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008)

A gaseificação pode ser definida como degradação térmica (desvolatilização) na presença de agente oxidante fornecido externamente. No entanto, o termo gaseificação também é usado para reações de oxidação com, por exemplo, CO<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub>O. Enquanto a pirólise é geralmente otimizada em relação a um rendimento máximo de carvão ou alcatrão, a gaseificação é otimizada em relação a um rendimento máximo de gás. O gás contém principalmente CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e outros hidrocarbonetos. A gaseificação pode ser

realizada com ar, oxigênio, vapor ou CO<sub>2</sub> como agentes oxidantes. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008)

A gasificação do ar produz um gás de baixo poder calorífico enquanto a gaseificação de oxigênio produz gás de valor calorífico médio. Através da síntese, o gás combustível pode ser atualizado para metanol, queimado externamente em uma caldeira para a produção de água quente ou vapor, em uma turbina a gás para produção de eletricidade ou em motores de combustão interna, como motores a diesel e de ignição comandada. Antes que o gás combustível possa ser usado em turbinas a gás ou motores de combustão, os contaminantes (alcatrão, partículas de carvão, cinzas e compostos para ser removido). O gás quente da turbina a gás pode ser usado para elevar o vapor a ser utilizado em uma turbina a vapor. A combustão pode idealmente ser definida como uma oxidação completa do combustível. Os gases quentes de a combustão podem ser utilizados para fins de aquecimento direto em pequenas unidades de combustão, aquecimento de água em caldeiras de aquecimento central pequenas, para aquecer a água em uma caldeira de eletricidade geração em unidades maiores, como fonte de calor de processo, ou para aquecimento de água em sistemas de aquecimento.

A liquefação pode ser definida como conversão termoquímica na fase líquida a baixas temperaturas elevadas e altas pressões geralmente com pressão parcial e um catalisador para aumentar a taxa de reação e / ou melhorar a seletividade do processo. Em comparação com a pirólise, a liquefação tem um maior rendimento líquido, e resulta em um líquido com maior poder calorífico e menor teor de oxigênio. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008)

### **3.3.2 Variáveis operacionais e de especificação que afetam o processo de combustão**

#### **3.3.2.1 Umidade**

Em alguns casos, será necessário secar o combustível de biomassa antes da combustão para poder sustentar a combustão. O aumento do teor de umidade reduzirá o máximo possível a temperatura de combustão (a temperatura de combustão adiabática) e aumentar as tempo de residência na câmara de combustão, dando assim menos espaço para a prevenção de emissões como resultado de combustão incompleta. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008)

### **3.3.2.2 Poder calorífico**

O poder calorífico é dado pela quantidade de energia que é liberada quando o material é queimado com adição de ar. Visto isso, o calor obtido durante a queima de diferentes espécies florestais ou resíduos madeireiros pode variar dependendo de suas propriedades físicas, químicas e biológicas. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008)

Divide-se o Poder Calorífico em Superior e Inferior. O Poder Calorífico Superior – PCS é a quantidade de energia liberada pela combustão completa do combustível. Para o PCS a água formada durante o processo de combustão é condensada, recuperando o calor derivado da condensação. Essa quantidade de calor liberado durante a condensação do vapor de água e aquecimento dos produtos da combustão é considerado até 25 °C. A melhor condição de queima, ou seja, a ideal é quando o material encontra-se completamente seco, porém na maior parte dos processos de combustão o material não é seco anteriormente pelos custos elevados para secagem. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008)

Tendo o PCS, pode-se calcular o PCI que é o poder calorífico inferior é a quantidade de energia em forma de calor necessária para formar um quilo de combustível, através da queima deste com o excesso de ar sendo os gases de descarga, resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando a condensação. Visto isso a energia gasta para evaporar o hidrogênio intrínseco ao combustível durante a condensação da água é contabilizada.

O poder calorífico bruto é definido como o calor liberado durante a combustão por massa combustível unitário sob as restrições que a água formada durante a combustão está em fase líquida e que a água e o gás de combustão tenham as mesmas temperaturas que a temperatura do combustível combustão.

O poder calorífico líquido é definido como o calor liberado durante a combustão por unidade de massa de combustível sob as restrições que a água formada durante a combustão está em uma fase gasosa e que a água e o gás de combustão têm a mesma temperatura que o combustível antes da combustão.

### **3.3.2.3 Combustão Incompleta**

As emissões causadas pela combustão incompleta são principalmente resultado de:

- Mistura inadequada de ar de combustão e combustível na câmara de combustão, dando espaço para zonas de combustão locais ricas em combustível;

- Falta de oxigênio disponível para queima;
- Temperaturas de combustão muito baixas;
- Tempos de residência muito curtos; ou
- Concentrações de radicais muito baixas, em casos especiais, por exemplo, na fase final do processo de combustão (a fase de combustão do carvão) em uma combustão de processo.

Essas variáveis são todas ligadas através das expressões da taxa de reação para as reações de combustão elementares. Entretanto, nos casos em que o oxigênio está disponível em quantidades, a temperatura é a variável mais importante devido à sua influência exponencial na taxa de reação. Uma melhoria dessas variáveis contribuirá, em geral, para a redução níveis de emissão de todas as emissões de combustão incompleta. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008)

#### **3.3.2.4 Ar em Excesso**

Para assegurar que a combustão vai ser realizada por completo, devido às interferências que podem ocorrer no queimador ou caldeira ou qualquer equipamento onde é realizada a reação de combustão é necessário alimentar excesso de ar. (PINHEIRO e VALLE, 1995).

O coeficiente de ar em excesso é modo de calcular a relação de ar/combustível alimentado no sistema comparado à relação de ar/combustível estequiométrica, e pode ser expresso pela equação (1) representada abaixo:

$$\alpha = V_1/V_2 \quad (1)$$

Onde:

$V_1$ : Relação de ar/combustível alimentado no sistema.

$V_2$ : Relação de ar/combustível estequiométrico.

O excesso de ar é um fator de extrema importância, pois através dele controla-se o volume, temperatura e entalpia dos produtos da reação. Um grande excesso de ar diminui a temperatura da câmara de combustão e com isso aumenta as perdas de calor dos gases reduzindo com isso a eficiência térmica. Por outro lado, a falta de excesso de ar pode causar a combustão incompleta e com a formação de CO<sub>2</sub>, fumaça e fuligem e também causando um risco a segurança de operação, pois se acumulando combustível na câmara aumenta-se o risco de explosão. (PINHEIRO e VALLE, 1995).

Um valor ideal para excesso de ar é onde essa relação de ar/combustível esteja equilibrada o suficiente para não acontecer uma combustão incompleta e nem ter o excesso suficiente para ter perda de calor e queda de temperatura (PINHEIRO e VALLE, 1995).

Para madeira o valor usual de coeficiente, considerando o queimador do tipo "grelha" é de 1,20 a 1,25. Sendo assim, se for considerada uma alimentação de ar, por exemplo, de 10.000 m<sup>3</sup>/h o ar em excesso seria de 20% a 25% desse valor de alimentação, portanto seria de 12.000 m<sup>3</sup> a 12.500 m<sup>3</sup>/h (PINHEIRO e VALLE, 1995).

#### **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Os materiais e métodos empregados para a realização do trabalho estão descritos nessa abordagem.

##### **4.1 Matéria-prima e Materiais**

As amostras de biomassas utilizadas neste trabalho foram fornecidas por uma empresa de produção de painéis de madeira MDF e MDP, situada na cidade de Uberaba – MG. Foram utilizadas cinco tipos de biomassas. Cavaco de Eucalipto, Casca de Eucalipto, Chapa de MDP (triturada), Chapa de MDF (triturada) e Pó de MDP e MDF proveniente de lixamento de chapas.

Esses materiais foram enviados ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo para realizar as seguintes análises:

- Análise elementar (C, H, N, O, S);
- Análise de Umidade;
- Poder Calorífico (Superior e Inferior);
- Percentual de Cinzas.

Foram enviadas 545 g de Pó de MDP e MDF, 320 g de Chapa de MDP, 270 g de Chapa de MDF, 305 g de Casca de Eucalipto e 320 g de Cavaco de Eucalipto. Foi utilizado para as análises aproximadamente 10g de cada biomassa, todas as amostras foram moídas e peneiradas em malha de 60 mesh.

Com as análises realizadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (IPT), detalhou-se abaixo o intuito de cada teste, bem como as normas utilizadas de parâmetros para análise e os equipamentos utilizados para cada um deles.

## **4.2 Métodos**

### **4.2.1 Análise elementar**

A análise elementar consiste em determinar o percentual de cada elemento na composição química da biomassa. Sendo os principais elementos o carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e o enxofre (C, H, N, O, S).

O IPT utilizou como base para determinação dos teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio a norma ASTM D5373-16 – Método A, conforme apresentado nos laudos dos Anexos 1, 2, 3, 4 e 5. O equipamento utilizado foi o analisador de carbono, hidrogênio e nitrogênio, código IPT: 01879, calibrado com material de referência antes do ensaio e uma balança analítica, código IPT: 83823. Já para determinação do teor de enxofre total a norma utilizada como base na ASTM D4239-17 – Método A. Os equipamentos utilizados foram analisador de enxofre código IPT: 43252 também calibrados antes do ensaio e balança analítica LCL-003. Para determinação do teor de oxigênio foi utilizada a norma ASTM D3176-15.

#### **4.2.2 Análise de Umidade**

A análise de umidade é necessária para determinar a quantidade água em determinado material. Para a análise de determinação do teor de umidade o IPT utilizou como base a norma ASTM E871-82(13). Os equipamentos e instrumentos utilizados foram balanças duas balanças códigos IPT: 83823 e 21507, duas estufas códigos IPT: 26296 e 40672, e um termômetro código IPT: 3918.

#### **4.2.3 Poder Calorífico (Superior e Inferior)**

O Poder Calorífico é definido como a quantidade de calor que é despreendido pela combustão completa do combustível. Se a medição é feita com os produtos de saída em fase gasosa, é denominado poder calorífico inferior e se for considerado a água dos produtos em fase líquida, com os produtos de combustão à temperatura ambiente, é denominado Poder Calorífico Superior. A diferença dos dois tem que ser exatamente a entalpia de vaporização da água que é formada na combustão do hidrogênio em forma de produto e da água presente no combustível na forma de umidade

Para determinação do poder calorífico o IPT se baseou na norma ASTM D5865-13. Utilizando uma balança analítica código IPT 83823 e uma bomba calorimétrica com cabeçotes de código IPT: 1 e 2.

#### **4.2.4 Determinação do percentual de cinzas**

As cinzas correspondem à fração inorgânica da biomassa, agregando na sua constituição os elementos químicos que são inertes as reações de combustão, entre eles estão fósforo, potássio e o cálcio. Para a determinação do teor de cinzas foi utilizada a norma ASTM D1102-84(13) e os equipamentos utilizados foram balança analítica de código IPT: 83823, uma mufla código IPT: 18516 e um termômetro código IPT: BG 1422.

O objetivo das análises foi realizar uma comparação dos valores experimentais com os valores teóricos calculados.

Abaixo, seguem imagens das amostras encaminhadas ao IPT para análise:

**Figura 15:** Amostra de pó de MDP e MDF



**Fonte:** Autor, 2018.

**Figura 16:** Amostra de Cavaco



**Fonte:** Autor, 2018.

**Figura 17 -** Amostra de Casca de Eucalipto



**Fonte:** Autor, 2018.

**Figura 18** - Amostra de MDF



**Fonte:** Autor, 2018.

**Figura 19** - Amostra de MDP



**Fonte:** Autor, 2018.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Cálculos de ar estequiométrico e relação ar/combustível e Poder Calorífico**

Em linhas gerais a base de cálculo de alimentação foi de 100 kg de biomassa e para todos os cálculos foram desconsideradas a massa de cinzas presentes na composição de cada uma.

