

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARINA MOURA DE SOUZA

**CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO ENERGÉTICO
DE RESÍDUOS DA COLHEITA FLORESTAL E DO
PROCESSAMENTO DE *Pinus taeda* L.**

**CURITIBA
2010**

MARINA MOURA DE SOUZA

**CARACTERIZAÇÃO E VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO ENERGÉTICO
DE RESÍDUOS DA COLHEITA FLORESTAL E DO
PROCESSAMENTO DE *Pinus taeda* L.**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de concentração em Tecnologia da Madeira, Departamento de Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho
da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Roberto Rochadelli

CURITIBA

2010

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por me confortar, iluminar e me dar forças para caminhar.

Ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná que se faz presente pelos professores, secretários, técnicos e alunos, por terem me acolhido, em destaque ao Reinaldo da secretaria e ao Sr. Ademir, sempre prontos para ajudar.

Ao Prof. Dimas Agostinho da Silva por ter me recebido e orientado.

Aos Professores, Márcio Pereira da Rocha e Victor Afonso Hoeflich, por me incentivarem e por terem me escutado algumas vezes.

Em especial ao Professor Roberto Rochadelli pelo auxílio, pelo tempo me dedicado e por tentar estar presente, mesmo que de longe.

Ao CNPq pela bolsa de estudos sem a qual eu não poderia ter permanecido aqui.

À empresa FV de Araújo, especialmente o Sr. Ademar de Araujo que possibilitou minhas visitas e coletas de materiais.

Às “meninas” dos laboratórios: Clarice, Rosilane e bolsistas pelo convívio.

Ao meu pai Ademir pelo apoio em qualquer momento.

A minha tia Abadia pelo aconchego.

Ao Betão pela paciência e carinho.

Enfim, aos meus amigos: aqueles que sempre estão presentes e aqueles que apenas cruzaram o meu caminho. Sem vocês a vida seria vazia e triste.

*Em memória a minha mãe Teresa Cristina e minha tia Heloisa Helena.
Meu amor e eternas saudades.*

RESUMO

Este trabalho teve o objetivo de avaliar o aproveitamento de resíduos florestais e madeireiros para fins energéticos, mediante caracterização e análise da viabilidade econômica da secagem para energia. A coleta foi feita em uma empresa que realiza a colheita e o processamento da madeira de *Pinus taeda* L. situada no município de Tunas do Paraná-PR. Foram identificadas as fontes geradoras dos resíduos do processamento e posteriormente procedeu-se a coleta dos materiais e do resíduo proveniente da colheita florestal. Dados referentes ao valor de mercado dos materiais também foram obtidos. Os resíduos foram caracterizados de acordo com a umidade, poder calorífico, densidade e teores que carbono fixo e cinzas. Foi feito um ajuste de modelos matemáticos que pudessem expressar a relação entre umidade e poder calorífico para os materiais. Para a análise de viabilidade econômica foram feitos cálculos de custos e a razão Benefício/Custo para a utilização de um secador de partículas. As costaneiras e o resíduo da colheita apresentaram elevados teores de umidade e as costaneiras apresentaram maior densidade, e maior teor de carbono fixo. O teor de cinzas foi estatisticamente igual para todos os materiais. O poder calorífico superior se apresentou na faixa de 4550 e 4950 Kcal/Kg, e o poder calorífico útil (material úmido) para as costaneiras e os resíduos da colheita apresentou uma relevante queda visto o elevado teor de umidade destes materiais. O modelo de regressão selecionado pôde expressar em mais de 97% a relação entre poder calorífico e teor de umidade. Com relação a análise de custos, o componente mais oneroso para a utilização do secador é o abastecimento da fornalha. Com a Razão Benefício/Custo pode-se evidenciar que o processo de secagem para as costaneiras e os resíduos da floresta é viável economicamente, embora de acordo com os valores de comercialização dos materiais, caso haja cepilho, refilo ou pó de serra de maneira sustentável na região, é viável a utilização destes como fonte energética, não necessitando assim de secagem.

Palavras-chave: Resíduos florestais, utilização energética, viabilidade econômica, secagem

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the use of forest and woody residues and for energy purposes, through characterization and analysis of the economic feasibility of drying for energy. The collection was made in a firm engaged in harvesting and processing wood of *Pinus taeda* L., the sources of waste processing have been identified and proceeded to collect the materials, plus the residue from forest harvesting was collected. Data concerning the market value of the materials collected were also obtained. The residues were characterized according to the moisture, calorific value, density and levels that fixed carbon and ash. An adjustment of mathematical models that could express the relation between moisture and caloric value for the materials were done. For the analysis of economic feasibility calculations were made and the reason of cost benefit / cost for the use of a dryer particles. The slabs and crop residue showed high levels of humidity and the slabs had higher density and higher fixed carbon content. The ash content was statistically equal for all materials. The calorific value is presented in full in 4550 and 4950 kcal / kg calorific value and useful for slabs crop residues showed a decrease seen with the high moisture content of these materials. The model of regression selected could express in more than 97 % the relation between caloric value and of moisture content. Regarding the analysis of costs, the major cost component for the use of the dryer is the supply of the furnace. With the Benefit / Cost Ratio can reveal that the drying process for the slabs and debris of the forest is economically viable, although according to the values of marketing materials, if any shaver, or trim saw dust in a sustainable way in the region, it is feasible to use these as an energy source, thus requiring no drying.

Key-words: Forest residues, Energetic use, Economical viability, Drying

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1- PROCESSOS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA E RESPECTIVOS PRODUTOS. FONTE: NOGUEIRA e LORA (2004). ... | 13 |
| FIGURA 2 - PRODUTOS DA PIRÓLISE E POSSÍVEIS RENDIMENTOS | 17 |
| FIGURA 3 - ESQUEMA DO PROCESSAMENTO DA MADEIRA E DAS FONTES GERADORAS DE RESÍDUOS..... | 34 |
| FIGURA 4 - RELAÇÃO ENTRE PODER CALORÍFICO E TEOR DE UMIDADE PARA OS RESÍDUOS DA COLHEITA FLORESTAL E DO PROCESSAMENTO DA MADEIRA | 50 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 1 - PROCESSOS DE PIRÓLISE E RESPECTIVAS CARACTERÍSTICAS | 18 |
| TABELA 2 - FATOR DE CONVERSÃO PARA MADEIRA DE CONÍFERA E FOLHOSA..... | 23 |
| TABELA 3 - VOLUME MÉDIO DE SERRAGEM E OUTROS RESÍDUOS GERADOS (%) POR ESPÉCIE E POR CLASSE DIAMÉTRICA..... | 25 |
| TABELA 4- QUANTIDADE E LOCALIZAÇÃO DA COLETA DOS MATERIAIS | 35 |
| TABELA 5 - MASSA DE ÁGUA ADICIONADA À 2,0G DE MATERIAL PARA OBTENÇÃO DE UMA UMIDADE (UBS) DESEJADA..... | 38 |
| TABELA 6 - DADOS SECADOR ROTATIVO DE TAMBOR | 40 |
| TABELA 7- VALOR DE MERCADO DOS RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO..... | 41 |
| TABELA 8 - VALOR TARIFÁRIO PARA kWh DE ACORDO COM COPEL 2009 | 42 |
| TABELA 9 - RELAÇÃO DOS CUSTOS ATRIBUIDOS PARA O PAGAMENTO DE SALÁRIO | 43 |
| TABELA 10 - VALOR DE MERCADO DOS RESÍDUOS..... | 44 |
| TABELA 11 - TEORES DE UMIDADE MÉDIOS NA BASE SECA (UBS) E RESPECTIVOS TESTES DE MÉDIAS E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO (CV) PARA RESÍDUOS DA FLORESTA E DO PROCESSAMENTO DA MADEIRA. | 45 |
| TABELA 12 - VALORES MÉDIOS DE DENSIDADE APARENTE (DENS. APARENTE) E RESPECTIVOS TESTES DE MÉDIAS E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO (CV) PARA OS RESÍDUOS DA FLORESTA E DO PROCESSAMENTO DA MADEIRA..... | 46 |
| TABELA 13 - VALORES MÉDIOS PARA DE PODER CALORÍFICO SUPERIOR, INFERIOR E ÚTIL PARA OS RESÍDUOS EM ESTUDO | 47 |