## 5.1.1 Biomassa 1 - Cavaco de Eucalipto

### 5.1.1.1 Cálculo de coeficiente estequiométrico e relação ar/combustível.

Para o cálculo de ar estequiométrico foram utilizados os dados das amostras analisadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (IPT) representados no laudo do Anexo 1, baseados no percentual de cada elemento na composição da biomassa foram calculados as quantidades de cada elemento em kmol.

Na Tabela 1 estão relacionados os dados das massas molares utilizadas para o cálculo em kmol de cada elemento.

**Tabela 1:** Massa molar dos componentes.

Massa molar	kmol/kg
Carbono	12,00
Hidrogênio	1,00
Nitrogênio	14,00
Oxigênio	16,00
N <sub>2</sub>	28,00
O <sub>2</sub>	32,00

Fonte: Autor, 2018

Inicialmente, nas análises realizadas, tinha-se a seguinte composição química.

**Tabela 2:** Composição química Cavaco Eucalipto.

Biomassa: Cavaco de Eucalipto		
Elemento	Composição (m/m)	kmol
Carbono	46,90	3,91
Hidrogênio	5,88	5,88
Nitrogênio	0,20	0,01
Oxigênio	46,72	2,92

Fonte: Análises realizadas pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (2018)

E para as cinzas:

**Tabela 3:** Percentual de cinzas na composição química de Cavaco de Eucalipto.

<b>Elemento</b>	<b>Composição (m/m)</b>
Cinzas	0,3

Fonte: Análises realizadas pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (2018)

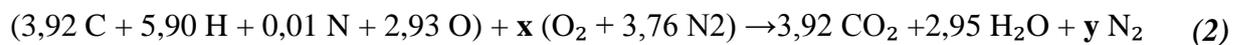
Desconsiderando as cinzas, para o cálculo de ar estequiométrico e refeita a distribuição dos percentuais:

**Tabela 4:** Composição química Cavaco de Eucalipto - Redistribuição sem cinzas.

<b>Biomassa: Cavaco de Eucalipto</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Composição (m/m)</b>	<b>kmol</b>
Carbono	47,04	3,92
Hidrogênio	5,90	5,90
Nitrogênio	0,20	0,01
Oxigênio	46,86	2,93

Fonte: Autor, 2018

Abaixo, na equação (2), temos a combustão da queima do Cavaco de Eucalipto, com seus coeficientes estequiométricos:



**Biomassa**

**Ar**

**Produtos Gerados**

Levando em consideração a estequiometria da reação calcularam-se os coeficientes necessários para obter a quantidade de ar estequiométrico.

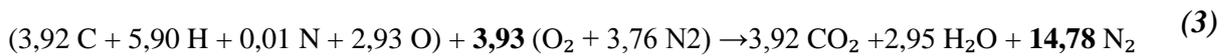
Calculando x

$$2,93 + 2x = (2 \cdot 3,92) + 2,95$$
$$x = (2,95 - 2,93 + (2 \cdot 3,92))/2$$
$$x = 3,93$$

Calculando y

$$2y = 0,01 + (3,93 \cdot 3,76 \cdot 2)$$
$$y = 14,78$$

Com isso temos a equação (3), com os coeficientes estequiométricos calculados:



**Biomassa**

**Ar**

**Produtos Gerados**

Na equação (4), calculou-se a massa de ar estequiométrico necessária para a combustão completa da biomassa.

$$(3,92 \cdot 32) + (3,93 \cdot 3,76 \cdot 28) = 539,19 \text{ kg de ar} \quad (4)$$

E por fim, na equação (5), a relação de ar/combustível para a biomassa Cavaco de Eucalipto.

$$a/c = 539,19 \text{ kg de ar} / 99,7 \text{ kg de biomassa} \quad (5)$$

$$a/c = 5,41 \text{ kg/kg}$$

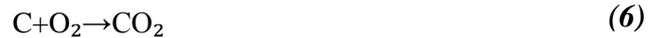
Com isso, tem-se que para queimar 100 kg de cavaco de eucalipto, desconsiderando os 0,3 kg de cinzas, são necessários 539,19 kg de ar.

### 5.1.1.2 Cálculo teórico do poder calorífico

Conforme os resultados representados no laudo do Anexo 1, o poder calorífico real medido do cavaco de eucalipto é 14,78 MJ/kg, calculou-se o teórico, baseado em dados já

disponíveis na literatura para comparar com o experimental. Considerando o calor de formação da água -68,317 kcal/mol e o calor de evaporação 10,519 kcal/mol a 25°C e 1 atm (PERRY; GREEN; MALONEY, 1988).

Para a queima do carbono temos as seguintes equações (6) e (7):



$$\Delta H^{\circ f} = - 94,052 \text{ (kcal/mol)}$$



$$\Delta H^{\circ f} = - 68,317 \text{ (kcal/mol)}$$

Logo a energia na equação (8),  $\epsilon_1$  corresponde à energia de formação do dióxido de carbono e na equação (9)  $\epsilon_2$  corresponde à energia de formação da água:

$$\epsilon_1 = - 94,052 \text{ kcal/mol} \cdot 3.920,09 \text{ mol} = - 368.692,30 \text{ kcal} \quad (8)$$

$$\epsilon_2 = - 68,312 \text{ kcal/mol} \cdot 2948,85 \text{ mol} = - 201.441,60 \text{ kcal} \quad (9)$$

A energia total, calculada na equação (10), é a soma da formação do dióxido de carbono  $\epsilon_1$  e a energia de formação da água  $\epsilon_2$ :

$$\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (10)$$

Logo:

$$\epsilon_{\text{total}} = - 368.692,30 + (- 201.441,60)$$

$$\epsilon_{\text{total}} = - 570.133,91 \text{ kcal por } 100 \text{ kg biomassa de cavaco de eucalipto}$$

$$\epsilon_{\text{total}} = - 5.701,34 \text{ kcal/kg biomassa de cavaco de eucalipto}$$

Para o cavaco de eucalipto temos - 5.701,34 kcal de energia disponível por quilograma de biomassa.

Calculou-se a energia efetiva na equação (11), levando em consideração que a energia gerada pela combustão completa do combustível não corresponde à energia efetiva. O cavaco de eucalipto conforme representado no laudo do Anexo 1, contém 22,9% e 0,3% de cinzas as quais não geram energia, portanto deve ser desconsiderado da energia gerada na formação a massa de cinzas e a massa de água. Seguem abaixo os cálculos, levando em consideração a base de cálculo de 100 kg.

Logo:

$$\mathcal{E}_{efetiva} = \mathcal{E}_{total} \cdot [100 - \sum f_i + (\%)] \quad (11)$$

$\mathcal{E}_{efetiva}$ : Energia efetiva

$\mathcal{E}_t$ : Energia de formação da combustão

$f_i$ : Fração de cinzas

(%): Fração de água no material

$$\mathcal{E}_{efetiva} = -5.701,34 \cdot [100 - (0,3 + 22,9)]$$

$$\mathcal{E}_{efetiva} = - 437.862,84 \text{ kcal}/100 \text{ kg de biomassa}$$

$$\mathcal{E}_{efetiva} = -4.378,63 \text{ kcal}/\text{kg de biomassa}$$

Além dos gastos de energia para aquecer as cinzas e evaporar a umidade, temos a geração de água na combustão completa da biomassa, essa água também deve ser evaporada gastando assim uma quantidade de energia para essa ocorrência.

Logo, a energia para evaporar a água com a umidade de 22,9% considerando uma base de cálculo para alimentação de 100 kg:

Calculando a quantidade matéria de H<sub>2</sub>O em mols na equação (12):

$$Q_{H_2O} = 22,9 \text{ kg } H_2O / 18 \text{ kg } H_2O/\text{kmol} + 2,95 \text{ kmol } H_2O = 4,220 \text{ kmol } H_2O \quad (12)$$

Sendo assim a equação (13) para o cálculo de energia gasta na evaporação da água é:

$$\xi_{\text{evaporação}} = \Delta H_{\text{evaporação } H_2O} \cdot Q_{H_2O} \quad (13)$$

Visto que a entalpia de evaporação da água é 10,519 (kcal/mol) (PERRY; GREEN; MALONEY, 1988):

$$\xi_{\text{evaporação}} = 10,519 \text{ kcal/mol} \cdot 4.220,22 \text{ mol } H_2O \text{ em } 100 \text{ kg de biomassa} = 44.392,52 \text{ kcal/100 kg } H_2O$$

$$\xi_{\text{evaporação}} = 443,93 \text{ kcal/kg}$$

Sendo a energia gasta na evaporação de H<sub>2</sub>O igual a 443,93 kcal/kg de biomassa, a energia disponível para o sistema segundo a equação (14) é igual a:

$$\xi_{\text{disponível}} = \xi_{\text{evaporação}} + \xi_{\text{efetiva}} \quad (14)$$

$$\xi_{\text{disponível}} = 443,93 \text{ kcal/kg} + (-4.378,63) \text{ kcal/kg de biomassa}$$

$$\xi_{\text{disponível}} = -3.934,70 \text{ kcal/kg} \cdot 4.184 \text{ J/kcal}$$

$$\xi_{\text{disponível}} = 16,46 \text{ MJ/kg}$$

Segundo Anexo 1, o poder calorífico inferior experimental do cavaco de eucalipto:

IPT: 14,78 MJ/kg

E o valor teórico calculado é:

Teórico calculado: 16,46 MJ/kg

A diferença entre o valor medido experimentalmente e o teórico pode ser calculado pela equação (15):

$$\left( \frac{\text{Poder calorífico Experimental} - \text{Poder calorífico Teórico}}{\text{Poder calorífico Experimental}} \right) \cdot 100 \quad (15)$$

Logo:

$$(14,78 - 16,46 / 14,78) \cdot 100$$

Tendo uma diferença percentual de **11,4%**.

## 5.1.2 Biomassa 2 - Casca de Eucalipto

### 5.1.2.1 Cálculo de coeficiente estequiométrico e relação ar/combustível.

Para o cálculo de ar estequiométrico foram utilizados os dados das amostras analisadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (IPT) representados no laudo do Anexo 2, baseados no percentual de cada elemento na composição da biomassa foram calculados as quantidades de cada elemento em kmol.

Na Tabela 1 estão relacionados os dados das massas molares utilizadas para o cálculo em kmol de cada elemento.

**Tabela 1:** Massa molar dos componentes.

Massa molar	kmol/kg
Carbono	12,00
Hidrogênio	1,00
Nitrogênio	14,00
Oxigênio	16,00
N <sub>2</sub>	28,00
O <sub>2</sub>	32,00

Fonte: Autor, 2018

Inicialmente, nas análises realizadas, tinha-se a seguinte composição química.

**Tabela 5:** Composição química Casca Eucalipto.

<b>Biomassa: Casca de eucalipto</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Composição (m/m)</b>	<b>kmol</b>
Carbono	46,10	3,84
Hidrogênio	5,63	5,63
Nitrogênio	0,30	0,02
Oxigênio	43,97	2,75

Fonte: Análises realizadas pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (2018)

E para as cinzas:

**Tabela 6:** Percentual de cinzas na composição química de Casca de Eucalipto.

<b>Elemento</b>	<b>Composição (m/m)</b>
Cinzas	4

Fonte: Análises realizadas pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (2018)

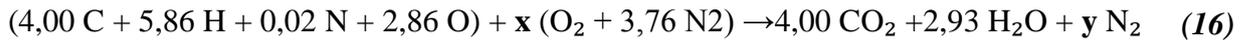
Desconsiderando as cinzas, para o cálculo de ar estequiométrico e refeita a distribuição dos percentuais:

**Tabela 7:** Composição química Casca de Eucalipto - Redistribuição sem cinzas.

<b>Biomassa : Casca de eucalipto</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Composição (m/m)</b>	<b>kmol</b>
Carbono	48,02	4,00
Hidrogênio	5,86	5,86
Nitrogênio	0,31	0,02
Oxigênio	45,80	2,86

Fonte: Autor, 2018

Abaixo, na equação (16), temos a combustão da queima da Casca de Eucalipto, com seus coeficientes estequiométricos:



**Biomassa**

**Ar**

**Produtos Gerados**

Levando em consideração a estequiometria da reação calcularam-se os coeficientes necessários para obter a quantidade de ar estequiométrico.

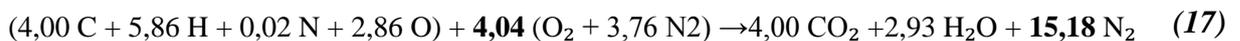
Calculando x

$$\begin{aligned} 2,86 + 2x &= (2 \cdot 4,00) + 2,93 \\ x &= (2,93 - 2,86 + (2 \cdot 4,00))/2 \\ x &= 4,04 \end{aligned}$$

Calculando y

$$\begin{aligned} 2y &= ((4,04 \cdot 3,76 \cdot 2) + 0,02) \\ y &= 15,18 \end{aligned}$$

Com isso temos a equação (17), com os coeficientes estequiométricos calculados:



**Biomassa**

**Ar**

**Produtos Gerados**

Na equação (18), calculou-se a massa de ar estequiométrico necessária para a combustão completa da biomassa.

$$(4,04 \cdot 32) + (4,04 \cdot 3,76 \cdot 28) = 554,61 \text{ kg de ar} \quad (18)$$

E por fim, na equação (19), a relação de ar/combustível para a biomassa Casca de Eucalipto.

$$a/c = 554,61 \text{ kg de ar} / 96 \text{ kg de biomassa} \quad (19)$$

$$a/c = 5,78 \text{ kg/kg}$$

Com isso, tem-se que para queimar 100 kg de casca de eucalipto, desconsiderando os 4,0 kg de cinzas, são necessários 554,61 kg de ar.

### 5.1.2.2 Cálculo teórico do poder calorífico

Conforme os resultados representados no laudo do Anexo 2, o poder calorífico real medido da casca de eucalipto é 12,55 MJ/kg, calculou-se o teórico, baseado em dados já disponíveis na literatura para comparar com o experimental. Considerando o calor de formação da água -68,317 kcal/mol e o calor de evaporação 10,519 kcal/mol a 25°C e 1 atm (PERRY; GREEN; MALONEY, 1988).

Para a queima do carbono temos as seguintes equações (20) e (21):



$$\Delta H^{\circ}f = -94,052 \text{ (kcal/mol)}$$



$$\Delta H^{\circ}f = -68,317 \text{ (kcal/mol)}$$

Logo a energia na equação (22),  $\epsilon_1$  corresponde à energia de formação do dióxido de carbono e na equação (23)  $\epsilon_2$  corresponde à energia de formação da água.

$$\epsilon_1 = -94,052 \text{ kcal/mol} \cdot 4.001,74 \text{ mol} = -376.371,28 \text{ kcal} \quad (22)$$

$$\epsilon_2 = -68,312 \text{ kcal/mol} \cdot 2.932,29 \text{ mol} = -200.310,71 \text{ kcal} \quad (23)$$

A energia total, calculada na equação (24), é a soma da formação do dióxido de carbono  $\epsilon_1$  e a energia de formação da água  $\epsilon_2$ :

$$\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (24)$$

Logo:

$$\epsilon_{\text{total}} = -376.371,28 + (-200.310,71)$$

$$\epsilon_{\text{total}} = -576.681,99 \text{ kcal por } 100 \text{ kg biomassa de casca de eucalipto}$$

$$\epsilon_{\text{total}} = -5.766,82 \text{ kcal/kg biomassa de casca de eucalipto}$$

Para a casca de eucalipto temos -5.766,82 kcal de energia disponível por quilograma de biomassa.

Calculou-se a energia efetiva na equação (25), levando em consideração que a energia gerada pela combustão completa do combustível não corresponde à energia efetiva. A casca de eucalipto conforme representado no laudo do Anexo 2, contém 29,9% e 4,0% de cinzas as quais não geram energia, portanto deve ser desconsiderado da energia gerada na formação a massa de cinzas e a massa de água. Seguem abaixo os cálculos, levando em consideração a base de cálculo de 100 kg.

Logo:

$$\epsilon_{\text{efetiva}} = \epsilon_{\text{total}} \cdot [100 - \sum f_i + (\%)] \quad (25)$$

$\epsilon_{\text{efetiva}}$ : Energia efetiva

$\epsilon_t$ : Energia de formação da combustão

$f_i$ : Fração de cinzas

(%): Fração de água no material

$$\xi_{\text{efetiva}} = -5.766,82 \cdot [100 - (4,0 + 29,9)]$$

$$\xi_{\text{efetiva}} = -381.186,80 \text{ kcal/100 kg de biomassa}$$

$$\xi_{\text{efetiva}} = -3.811,87 \text{ kcal/kg de biomassa}$$

Além dos gastos de energia para aquecer as cinzas e evaporar a umidade, temos a geração de água na combustão completa da biomassa, essa água também deve ser evaporada gastando assim uma quantidade de energia para essa ocorrência.

Logo, a energia para evaporar a água com a umidade de 29,9% considerando uma base de cálculo para alimentação de 100 kg:

Calculando a quantidade matéria de H<sub>2</sub>O em mols na equação (26):

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = 29,9 \text{ kg H}_2\text{O} / 18 \text{ kg H}_2\text{O/kmol} + 2,93 \text{ kmol H}_2\text{O} = 4,59 \text{ kmol H}_2\text{O} \quad (26)$$

Sendo assim a equação (27) para o cálculo de energia gasta na evaporação da água é:

$$\xi_{\text{evaporação}} = \Delta H_{\text{evaporação H}_2\text{O}} \cdot Q_{\text{H}_2\text{O}} \quad (27)$$

Visto que a entalpia de evaporação da água é 10,519 (kcal/mol) (PERRY; GREEN; MALONEY, 1988):

$$\xi_{\text{evaporação}} = 10,519 \text{ kcal/mol} \cdot 4.593,40 \text{ mol H}_2\text{O em 100 kg de biomassa} = 48.318,00 \text{ kcal/100 kg H}_2\text{O}$$

$$\xi_{\text{evaporação}} = 483,18 \text{ kcal/kg}$$

Sendo a energia gasta na evaporação de H<sub>2</sub>O igual a 483,18 kcal/ kg de biomassa, a energia disponível para o sistema segundo a equação (28) é igual a:

$$\epsilon_{\text{disponível}} = \epsilon_{\text{evaporação}} + \epsilon_{\text{efetiva}} \quad (28)$$

$$\epsilon_{\text{disponível}} = 483,18 \text{ kcal/kg} + (-3.811,87) \text{ kcal/kg de biomassa}$$

$$\epsilon_{\text{disponível}} = - 3.328,69 \text{ kcal/kg} \cdot 4.184 \text{ J/kcal}$$

$$\epsilon_{\text{disponível}} = 13,92 \text{ MJ/kg}$$

Segundo Anexo 2, o poder calorífico experimental da casca de eucalipto:

IPT: 12,55 MJ/kg

E o valor teórico calculado é:

Teórico calculado: 13,92 MJ/kg

A diferença entre o valor medido experimentalmente e o teórico pode ser calculado pela equação (29):

$$\left( \frac{\text{Poder calorífico Experimental} - \text{Poder calorífico Teórico}}{\text{Poder calorífico Experimental}} \right) \cdot 100 \quad (29)$$

Logo:

$$(12,55 - 13,92 / 12,55) \cdot 100$$

Tendo uma diferença percentual de **10,9%**.

### **5.1.3 Biomassa 3 - Chapa de MDF**

#### **5.1.3.1 Cálculo de coeficiente e estequiométrico e relação ar/combustível.**

Para o cálculo de ar estequiométrico foram utilizados os dados das amostras analisadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (IPT) representados no laudo do Anexo 3, baseados no percentual de cada elemento na composição da biomassa foram calculados as quantidades de cada elemento em kmol.

Na Tabela 1, estão relacionados os dados das massas molares utilizadas para o cálculo em kmol de cada elemento.

**Tabela 1:** Massa molar dos componentes.

Massa molar	kmol/kg
Carbono	12,00
Hidrogênio	1,00
Nitrogênio	14,00
Oxigênio	16,00
N <sub>2</sub>	28,00
O <sub>2</sub>	32,00

Fonte: Autor, 2018

Inicialmente, nas análises realizadas, tinha-se a seguinte composição química.

**Tabela 8:** Composição química Chapa MDF

Biomassa: Chapa MDF		
Elemento	Composição (m/m)	kmol
Carbono	48,60	4,05
Hidrogênio	6,46	6,46
Nitrogênio	2,50	0,18
Oxigênio	42,04	2,63

Fonte: Análises realizadas pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (2018)

E para as cinzas:

**Tabela 9:** Percentual de cinzas na composição química de Chapa MDF.

Elemento	Composição (m/m)
Cinzas	0,4

Fonte: Análises realizadas pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (2018)

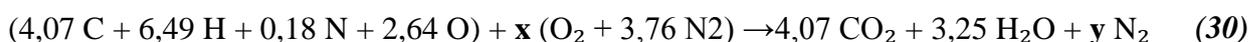
Desconsiderando as cinzas, para o cálculo de ar estequiométrico e refeita a distribuição dos percentuais:

**Tabela 10:** Composição química Chapa MDF - Redistribuição sem cinzas.

<b>Biomassa: Chapa MDF</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Composição (m/m)</b>	<b>kmol</b>
Carbono	48,80	4,07
Hidrogênio	6,49	6,49
Nitrogênio	2,51	0,18
Oxigênio	42,21	2,64

Fonte: Autor, 2018

Abaixo, na equação (30), temos a combustão da queima da chapa de MDF (triturada) com seus coeficientes estequiométricos:



**Biomassa**

**Ar**

**Produtos Gerados**

Levando em consideração a estequiometria da reação calcularam-se os coeficientes necessários para obter a quantidade de ar estequiométrico.

Calculando **x**

$$2,64 + 2x = (2 \cdot 4,07) + 3,25$$

$$x = (3,25 - 2,64 + (2 \cdot 4,07))/2$$

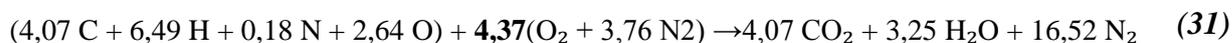
$$x = 4,37$$

Calculando **y**

$$y = (0,18 + (4,37 \cdot 3,76 \cdot 2))$$

$$y = 16,52$$

Com isso temos a equação (31), com os coeficientes estequiométricos calculados:



**Biomassa**

**Ar**

**Produtos Gerados**

Na equação (32), calculou-se a massa de ar estequiométrico necessária para a combustão completa da biomassa.

$$(4,07 \cdot 32) + (4,07 \cdot 3,76 \cdot 28) = 599,88 \text{ kg de ar} \quad (32)$$

E por fim, na equação (33), a relação de ar/combustível para a biomassa Cavaco de Eucalipto.

$$a/c = 599,38 \text{ kg de ar} / 99,6 \text{ kg de biomassa} \quad (33)$$

$$a/c = 6,02 \text{ kg/kg}$$

Com isso, tem-se que para queimar 100 kg de chapa de MDF (triturada), desconsiderando os 0,4 kg de cinzas, são necessários 599,38 kg de ar.

### 5.1.3.2 Cálculo teórico do poder calorífico

Conforme os resultados representados no laudo do Anexo 3, o poder calorífico real medido de chapa de MDF (triturada) é 17,56 MJ/kg, calculou-se o teórico, baseado em dados já disponíveis na literatura para comparar com o experimental. Considerando o calor de formação da água -68,317 kcal/mol e o calor de evaporação 10,519 kcal/mol a 25°C e 1 atm (PERRY; GREEN; MALONEY, 1988).