| | |
|--|----|
| TABELA 14 - VALORES MÉDIOS PARA OS COMPONENTES DA ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA E RESPECTIVOS TESTES DE MÉDIAS E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO (CV%) PARA OS RESÍDUOS DA FLORESTA E DO PROCESSAMENTO DA MADEIRA..... | 48 |
| TABELA 15 - RELAÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS PARA ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO DOS RESÍDUOS DA COLHEITA FLORESTAL | 51 |
| TABELA 16 - RELAÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS PARA ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO PARA AS COSTANEIRAS..... | 51 |
| TABELA 17 - RELAÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS PARA ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO PARA O PÓ DE SERRA..... | 52 |
| TABELA 18 - RELAÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS PARA ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO PARA O CEPILHO..... | 52 |
| TABELA 19 - RELAÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS PARA ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO PARA O REFILO | 52 |
| TABELA 20 - CUSTOS REFERENTES AO PROCESSO DE SECAGEM DOS RESÍDUOS..... | 53 |
| TABELA 21 - CUSTOS TOTAIS PARA A SECAGEM DOS RESÍDUOS DA COLHEITA E DAS COSTANEIRAS UTILIZANDO DIFERENTES MATERIAIS PARA ALIMENTAÇÃO DA FORNALHA. | 54 |
| TABELA 22 - BENEFÍCIO/CUSTO PARA A SECAGEM DE RESÍDUOS DA COLHEITA UTILIZANDO DIFERENTES MATERIAIS PARA A ALIMENTAÇÃO DA FORNALHA. | 55 |
| TABELA 23 - BENEFÍCIO/CUSTO PARA A SECAGEM DE COSTA-NEIRAS UTILIZANDO DIFERENTES MATERIAIS PARA A ALIMENTAÇÃO DA FORNALHA..... | 56 |
| TABELA 24 - VALOR DE MERCADO E CUSTO DE SECAGEM PARA OS RESÍDUOS EM ESTUDO | 57 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 9 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 11 |
| 2.1 BIOMASSA FLORESTAL COMO FONTE DE ENERGIA | 11 |
| 2.2 VIAS DE TRANSFORMAÇÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA | 12 |
| 2.2.1 Combustão | 14 |
| 2.2.2 Gaseificação | 15 |
| 2.2.3 Pirólise | 16 |
| 2.2.4 Liquefação | 19 |
| 2.3 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA | 19 |
| 2.3.1 Resíduos florestais e madeireiros como fonte de energia | 21 |
| 2.3.2 Características de resíduos para a geração de energia | 25 |
| 2.4 VIABILIDADE ECONÔMICA | 30 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 33 |
| 3.1 REGIÃO DE ESTUDO | 33 |
| 3.2 MATERIAIS COLETADOS | 33 |
| 3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS | 35 |
| 3.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS E AJUSTE DE EQUAÇÕES | 37 |
| 3.5 ANÁLISE DE CUSTOS | 40 |
| 3.5.1 Custos para utilização do secador | 40 |
| 3.5.2 Análise Benefício/Custo | 43 |
| 3.5.3 Análise comparativa de custos da secagem de diferentes matérias-primas | 44 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 45 |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA COLHEITA FLORESTAL E DO PROCESSAMENTO DA MADEIRA | 45 |
| 4.1.1 Umidade | 45 |
| 4.1.2 Densidade | 46 |
| 4.1.3 Poder Calorífico | 47 |
| 4.1.4 Análise Química Imediata | 48 |
| 4.2 MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO DOS RESÍDUOS | 49 |
| 4.2.1 Dispersão e Tendência dos Dados | 49 |
| 4.2.2 Seleção de Modelos | 51 |
| 4.3 ANÁLISE DE CUSTOS | 53 |
| 4.3.1 Custos para utilização do secador | 53 |
| 4.3.2 Análise Benefício/Custo | 55 |
| 4.3.3 Análise comparativa de custos da secagem de diferentes matérias- primas | 57 |
| 5. CONCLUSÕES | 59 |
| REFERÊNCIAS | 61 |
| APÊNDICES | 66 |

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, devido às questões ambientais, discute-se e defende-se muito o uso de fontes energéticas renováveis em comparação aos recursos não renováveis. Não apenas aspectos ambientais, mas características como disponibilidade, qualidade, utilização de mercado de carbono e tecnologias disponíveis fazem com que a energia produzida por biomassa seja viável tanto nos quesitos econômicos quanto ecológicos e sociais.