Para a queima do carbono temos as seguintes equações (34) e (35):



$$\Delta H^{\circ}f = - 94,052 \text{ (kcal/mol)}$$



$$\Delta H^{\circ}f = - 68,317 \text{ (kcal/mol)}$$

Logo a energia na equação (36),  $\epsilon_1$  corresponde à energia de formação do dióxido de carbono e na equação (37)  $\epsilon_2$  corresponde à energia de formação da água.

$$\epsilon_1 = -94,052 \text{ kcal/mol} \cdot 4.066,27 \text{ mol} = -382.440,36 \text{ kcal} \quad (36)$$

$$\epsilon_2 = -68,312 \text{ kcal/mol} \cdot 3.242,97 \text{ mol} = -221.533,90 \text{ kcal} \quad (37)$$

A energia total, calculada na equação (38), é a soma da formação do dióxido de carbono  $\epsilon_1$  e a energia de formação da água  $\epsilon_2$ :

0

$$\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (38)$$

Logo:

$$\epsilon_{\text{total}} = -382.440,36 + (-221.533,90)$$

$$\epsilon_{\text{total}} = -603.974,26 \text{ kcal por } 100 \text{ kg biomassa de chapa de MDF (triturada).}$$

$$\epsilon_{\text{total}} = -6.039,74 \text{ kcal/kg biomassa de chapa de MDF (triturada).}$$

Para a chapa de MDF (triturada) temos -6.039,74 kcal de energia disponível por quilograma de biomassa.

Calculou-se a energia efetiva na equação (39), levando em consideração que a energia gerada pela combustão completa do combustível não corresponde à energia efetiva. A chapa de MDF (triturada) conforme representado no laudo do Anexo 3, contém 8,1% e 0,4% de cinzas as quais não geram energia, portanto deve ser desconsiderado da energia gerada na formação a massa de cinzas e a massa de água. Seguem abaixo os cálculos, levando em consideração a base de cálculo de 100 kg.

Logo:

$$\epsilon_{\text{efetiva}} = \epsilon_{\text{total}} \cdot [100 - \sum f_i + (\%)] \quad (39)$$

$\xi_{\text{efetiva}}$ : Energia efetiva

$\xi_t$ : Energia de formação da combustão

$f_i$ : Fração de cinzas

(%): Fração de água no material

$$\xi_{\text{efetiva}} = -6.039,74 \cdot [100 - (0,4 + 8,1)]$$

$$\xi_{\text{efetiva}} = -552.636,45 \text{ kcal/100 kg de biomassa}$$

$$\xi_{\text{efetiva}} = -5.526,36 \text{ kcal/kg de biomassa}$$

Além dos gastos de energia para aquecer as cinzas e evaporar a umidade, temos a geração de água na combustão completa da biomassa, essa água também deve ser evaporada gastando assim uma quantidade de energia para essa ocorrência.

Logo, a energia para evaporar a água com a umidade de 8,1% considerando uma base de cálculo para alimentação de 100 kg:

Calculando a quantidade matéria de H<sub>2</sub>O em mols na equação (40):

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = 8,1 \text{ kg H}_2\text{O} / 18 \text{ kg H}_2\text{O/kmol} + 3,25 \text{ kmol H}_2\text{O} = 3,70 \text{ kmol H}_2\text{O} \quad (40)$$

Sendo assim a equação (41) para o cálculo de energia gasta na evaporação da água é:

$$\xi_{\text{evaporação}} = \Delta H_{\text{evaporação H}_2\text{O}} \cdot Q_{\text{H}_2\text{O}} \quad (41)$$

Visto que a entalpia de evaporação da água é 10,519 (kcal/mol) (PERRY; GREEN; MALONEY, 1988):

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{evaporação}} &= 10,519 \text{ kcal/mol} \cdot 3.695,00 \text{ mol H}_2\text{O em 100 kg de biomassa} = 38.867,71 \\ &\text{kcal/100 kg H}_2\text{O} \end{aligned}$$

$$\epsilon_{\text{evaporação}} = 388,68 \text{ kcal/kg}$$

Sendo a energia gasta na evaporação de H<sub>2</sub>O igual a 388,68 kcal/ kg de biomassa, a energia disponível para o sistema segundo a equação (42) é igual a:

$$\epsilon_{\text{disponível}} = \epsilon_{\text{evaporação}} + \epsilon_{\text{efetiva}} \quad (42)$$

$$\epsilon_{\text{disponível}} = 388,68 \text{ kcal/kg} + (-5.526,36) \text{ kcal/kg de biomassa}$$

$$\epsilon_{\text{disponível}} = -5.915,04 \text{ kcal/kg} \cdot 4.184 \text{ J/kcal}$$

$$\epsilon_{\text{disponível}} = 21,50 \text{ MJ/kg}$$

Segundo Anexo 3, o poder calorífico experimental do chapa de MDF (triturada):

IPT: 17,56 MJ/kg

E o valor teórico calculado é:

Teórico calculado: 21,50 MJ/kg

A diferença entre o valor medido experimentalmente e o teórico pode ser calculado pela equação (43):

$$\begin{aligned} &(\text{Poder calorífico Experimental} - \text{Poder calorífico Teórico} / \text{Poder calorífico} \\ &\text{Experimental}) \cdot 100 \end{aligned} \quad (43)$$

Logo:

$$(17,70 - 21,50 / 17,70) \cdot 100$$

Tendo uma diferença percentual de 11%.

#### 5.1.4 Biomassa 4 - Chapa de MDP

#### 5.1.4.1 Cálculo de coeficiente e estequiométrico e relação ar/combustível.

Para o cálculo de ar estequiométrico foram utilizados os dados das amostras analisadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (IPT) representados no laudo do Anexo 4, baseados no percentual de cada elemento na composição da biomassa foram calculados as quantidades de cada elemento em kmol.

Na Tabela 1, estão relacionados os dados das massas molares utilizadas para o cálculo em kmol de cada elemento.

Tabela 1: Massa molar dos componentes.

<b>Massa molar</b>	<b>kmol/kg</b>
Carbono	12,00
Hidrogênio	1,00
Nitrogênio	14,00
Oxigênio	16,00
N <sub>2</sub>	28,00
O <sub>2</sub>	32,00

Fonte: Autor, 2018

Inicialmente, nas análises realizadas, tinha-se a seguinte composição química.

**Tabela 11:** Composição química Chapa MDP

<b>Biomassa: Chapa MDP</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Composição (m/m)</b>	<b>kmol</b>
Carbono	46,60	3,88
Hidrogênio	6,45	6,45
Nitrogênio	3,20	0,23
Oxigênio	43,35	2,71

Fonte: Análises realizadas pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (2018)

E para as cinzas:

**Tabela 12:** Percentual de cinzas na composição química de Chapa MDP.

Elemento	Composição (m/m)
Cinzas	0,4

Fonte: Análises realizadas pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (2018)

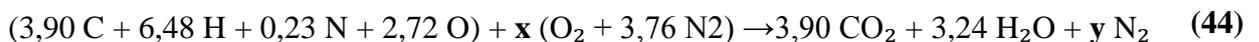
Desconsiderando as cinzas, para o cálculo de ar estequiométrico e refeita a distribuição dos percentuais:

**Tabela 13:** Composição química Chapa MDP - Redistribuição sem cinzas.

Biomassa: Chapa MDP		
Elemento	Composição (m/m)	kmol
Carbono	46,79	3,90
Hidrogênio	6,48	6,48
Nitrogênio	3,21	0,23
Oxigênio	43,52	2,72

Fonte: Autor, 2018

Abaixo, na equação (44), temos a combustão da queima da chapa de MDF (triturada) com seus coeficientes estequiométricos:



**Biomassa**

**Ar**

**Produtos Gerados**

Levando em consideração a estequiometria da reação calcularam-se os coeficientes necessários para obter a quantidade de ar estequiométrico.

Calculando x

$$2,72 + 2x = (2 \cdot 3,90) + 3,24$$

Calculando y

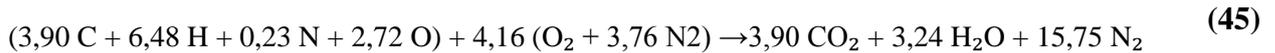
$$2y = ((4,16 \cdot 3,76 \cdot 2) + 0,23)$$

$$x = (3,24 - 2,72 + (2 \cdot 3,90))/2$$

$$y = 15,75$$

$$x = 4,16$$

Com isso temos a equação (45), com os coeficientes estequiométricos calculados:



Biomassa

Ar

Produtos Gerados

Na equação (46), calculou-se a massa de ar estequiométrico necessária para a combustão completa da biomassa.

$$(4,16 \cdot 32) + (4,16 \cdot 3,76 \cdot 28) = 571,08 \text{ kg de ar} \quad (46)$$

E por fim, na equação (47), a relação de ar/combustível para a biomassa Cavaco de Eucalipto.

$$a/c = 571,08 \text{ kg de ar} / 99,6 \text{ kg de biomassa} \quad (47)$$

$$a/c = 5,73 \text{ kg/kg}$$

Com isso, tem-se que para queimar 100 kg de chapa de MDP (triturada), desconsiderando os 0,4 kg de cinzas, são necessários 571,08 kg de ar.

### 5.1.3.2 Cálculo teórico do poder calorífico

Conforme os resultados representados no laudo do Anexo 4, o poder calorífico real medido de chapa de MDP (triturada) é 17,70 MJ/kg, calculou-se o teórico, baseado em dados já disponíveis na literatura para comparar com o experimental. Considerando o calor de formação da água -68,317 kcal/mol e o calor de evaporação 10,519 kcal/mol a 25°C e 1 atm (PERRY; GREEN; MALONEY, 1988).

Para a queima do carbono temos as seguintes equações (48) e (49):



$$\Delta H^\circ_f = -94,052 \text{ (kcal/mol)}$$



$$\Delta H^\circ_f = -68,317 \text{ (kcal/mol)}$$

Logo a energia na equação (50),  $\epsilon_1$  corresponde à energia de formação do dióxido de carbono e na equação (51)  $\epsilon_2$  corresponde à energia de formação da água.

$$\epsilon_1 = -94,052 \text{ kcal/mol} \cdot 3.898,93 \text{ mol} = -366.702,07 \text{ kcal} \quad (50)$$

$$\epsilon_2 = -68,312 \text{ kcal/mol} \cdot 3.237,95 \text{ mol} = -221.190,96 \text{ kcal} \quad (51)_-$$

A energia total, calculada na equação (52), é a soma da formação do dióxido de carbono  $\epsilon_1$  e a energia de formação da água  $\epsilon_2$ :

$$\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (52)$$

Logo:

$$\epsilon_{\text{total}} = -366.702,07 + (-221.190,96)$$

$$\epsilon_{\text{total}} = -587.190,04 \text{ kcal por } 100 \text{ kg biomassa de chapa de MDP (triturada).}$$

$$\epsilon_{\text{total}} = -5.878,93 \text{ kcal/kg biomassa de chapa de MDP (triturada).}$$

Para a chapa de MDP (triturada) temos -5.878,93 kcal de energia disponível por quilograma de biomassa.

Calculou-se a energia efetiva na equação (53), levando em consideração que a energia gerada pela combustão completa do combustível não corresponde à energia efetiva. A chapa de MDF (triturada) conforme representado no laudo do Anexo 4, contém 8,1% e 0,4% de cinzas as quais não geram energia, portanto deve ser desconsiderado da energia gerada na formação a massa de cinzas e a massa de água. Seguem abaixo os cálculos, levando em consideração a base de calculo de 100 kg.

Logo:

$$\mathcal{E}_{efetiva} = \mathcal{E}_{total} \cdot [100 - \sum f_i + (\%)] \quad (53)$$

$\mathcal{E}_{efetiva}$ : Energia efetiva

$\mathcal{E}_t$ : Energia de formação da combustão

$f_i$ : Fração de cinzas

(%): Fração de água no material

$$\mathcal{E}_{efetiva} = -5.878,93 \cdot [100 - (0,4 + 7,4)]$$

$$\mathcal{E}_{efetiva} = -542.037,38 \text{ kcal/100 kg de biomassa}$$

$$\mathcal{E}_{efetiva} = -5.420,37 \text{ kcal/kg de biomassa}$$

Além dos gastos de energia para aquecer as cinzas e evaporar a umidade, temos a geração de água na combustão completa da biomassa, essa água também deve ser evaporada gastando assim uma quantidade de energia para essa ocorrência.

Logo, a energia para evaporar a água com a umidade de 7,4% considerando uma base de cálculo para alimentação de 100 kg:

Calculando a quantidade matéria de H<sub>2</sub>O em mols na equação (54):

$$Q_{H_2O} = 7,4 \text{ kg } H_2O / 18 \text{ kg } H_2O/\text{kmol} + 3,24 \text{ kmol } H_2O = 3,65 \text{ kmol } H_2O \quad (54)$$

Sendo assim a equação (55) para o cálculo de energia gasta na evaporação da água é:

$$\xi_{\text{evaporação}} = \Delta H_{\text{evaporação } H_2O} \cdot Q_{H_2O} \quad (55)$$

Visto que a entalpia de evaporação da água é 10,519 (kcal/mol) (PERRY; GREEN; MALONEY, 1988):

$$\xi_{\text{evaporação}} = 10,519 \text{ kcal/mol} \cdot 3.649,06 \text{ mol } H_2O \text{ em } 100 \text{ kg de biomassa} = 38.384,49 \text{ kcal/100 kg } H_2O$$

$$\xi_{\text{evaporação}} = 383,84 \text{ kcal/kg}$$

Sendo a energia gasta na evaporação de H<sub>2</sub>O igual a 383,84 kcal/ kg de biomassa, a energia disponível para o sistema segundo a equação (56) é igual a:

$$\xi_{\text{disponível}} = \xi_{\text{evaporação}} + \xi_{\text{efetiva}} \quad (56)$$

$$\xi_{\text{disponível}} = 383,84 \text{ kcal/kg} + (-5.526,36) \text{ kcal/kg de biomassa}$$

$$\xi_{\text{disponível}} = -5.036,53 \text{ kcal/kg} \cdot 4.184 \text{ J/kcal}$$

$$\xi_{\text{disponível}} = 21,07 \text{ MJ/kg}$$

Segundo Anexo 4, o poder calorífico experimental do chapa de MDP (triturada):

IPT: **17,70** MJ/kg

E o valor teórico calculado é:

Teórico calculado: **21,07** MJ/kg

A diferença entre o valor medido experimentalmente e o teórico pode ser calculado pela equação (57):

$$\left( \frac{\text{Poder calorífico Experimental} - \text{Poder calorífico Teórico}}{\text{Poder calorífico Experimental}} \right) \cdot 100 \quad (57)$$

Logo:

$$(17,70 - 21,07 / 17,70) \cdot 100$$

Tendo uma diferença percentual de **12%**.

### **5.1.5 Biomassa 5 - Pó de MDP e MDF**

#### **5.1.5.1 Cálculo de coeficiente e estequiométrico e relação ar/combustível.**

Para o cálculo de ar estequiométrico foram utilizados os dados das amostras analisadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (IPT) representados no laudo do Anexo 5, baseados no percentual de cada elemento na composição da biomassa foram calculados as quantidades de cada elemento em kmol.

Na Tabela 1, estão relacionados os dados das massas molares utilizadas para o cálculo em kmol de cada elemento.

Tabela 1: Massa molar dos componentes.

<b>Massa molar</b>	<b>kmol/kg</b>
Carbono	12,00
Hidrogênio	1,00
Nitrogênio	14,00
Oxigênio	16,00
N2	28,00
O2	32,00

Fonte: Autor, 2018

Inicialmente, nas análises realizadas, tinha-se a seguinte composição química.

**Tabela 14:** Composição química Pó de MDP e MDF

<b>Biomassa: Pó de MDP/MDF</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Composição (%)</b>	<b>kmol</b>
Carbono	47,00	3,92
Hidrogênio	5,98	5,98
Nitrogênio	4,40	0,31
Oxigênio	41,18	2,57

Fonte: Análises realizadas pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (2018)

E para as cinzas:

**Tabela 15:** Percentual de cinzas na composição química do Pó de MDP e MDF.

<b>Elemento</b>	<b>Composição (%)</b>
Cinzas	1,4

Fonte: Análises realizadas pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de SP (2018)

Desconsiderando as cinzas, para o cálculo de ar estequiométrico e refeita a distribuição dos percentuais:



Na equação (60), calculou-se a massa de ar estequiométrico necessária para a combustão completa da biomassa.

$$(4,18 \cdot 32) + (4,18 \cdot 3,76 \cdot 28) = 573,83 \text{ kg de ar} \quad (60)$$

E por fim, na equação (61), a relação de ar/combustível para a biomassa pó de MDP e MDF.

$$a/c = 573,83 \text{ kg de ar} / 98,60 \text{ kg de biomassa} \quad (61)$$

$$a/c = 5,82 \text{ kg/kg}$$

Com isso, tem-se que para queimar 100 kg de pó de MDP e MDF, desconsiderando os 1,4 kg de cinzas, são necessários 573,83 kg de ar.

### 5.1.3.2 Cálculo teórico do poder calorífico

Conforme os resultados representados no laudo do Anexo 5, o poder calorífico real medido de pó de MDP e MDF é 19,11 MJ/kg, calculou-se o teórico, baseado em dados já disponíveis na literatura para comparar com o experimental. Considerando o calor de formação da água -68,317 kcal/mol e o calor de evaporação 10,519 kcal/mol a 25°C e 1 atm (PERRY; GREEN; MALONEY, 1988).

Para a queima do carbono temos as seguintes equações (62) e (63):



$$\Delta H^{\circ}f = -94,052 \text{ (kcal/mol)}$$



$$\Delta H^{\circ}f = -68,317 \text{ (kcal/mol)}$$

Logo a energia na equação (64),  $\epsilon_1$  corresponde à energia de formação do dióxido de carbono e na equação (65)  $\epsilon_2$  corresponde à energia de formação da água.

$$\epsilon_1 = -94,052 \text{ kcal/mol} \cdot 3970,00 \text{ mol} = -373.386,44 \text{ kcal} \quad (64)$$

$$\epsilon_2 = -68,312 \text{ kcal/mol} \cdot 3030,00 \text{ mol} = -206.980,36 \text{ kcal} \quad (65)$$

A energia total, calculada na equação (66), é a soma da formação do dióxido de carbono  $\epsilon_1$  e a energia de formação da água  $\epsilon_2$ :

$$\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (66)$$

Logo:

$$\epsilon_{\text{total}} = -373.386,44 + (-206.980,36)$$

$$\epsilon_{\text{total}} = -580.371,80 \text{ kcal por } 100 \text{ kg biomassa de Pó de MDP e MDF.}$$

$$\epsilon_{\text{total}} = -5.803,72 \text{ kcal/kg biomassa de Pó de MDP e MDF}$$

Para o Pó de MDP e MDF (triturada) -5.803,72 kcal de energia disponível por quilograma de biomassa.

Calculou-se a energia efetiva na equação (67), levando em consideração que a energia gerada pela combustão completa do combustível não corresponde à energia efetiva. O pó de MDP e MDF conforme representado no laudo do Anexo 5, contém 13,4% e 1,4% de cinzas as quais não geram energia, portanto deve ser desconsiderado da energia gerada na formação a

massa de cinzas e a massa de água. Seguem abaixo os cálculos, levando em consideração a base de cálculo de 100 kg.

Logo:

$$\epsilon_{\text{efetiva}} = \epsilon_{\text{total}} \cdot [100 - \sum f_i + (\%)] \quad (67)$$

$\epsilon_{\text{efetiva}}$ : Energia efetiva

$\epsilon_t$ : Energia de formação da combustão

$f_i$ : Fração de cinzas

(%): Fração de água no material

$$\epsilon_{\text{efetiva}} = -5.803,72 \cdot [100 - (1,4 + 13,4)]$$

$$\epsilon_{\text{efetiva}} = -494.476,77 \text{ kcal/100 kg de biomassa}$$

$$\epsilon_{\text{efetiva}} = -4.944,77 \text{ kcal/kg de biomassa}$$

Além dos gastos de energia para aquecer as cinzas e evaporar a umidade, temos a geração de água na combustão completa da biomassa, essa água também deve ser evaporada gastando assim uma quantidade de energia para essa ocorrência.

Logo, a energia para evaporar a água com a umidade de 13,4% considerando uma base de cálculo para alimentação de 100 kg:

Calculando a quantidade matéria de H<sub>2</sub>O em mols na equação (68):

$$Q_{\text{H}_2\text{O}} = 13,4 \text{ kg H}_2\text{O} / 18 \text{ kg H}_2\text{O/kmol} + 3,03 \text{ kmol H}_2\text{O} = 3,77 \text{ kmol H}_2\text{O} \quad (68)$$

Sendo assim a equação (69) para o cálculo de energia gasta na evaporação da água é:

$$\epsilon_{\text{evaporação}} = \Delta H_{\text{evaporação H}_2\text{O}} \cdot Q_{\text{H}_2\text{O}} \quad (69)$$

Visto que a entalpia de evaporação da água é 10,519 (kcal/mol) (PERRY; GREEN; MALONEY, 1988):

$$\epsilon_{\text{evaporação}} = 10,519 \text{ kcal/mol} \cdot 3774,44 \text{ mol H}_2\text{O em 100 kg de biomassa} = 39.703,38 \text{ kcal/100 kg H}_2\text{O}$$

$$\epsilon_{\text{evaporação}} = 397,03 \text{ kcal/kg}$$

Sendo a energia gasta na evaporação de H<sub>2</sub>O igual a 397,03 kcal/ kg de biomassa, a energia disponível para o sistema segundo a equação (70) é igual a:

$$\epsilon_{\text{disponível}} = \epsilon_{\text{evaporação}} + \epsilon_{\text{efetiva}} \quad (70)$$

$$\epsilon_{\text{disponível}} = 397,03 \text{ kcal/kg} + (-4.944,77) \text{ kcal/kg de biomassa}$$

$$\epsilon_{\text{disponível}} = -4.547,73 \text{ kcal/kg} \cdot 4.184 \text{ J/kcal}$$

$$\epsilon_{\text{disponível}} = 19,03 \text{ MJ/kg}$$

Segundo Anexo 5, o poder calorífico experimental do pó de MDP e MDF:

$$\text{IPT: } 16,55 \text{ MJ/kg}$$

E o valor teórico calculado é:

$$\text{Teórico calculado: } 19,03 \text{ MJ/kg}$$

A diferença entre o valor medido experimentalmente e o teórico pode ser calculado pela equação (71):

$$\frac{(\text{Poder calorífico Experimental} - \text{Poder calorífico Teórico})}{\text{Poder calorífico Experimental}} \cdot 100 \quad (71)$$

Logo:

$$\frac{(16,55 - 19,03)}{16,55} \cdot 100$$

Tendo uma diferença percentual de 15,0%.

### 5.1.6 Comparativo Poder Calorífico das Biomassas

Depois de calculados os poderes caloríficos teóricos, pode-se analisar através da Tabela (17) a diferença percentual entre o valor experimental e o valor calculado teórico. A menor diferença entre os dois valores foi da casca de eucalipto, com o valor 10,9% e a maior diferença foi para o pó de MDP e MDF com o valor 15,0%.

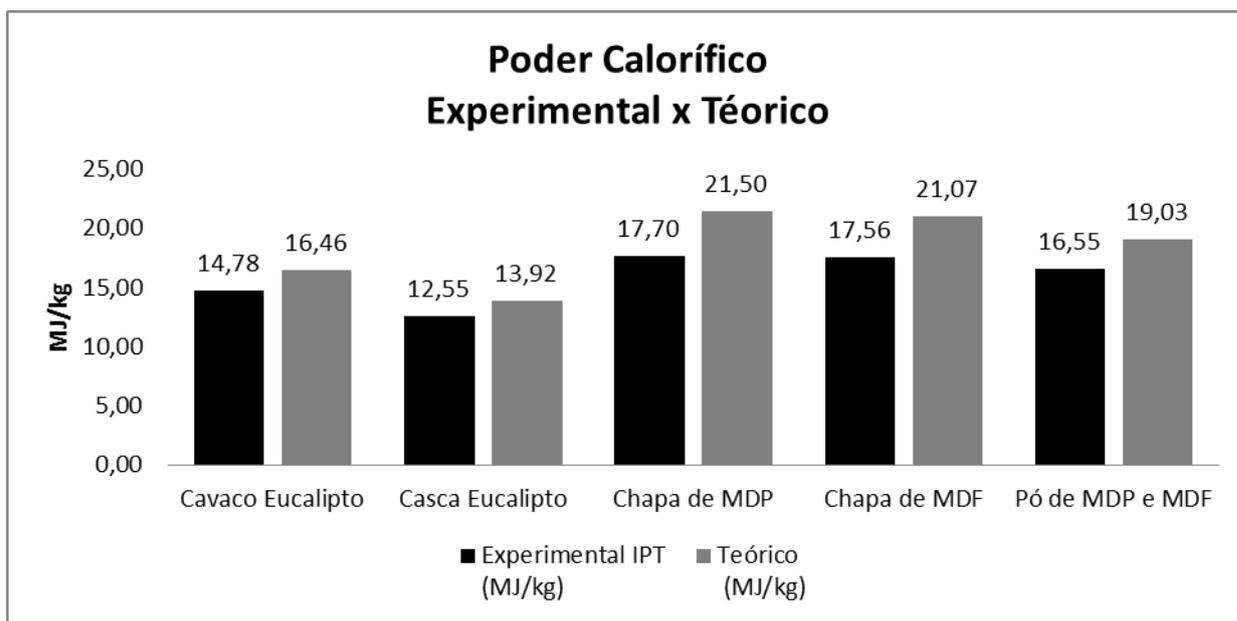
**Tabela 17:** Comparativos Poderes Caloríficos Biomassas

Poder Calorífico	Experimental IPT (MJ/kg)	Teórico (MJ/kg)	Diferença (%)
Cavaco Eucalipto	14,78	16,46	11,4%
Casca Eucalipto	12,55	13,92	10,9%
Chapa de MDP	17,70	21,50	12,0%
Chapa de MDF	17,56	21,07	11,0%
Pó de MDP e MDF	16,55	19,03	15,0%

Fonte: Autor, 2018

Na Figura (19), está representado também o comparativo entre o valor experimental e o calculado.

Figura 20 - Poder Calorífico - Experimental x Teórico



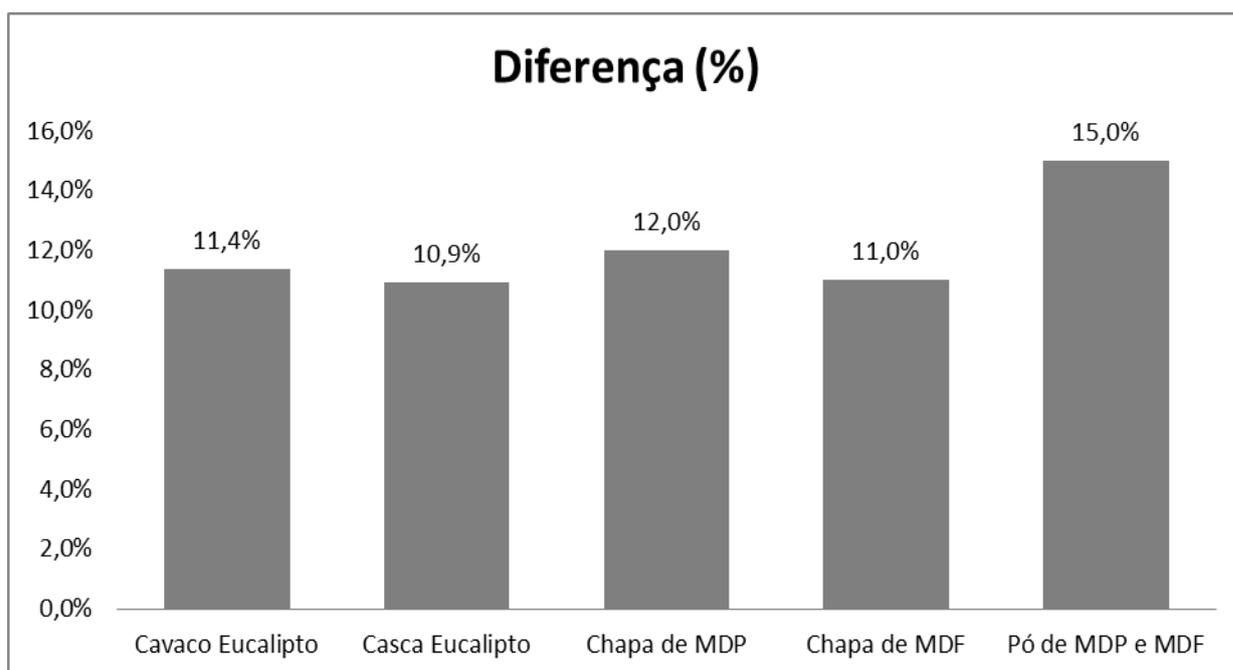
Fonte: Autor, 2018

A variação pode ser influenciada pela a umidade e densidade do material. As análises foram realizadas uma semana após a coleta, sendo assim teve diferença de umidade do momento da coleta para o dia de realização da análise.

O poder calorífico da madeira é diretamente influenciado pelo teor de umidade e pela massa específica básica, sendo que qualquer variação em algum desses parâmetros influencia no poder calorífico. Quanto maior o teor de umidade maior é o gasto energético para evaporar a água presente na madeira, e quanto menor a massa específica básica menor será o seu poder calorífico.

Na figura (20) pode-se ver a representação da diferença entre os valores teóricos e experimentais.

**Figura 21** - Diferença Experimental x Teórico



Fonte: Autor, 2018.

## 6. CONCLUSÃO

O poder calorífico da madeira é diretamente influenciado pelo teor de umidade e pela massa específica básica, sendo que qualquer variação em algum desses parâmetros influencia no poder calorífico. Quanto maior o teor de umidade maior é o gasto energético para evaporar a água presente na madeira, e quanto menor a massa específica básica menor será o seu poder calorífico. O poder calorífico superior do cavaco de eucalipto calculado estequiometricamente foi de 16,46 MJ/kg, enquanto o obtido experimentalmente pelo IPT foi de 14,78 MJ/kg; portanto o desvio foi de 11,4%, já para a casca de eucalipto calculado estequiometricamente foi de 13,92 MJ/kg, enquanto o obtido experimentalmente pelo IPT foi de 12,55 MJ/kg, portanto o desvio foi de 10,9%, para o MDF poder calorífico superior calculado estequiometricamente foi de 21,07 MJ/kg enquanto o obtido experimentalmente pelo IPT foi de 17,56 MJ/kg, portanto o desvio foi de 11%, para o MDP o poder calorífico superior calculado estequiometricamente foi 21,50 MJ/kg enquanto o obtido experimentalmente pelo IPT 17,70 MJ/kg , portanto o desvio foi de 12% e por fim para o Pó de MDP e MDF o poder calorífico superior calculado estequiometricamente foi 19,03 MJ/kg enquanto o obtido experimentalmente pelo IPT 16,55 MJ/kg portanto o desvio foi de 15%.

## 7. REFERÊNCIAS

LEAL, Manoel Regis Lima Verde. O potencial de aproveitamento da energia da biomassa. **Inovação Uniemp**, Campinas, v. 1, n. 3, dez. 2005. Disponível em <[http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1808-23942005000300024&lng=pt&nrm=iso](http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1808-23942005000300024&lng=pt&nrm=iso)>. acessos em 03 set. 2018.

FOELKEL, Celso. Parte 1: Biomassa Florestal & Florestas Energéticas. In: FOELKEL, Celso. **Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade**. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2016. cap. 43, p. 1-239. Disponível em: <[http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT43\\_Florestas\\_Energeticas\\_Eucaliptos.pdf](http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT43_Florestas_Energeticas_Eucaliptos.pdf)>. Acesso em: 17 set. 2018.

PINHEIRO, Paulo César da Costa e VALLE Ramon Molina. Controle de Combustão: Otimização do Excesso de ar. In: II CONGRESSO DE EQUIPAMENTOS E AUTOMAÇÃO DA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA, 09-11 Agosto 1995, Rio de Janeiro, RJ, Anais ... Automação Industrial São Paulo: ABIQUIM, Associação Brasileira de Indústrias Química e de Produtos Derivados, 1995. p.157-162.

MARQUES FARIAS, Leonel; AFONSO SELBITTO, Miguel. **Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras**. Educação, Ciência e Tecnologia, Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 1-10, jan. 2011. Disponível em: <[http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista\\_SIER/v.%2012%2C%20n.%2017%20%282011%29/Apresenta%E7%E3o.pdf](http://www.liberato.com.br/sites/default/files/arquivos/Revista_SIER/v.%2012%2C%20n.%2017%20%282011%29/Apresenta%E7%E3o.pdf)>. Acesso em: 17 set. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. (Brasil). Biomassa. In: **AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA**. (Brasil). Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 3. ed. Brasília: [s.n.], 2008. cap. 4, p. 63-74. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2018.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. Perry's chemical engineers' handbook. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

SOARES, Thelma Shirlen et al. USO DA BIOMASSA FLORESTAL NA GERAÇÃO DE ENERGIA. 2006. 9 p. Artigo (**USO DA BIOMASSA FLORESTAL NA GERAÇÃO DE ENERGIA - ENGENHARIA FLORESTAL**)- Universidade Federal de Viçosa, Garça, 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: 17 set. 2018.

SOLUÇÕES INDUSTRIAIS, DWS. **Filtração: Filtro de Manga**. 1. 2015. Disponível em: <[https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/energia\\_e\\_meio\\_ambiente/delta-ducon-engenharia-e-equipamentos-industriais-ltda/produtos/filtracao/filtro-de-mangas](https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/energia_e_meio_ambiente/delta-ducon-engenharia-e-equipamentos-industriais-ltda/produtos/filtracao/filtro-de-mangas)>. Acesso em: 03 dez. 2018.

TOOLS, Torch. **Descarte de sobras de marcenaria**. 1. 2016. Disponível em: <<https://www.blogtorchtools.com.br/descarte-de-sobras-de-marcenaria/>>. Acesso em: 03 dez. 2018.

FOELKEL, Celso. **O Processo de Impregnação dos Cavacos de Madeira de Eucalipto pelo Licor Kraft de Cozimento**. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2009. 97 p. v. 1. Disponível em: <[http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT15\\_ImpregnacaoCavacos.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT15_ImpregnacaoCavacos.pdf)>. Acesso em: 03 dez. 2018.

FOELKEL, Celso. **Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade: Geração de Calor, Vapor e Eletricidade**. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2016. 264 p. v. 2. Disponível em: <[http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT44\\_Geracao\\_Calor\\_Vapor\\_Eletricidade.pdf](http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT44_Geracao_Calor_Vapor_Eletricidade.pdf)>. Acesso em: 03 dez. 2018.

FOELKEL, Celso. **Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose e Papel de Eucalipto: Casca Suja**. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2010. 100 p. v. 2. Disponível em: <[http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT21\\_CascaSuja.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT21_CascaSuja.pdf)>. Acesso em: 03 dez. 2018.

MASSON, T. J. **Desenvolvimento e Reciclagem do polipropileno modificado pela presença de cadeias híbridas**. 1998. 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Presbiteriana Mackenzie – São Paulo.

-HERBERT, F. Lund. **Industrial Pollution Control Handbook**. McGraw-Hill Book Company, New York, 1971, pgs. 5-18.

IWAKIRI, Setsuo. **Painéis de Madeira Reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247 p.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard & dry-process fiberboard manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman, 1993. 657 p.

ABIPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA. Disponível em: <<http://www.abipa.org.br>> Acesso em: 03. dez. 2018.

VAN LOO, Sjaak; KOPPEJAN, Jaap. **The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing**. 1. ed. London • Sterling, VA: Earthscan, 2008. 465 p. v. 1.

# ANEXO A - Analise Biomassa Cavaco Eucalipto

1/3



Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes/CQuiM/IPT

## RELATÓRIO DE ENSAIO N° 1 103 654 - 203

**CLIENTE:** Duratex S.A.  
97.837.181/0011-19  
Avenida Bernardo Seibel, 700 – Distrito Industrial I  
38056-610 – Uberaba – MG

**NATUREZA DO TRABALHO:** Ensaio diversos.

**REFERÊNCIA:** Orçamento FIPT n° 9971/18.  
Pedido de Compra 4505425135.

### 1 DESCRIÇÃO DO MATERIAL

Fornecido pelo cliente com a seguinte designação: "Cavaco de eucalipto", recebido em 31/08/2018 e identificado no laboratório como LCL 1104/18.  
Quantidade aproximada de material: 320 g.

### 2 MÉTODOS UTILIZADOS

**2.1** Determinação do teor de cinzas, ASTM D1102-84(13).

Equipamentos/Instrumento:

Balança analítica, cód.: 83823. Validade da calibração: abr/2019.

Mufla, cód.: 18516.

Termômetro, cód.: BG 1422. Validade da calibração: mai/2021.

**2.2** Determinação dos teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio, baseada na ASTM D5373-16 – Método A.

Equipamentos:

Analisador de carbono, hidrogênio e nitrogênio, cód.: 018793, verificado com material de referência antes do ensaio.

Balança analítica, cód.: 83823. Validade da calibração: abr/2019.

**2.3** Determinação do teor de enxofre total, baseada na ASTM D4239-17 – Método A.

Equipamentos:

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

## ANEXO A - Analise Biomassa Cavaco Eucalipto

2/3  
Relatório de Ensaio nº 1 103 654-203



Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes/CQuiM/IPT

Analizador de enxofre, cód.: 43252, verificado antes do ensaio.

Balança analítica, cód.: LCL-003. Validade da calibração: abr/2019.

2.4 Determinação do teor de oxigênio, ASTM D3176-15.

2.5 Determinação do poder calorífico, baseada na ASTM D5865-13.

Equipamentos:

Balança analítica, cód.: 83823. Validade da calibração: abr/2019.

Bomba calorimétrica, com cabeçotes cód.: 1 e 2. Validade das calibrações: jul/2019.

2.6 Determinação do teor de umidade, baseada na ASTM E871-82(13).

Equipamentos/Instrumentos:

Balanças, cód.: 83823 e 21507. Validade das calibrações: abr/2019 e dez/2018, respectivamente.

Estufas, cód.: 26296 e 40672.

Termômetro, cód.: 3918. Validade da calibração: mai/2019.

### 3 RESULTADOS

No material seco:

3.1 Cinzas - % massa .....	0,3 ± 0,2
3.2 Carbono - % massa .....	46,9
Hidrogênio - % massa .....	5,88
Nitrogênio - % massa .....	0,2
3.3 Enxofre total - % massa .....	< 0,1
3.4 Oxigênio - % massa (Nota 1) .....	46,72
3.5 Poder calorífico - MJ/kg (Nota 2):	
superior .....	19,17 ± 0,11
inferior .....	17,90

No material como recebido:

3.5 Poder calorífico - MJ/kg (Nota 2):	
superior .....	14,78
inferior .....	13,25
3.6 Umidade - % massa .....	22,9

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

## ANEXO A - Analise Biomassa Cavaco Eucalipto

3/3  
Relatório de Ensaio nº 1 103 654-203



Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes/CQuiM/IPT

### NOTAS:

- 1- Para o cálculo, o teor de enxofre foi considerado como zero.
- 2-  $1\text{MJ/kg} = 238,8\text{ kcal/kg}$ .
- 3- A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padronizada combinada multiplicada por um fator de abrangência  $k = 2,00$ , fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.
- 4- Os ensaios foram executados após moagem e peneiramento em malha de 60 mesh.

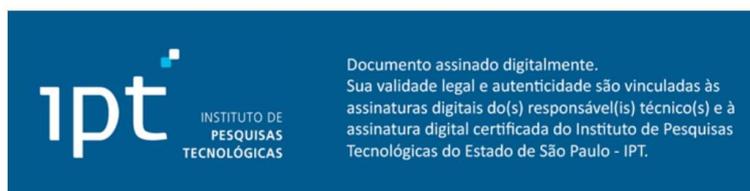
### EQUIPE TÉCNICA

Eng. Química Mestra Adriana Garcia.  
Químico Mestre Danilo Eiji Hirayama.  
Técnica Carina Ferrari Braga.  
Técnico Rafael Augusto Camargo  
Estagiário Ricardo Hideki Morita.

São Paulo, 28 de setembro de 2018.

Centro de Química e Manufaturados  
Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes  
Eng. Química Mestra Ligia A. A. Alves de Souza  
Supervisora de Ensaio  
CREA nº 0601053176 - RE nº 06840  
Assinado digitalmente

Centro de Química e Manufaturados  
Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes  
Eng. Químico Mestre Marcelo Aparecido Mendonça  
Chefe do Laboratório  
CRQ nº 04300627 - RE nº 08480  
Assinado digitalmente



Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

## ANEXO B - Análise Biomassa Casca de Eucalipto

1/3



Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes/CQuiM/IPT

### RELATÓRIO DE ENSAIO N° 1 103 655 - 203

**CLIENTE:** Duratex S.A.  
97.837.181/0011-19  
Avenida Bernardo Seibel, 700 – Distrito Industrial I  
38056-610 – Uberaba – MG

**NATUREZA DO TRABALHO:** Ensaio diversos.

**REFERÊNCIA:** Orçamento FIPT n° 9971/18.  
Pedido de Compra 4505425135.

#### 1 DESCRIÇÃO DO MATERIAL

Fornecido pelo cliente com a seguinte designação: "Casca de eucalipto", recebido em 31/08/2018 e identificado no laboratório como LCL 1105/18.  
Quantidade aproximada de material: 305 g.

#### 2 MÉTODOS UTILIZADOS

**2.1** Determinação do teor de cinzas, ASTM D1102-84(13).

Equipamentos/Instrumento:

Balança analítica, cód.: 83823. Validade da calibração: abr/2019.

Mufla, cód.: 18516.

Termômetro, cód.: BG 1422. Validade da calibração: mai/2021.

**2.2** Determinação dos teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio, baseada na ASTM D5373-16 – Método A.

Equipamentos:

Analisador de carbono, hidrogênio e nitrogênio, cód.: 018793, verificado com material de referência antes do ensaio.

Balança analítica, cód.: 83823. Validade da calibração: abr/2019.

**2.3** Determinação do teor de enxofre total, baseada na ASTM D4239-17 – Método A.

Equipamentos:

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

## ANEXO B - Análise Biomassa Casca de Eucalipto

2/3  
Relatório de Ensaio nº 1 103 655-203



Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes/CQuiM/IPT

Analizador de enxofre, cód.: 43252, verificado antes do ensaio.

Balança analítica, cód.: LCL-003. Validade da calibração: abr/2019.

2.4 Determinação do teor de oxigênio, ASTM D3176-15.

2.5 Determinação do poder calorífico, baseada na ASTM D5865-13.

Equipamentos:

Balança analítica, cód.: 83823. Validade da calibração: abr/2019.

Bomba calorimétrica, com cabeçotes cód.: 1 e 2. Validade das calibrações: jul/2019.

2.6 Determinação do teor de umidade, baseada na ASTM E871-82(13).

Equipamentos/Instrumentos:

Balanças, cód.: 83823 e 21507. Validade das calibrações: abr/2019 e dez/2018, respectivamente.

Estufas, cód.: 26296 e 40672.

Termômetro, cód.: 3918. Validade da calibração: mai/2019.

### 3 RESULTADOS

No material seco:

3.1 Cinzas - % massa .....	4,0 ± 0,8
3.2 Carbono - % massa .....	46,1
Hidrogênio - % massa .....	5,63
Nitrogênio - % massa .....	0,3
3.3 Enxofre total - % massa .....	< 0,1
3.4 Oxigênio - % massa (Nota 1) .....	43,97
3.5 Poder calorífico - MJ/kg (Nota 2):	
superior .....	17,90 ± 0,11
inferior .....	16,69

No material como recebido:

3.5 Poder calorífico - MJ/kg (Nota 2):	
superior .....	12,55
inferior .....	10,98
3.6 Umidade - % massa .....	29,9

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

## ANEXO B - Análise Biomassa Casca de Eucalipto

3/3  
Relatório de Ensaio nº 1 103 655-203



Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes/CQuiM/IPT

### NOTAS:

- 1- Para o cálculo, o teor de enxofre foi considerado como zero.
- 2-  $1\text{MJ/kg} = 238,8\text{ kcal/kg}$ .
- 3- A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padronizada combinada multiplicada por um fator de abrangência  $k = 2,00$ , fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.
- 4- Os ensaios foram executados após moagem e peneiramento em malha de 60 mesh.

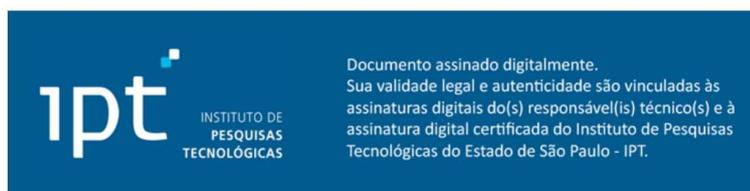
### EQUIPE TÉCNICA

Eng. Química Mestra Adriana Garcia.  
Químico Mestre Danilo Eiji Hirayama.  
Técnica Carina Ferrari Braga.  
Técnico Rafael Augusto Camargo  
Estagiário Ricardo Hideki Morita.

São Paulo, 28 de setembro de 2018.

Centro de Química e Manufaturados  
Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes  
Eng. Química Mestra Ligia A. A. Alves de Souza  
Supervisora de Ensaio  
CREA nº 0601053176 - RE nº 06840  
Assinado digitalmente

Centro de Química e Manufaturados  
Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes  
Eng. Químico Mestre Marcelo Aparecido Mendonça  
Chefe do Laboratório  
CRQ nº 04300627 - RE nº 08480  
Assinado digitalmente



Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

## ANEXO C - Análise Biomassa Chapa de MDF

1/3



Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes/CQuiM/IPT

### RELATÓRIO DE ENSAIO N° 1 103 656 - 203

**CLIENTE:** Duratex S.A.  
97.837.181/0001-47  
Avenida Paulista, 1938 – Bela Vista  
01310-942 – São Paulo – SP

**NATUREZA DO TRABALHO:** Ensaio diversos.

**REFERÊNCIA:** Orçamento FIPT n° 9971/18.  
Pedido de Compra 4505425135.

#### 1 DESCRIÇÃO DO MATERIAL

Fornecido pelo cliente com a seguinte designação: "Chapa de MDF", recebido em 31/08/2018 e identificado no laboratório como LCL 1106/18.  
Quantidade aproximada de material: 270 g.

#### 2 MÉTODOS UTILIZADOS

**2.1** Determinação do teor de cinzas, ASTM D1102-84(13).

Equipamentos/Instrumento:

Balança analítica, cód.: 83823. Validade da calibração: abr/2019.

Mufla, cód.: 18516.

Termômetro, cód.: BG 1422. Validade da calibração: mai/2021.

**2.2** Determinação dos teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio, baseada na ASTM D5373-16 – Método A.

Equipamentos:

Analisador de carbono, hidrogênio e nitrogênio, cód.: 018793, verificado com material de referência antes do ensaio.

Balança analítica, cód.: 83823. Validade da calibração: abr/2019.

**2.3** Determinação do teor de enxofre total, baseada na ASTM D4239-17 – Método A.

Equipamentos:

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

## ANEXO C - Análise Biomassa Chapa de MDF

2/3  
Relatório de Ensaio nº 1 103 656-203



Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes/CQuiM/IPT

Analizador de enxofre, cód.: 43252, verificado antes do ensaio.

Balança analítica, cód.: LCL-003. Validade da calibração: abr/2019.

2.4 Determinação do teor de oxigênio, ASTM D3176-15.

2.5 Determinação do poder calorífico, baseada na ASTM D5865-13.

Equipamentos:

Balança analítica, cód.: 83823. Validade da calibração: abr/2019.

Bomba calorimétrica, com cabeçotes cód.: 1 e 2. Validade das calibrações: jul/2019.

2.6 Determinação do teor de umidade, baseada na ASTM E871-82(13).

Equipamentos/Instrumentos:

Balanças, cód.: 83823 e 21507. Validade das calibrações: abr/2019 e dez/2018, respectivamente.

Estufas, cód.: 26296 e 40672.

Termômetro, cód.: 3918. Validade da calibração: mai/2019.

### 3 RESULTADOS

No material seco:

3.1 Cinzas - % massa .....	0,4 ± 0,2
3.2 Carbono - % massa .....	48,6
Hidrogênio - % massa .....	6,46
Nitrogênio - % massa .....	2,5
3.3 Enxofre total - % massa .....	< 0,1
3.4 Oxigênio - % massa (Nota 1) .....	42,04
3.5 Poder calorífico - MJ/kg (Nota 2):	
superior .....	19,26 ± 0,11
inferior .....	17,87

No material como recebido:

3.5 Poder calorífico - MJ/kg (Nota 2):	
superior .....	17,70
inferior .....	16,23
3.6 Umidade - % massa .....	8,1

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

## ANEXO C - Análise Biomassa Chapa de MDF

3/3  
Relatório de Ensaio nº 1 103 656-203



Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes/CQuiM/IPT

### NOTAS:

- 1- Para o cálculo, o teor de enxofre foi considerado como zero.
- 2-  $1\text{MJ/kg} = 238,8\text{ kcal/kg}$ .
- 3- A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padronizada combinada multiplicada por um fator de abrangência  $k = 2,00$ , fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.
- 4- Os ensaios foram executados após moagem e peneiramento em malha de 60 mesh.

### EQUIPE TÉCNICA

Eng. Química Mestra Adriana Garcia.  
Químico Mestre Danilo Eiji Hirayama.  
Técnica Carina Ferrari Braga.  
Técnico Rafael Augusto Camargo  
Estagiário Ricardo Hideki Morita.

São Paulo, 28 de setembro de 2018.

Centro de Química e Manufaturados  
Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes  
Eng. Química Mestra Ligia A. A. Alves de Souza  
Supervisora de Ensaio  
CREA nº 0601053176 - RE nº 06840  
Assinado digitalmente

Centro de Química e Manufaturados  
Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes  
Eng. Químico Mestre Marcelo Aparecido Mendonça  
Chefe do Laboratório  
CRQ nº 04300627 - RE nº 08480  
Assinado digitalmente



Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

## ANEXO D - Análise Biomassa Chapa de MDP

1/3



Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes/CQuiM/IPT

### RELATÓRIO DE ENSAIO N° 1 103 657 - 203

**CLIENTE:** Duratex S.A.  
97.837.181/0011-19  
Avenida Bernardo Seibel, 700 – Distrito Industrial I  
38056-610 – Uberaba – MG

**NATUREZA DO TRABALHO:** Ensaio diversos.

**REFERÊNCIA:** Orçamento FIPT n° 9971/18.  
Pedido de Compra 4505425135.

#### 1 DESCRIÇÃO DO MATERIAL

Fornecido pelo cliente com a seguinte designação: "Chapa de MDP", recebido em 31/08/2018 e identificado no laboratório como LCL 1107/18.  
Quantidade aproximada de material: 320 g.

#### 2 MÉTODOS UTILIZADOS

**2.1** Determinação do teor de cinzas, ASTM D1102-84(13).

Equipamentos/Instrumento:

Balança analítica, cód.: 83823. Validade da calibração: abr/2019.

Mufla, cód.: 18516.

Termômetro, cód.: BG 1422. Validade da calibração: mai/2021.

**2.2** Determinação dos teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio, baseada na ASTM D5373-16 – Método A.

Equipamentos:

Analisador de carbono, hidrogênio e nitrogênio, cód.: 018793, verificado com material de referência antes do ensaio.

Balança analítica, cód.: 83823. Validade da calibração: abr/2019.

**2.3** Determinação do teor de enxofre total, baseada na ASTM D4239-17 – Método A.

Equipamentos:

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

## ANEXO D - Análise Biomassa Chapa de MDP

2/3  
Relatório de Ensaio nº 1 103 657-203



Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes/CQuiM/IPT

Analizador de enxofre, cód.: 43252, verificado antes do ensaio.

Balança analítica, cód.: LCL-003. Validade da calibração: abr/2019.

2.4 Determinação do teor de oxigênio, ASTM D3176-15.

2.5 Determinação do poder calorífico, baseada na ASTM D5865-13.

Equipamentos:

Balança analítica, cód.: 83823. Validade da calibração: abr/2019.

Bomba calorimétrica, com cabeçotes cód.: 1 e 2. Validade das calibrações: jul/2019.

2.6 Determinação do teor de umidade, baseada na ASTM E871-82(13).

Equipamentos/Instrumentos:

Balanças, cód.: 83823 e 21507. Validade das calibrações: abr/2019 e dez/2018, respectivamente.

Estufas, cód.: 26296 e 40672.

Termômetro, cód.: 3918. Validade da calibração: mai/2019.

### 3 RESULTADOS

No material seco:

3.1 Cinzas - % massa .....	0,4 ± 0,2
3.2 Carbono - % massa .....	46,6
Hidrogênio - % massa .....	6,45
Nitrogênio - % massa .....	3,2
3.3 Enxofre total - % massa .....	< 0,1
3.4 Oxigênio - % massa (Nota 1) .....	43,35
3.5 Poder calorífico - MJ/kg (Nota 2):	
superior .....	18,96 ± 0,11
inferior .....	17,57

No material como recebido:

3.5 Poder calorífico - MJ/kg (Nota 2):	
superior .....	17,56
inferior .....	16,09
3.6 Umidade - % massa .....	7,4

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

## ANEXO D - Análise Biomassa Chapa de MDP

3/3  
Relatório de Ensaio nº 1 103 657-203



Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes/CQuiM/IPT

### NOTAS:

- 1- Para o cálculo, o teor de enxofre foi considerado como zero.
- 2-  $1\text{MJ/kg} = 238,8\text{ kcal/kg}$ .
- 3- A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padronizada combinada multiplicada por um fator de abrangência  $k = 2,00$ , fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.
- 4- Os ensaios foram executados após moagem e peneiramento em malha de 60 mesh.

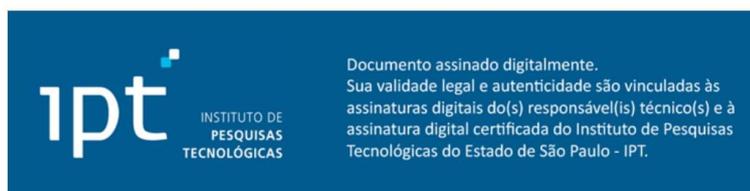
### EQUIPE TÉCNICA

Eng. Química Mestra Adriana Garcia.  
Químico Mestre Danilo Eiji Hirayama.  
Técnica Carina Ferrari Braga.  
Técnico Rafael Augusto Camargo  
Estagiário Ricardo Hideki Morita.

São Paulo, 28 de setembro de 2018.

Centro de Química e Manufaturados  
Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes  
Eng. Química Mestra Ligia A. A. Alves de Souza  
Supervisora de Ensaio  
CREA nº 0601053176 - RE nº 06840  
Assinado digitalmente

Centro de Química e Manufaturados  
Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes  
Eng. Químico Mestre Marcelo Aparecido Mendonça  
Chefe do Laboratório  
CRQ nº 04300627 - RE nº 08480  
Assinado digitalmente



Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)



Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes/CQuiM/IPT

## RELATÓRIO DE ENSAIO N° 1 103 658 - 203

**CLIENTE:** Duratex S.A.  
97.837.181/0011-19  
Avenida Bernardo Seibel, 700 – Distrito Industrial I  
38056-610 – Uberaba – MG

**NATUREZA DO TRABALHO:** Ensaio diversos.

**REFERÊNCIA:** Orçamento FIPT n° 9971/18.  
Pedido de Compra 4505425135.

### 1 DESCRIÇÃO DO MATERIAL

Fornecido pelo cliente com a seguinte designação: "Pó de MDP e MDF", recebido em 31/08/2018 e identificado no laboratório como LCL 1108/18.  
Quantidade aproximada de material: 545 g.

### 2 MÉTODOS UTILIZADOS

**2.1** Determinação do teor de cinzas, ASTM D1102-84(13).

Equipamentos/Instrumento:

Balança analítica, cód.: 83823. Validade da calibração: abr/2019.

Mufla, cód.: 18516.

Termômetro, cód.: BG 1422. Validade da calibração: mai/2021.

**2.2** Determinação dos teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio, baseada na ASTM D5373-16 – Método A.

Equipamentos:

Analisador de carbono, hidrogênio e nitrogênio, cód.: 018793, verificado com material de referência antes do ensaio.

Balança analítica, cód.: 83823. Validade da calibração: abr/2019.

**2.3** Determinação do teor de enxofre total, baseada na ASTM D4239-17 – Método A.

Equipamentos:

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

## ANEXO E - Análise Biomassa Pó de MDP/MDF

2/3  
Relatório de Ensaio nº 1 103 658-203



Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes/CQuiM/IPT

Analizador de enxofre, cód.: 43252, verificado antes do ensaio.

Balança analítica, cód.: LCL-003. Validade da calibração: abr/2019.

2.4 Determinação do teor de oxigênio, ASTM D3176-15.

2.5 Determinação do poder calorífico, baseada na ASTM D5865-13.

Equipamentos:

Balança analítica, cód.: 83823. Validade da calibração: abr/2019.

Bomba calorimétrica, com cabeçotes cód.: 1 e 2. Validade das calibrações: jul/2019.

2.6 Determinação do teor de umidade, baseada na ASTM E871-82(13).

Equipamentos/Instrumentos:

Balanças, cód.: 83823 e 21507. Validade das calibrações: abr/2019 e dez/2018, respectivamente.

Estufas, cód.: 26296 e 40672.

Termômetro, cód.: 3918. Validade da calibração: mai/2019.

### 3 RESULTADOS (Nota 1)

No material seco:

3.1 Cinzas - % massa .....	1,4 ± 0,4
3.2 Carbono - % massa .....	47,0
Hidrogênio - % massa .....	5,98
Nitrogênio - % massa .....	4,4
3.3 Enxofre total - % massa .....	< 0,1
3.4 Oxigênio - % massa (Nota 2) .....	41,18
3.5 Poder calorífico - MJ/kg (Nota 3):	
superior .....	19,11 ± 0,11
inferior .....	17,82

No material como recebido:

3.5 Poder calorífico - MJ/kg (Nota 3):	
superior .....	16,55
inferior .....	15,11
3.6 Umidade - % massa .....	13,4

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

## ANEXO E - Análise Biomassa Pó de MDP/MDF

3/3  
Relatório de Ensaio nº 1 103 658-203



Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes/CQuiM/IPT

### NOTAS:

- 1- Quantidade aproximada de material utilizado: 10 g.
- 2- Para o cálculo, o teor de enxofre foi considerado como zero.
- 3-  $1\text{MJ/kg} = 238,8 \text{ kcal/kg}$ .
- 4- A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padronizada combinada multiplicada por um fator de abrangência  $k = 2,00$ , fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.

### EQUIPE TÉCNICA

Eng. Química Mestra Adriana Garcia.  
Químico Mestre Danilo Eiji Hirayama.  
Técnica Carina Ferrari Braga.  
Técnico Rafael Augusto Camargo  
Estagiário Ricardo Hideki Morita.

São Paulo, 28 de setembro de 2018.

Centro de Química e Manufaturados  
Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes  
Eng. Química Mestra Ligia A. A. Alves de Souza  
Supervisora de Ensaio  
CREA nº 0601053176 - RE nº 06840  
Assinado digitalmente

Centro de Química e Manufaturados  
Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes  
Eng. Químico Mestre Marcelo Aparecido Mendonça  
Chefe do Laboratório  
CRQ nº 04300627 - RE nº 08480  
Assinado digitalmente



Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.  
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.  
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã  
São Paulo | SP | 05508-901  
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)