Dentre as fontes renováveis de energia, insere-se o grupo das biomassas ligno-celulósicas onde se destaca a biomassa florestal que pode ser diferenciada em três grandes e principais grupos: o material advindo da colheita florestal, os resíduos gerados devido ao processamento da madeira e a madeira oriunda de florestas energéticas. O material procedente da colheita florestal pode ser caracterizado por galhos, folhas, tocos e raízes; já os resíduos do processamento da madeira se diversificam amplamente devido a forma de processamento das toras e do uso final, muito embora haja a geração principalmente de serragem, aparas e cepilhos.

A região Sul do Brasil possui um relevante número de empresas que processam espécies florestais, principalmente as do gênero *Pinus*, e possui uma área plantada de aproximadamente 1.432 mil ha (ABIMCI, 2008). Grande parte desta madeira produzida é destinada à serrarias, laminadoras e à produção de pasta de celulose. Os resíduos gerados devido o processamento da madeira, não só representam um problema econômico pelo desperdício, como também um problema ambiental.

Para a utilização energética da biomassa florestal é importante levar em consideração as características físicas e químicas do material, pois estas podem influenciar fortemente no rendimento e na manutenção dos equipamentos principalmente os que realizam processos de combustão.

O teor de umidade pode ser considerado uma das características mais relevantes ao se utilizar um material ligno-celulósico para a geração de energia, tanto em processos termoquímicos como a combustão e a pirólise, quanto em processos físicos como a densificação para produção de pellets e briquetes e biológicos como a fermentação. Além deste fato, é necessário considerar que o poder calorífico dos materiais ligno-celulósicos seguem tendências inversamente proporcionais ao conteúdo de água presente nos mesmos.

Desta forma, é possível considerar os resíduos madeireiros como matéria-prima para a geração de energia, sendo importante estudos que averiguem a viabilidade de uso destes, mediante as características apresentadas nas fontes geradoras, bem como a avaliação econômica do preparo destes materiais para o uso, incluindo a secagem prévia que possibilitará uma maior valoração e rendimento energético.

Assim, a hipótese questionada nesse trabalho foi em primeiro lugar a qualificação dos tipos de resíduos gerados em uma indústria que processa madeira e se a utilização destes como fonte de energia é possível de acordo com suas características. Em segundo lugar houve o questionamento à respeito da fundamentação econômica para o uso destes materiais, usando como apoio a melhora das características dos mesmos mediante secagem e aumento do poder calorífico.

Este trabalho visou contribuir para o aproveitamento de resíduos florestais e madeireiros para fins energéticos, mediante caracterização e análise de viabilidade econômica da secagem destes materiais, tendo como objetivos específicos:

- a) Caracterizar, sob o ponto de vista energético, os resíduos provenientes da colheita florestal e do processamento da madeira de *Pinus taeda* L.
- b) Ajustar equações que possibilitem estimar o poder calorífico dos resíduos mediante o teor de umidade.
- c) Verificar através dos custos da secagem, a viabilidade econômica da secagem dos resíduos para utilização como fonte de energia.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 BIOMASSA FLORESTAL COMO FONTE DE ENERGIA

A energia, dentre outros fatores, é um elemento essencial para o desenvolvimento humano. Goldenberg (2000) relata que o consumo de energia no mundo cresce cerca de 2% ao ano e deverá dobrar em 30 anos se as tendências atuais se mantiverem. Este crescimento é diferenciado nos países industrializados e em desenvolvimento, o último com crescimento de 4% ao ano.

Sob este enfoque, destaca-se a utilização de madeira e seus derivados para a geração de energia. Apesar de ser uma das fontes energéticas mais antigas, a madeira sólida, briquetes, pellets ou mesmo resíduos particulados são uma forma importante de geração de energia para casas, indústrias e comércio. Assim, Bowyer et al., (2003) afirma que a energia também é um produto florestal de enorme importância.

Conforme Brasil (2008), no Balanço Energético Nacional, com dados referentes à 2007, é mostrado que a utilização de madeira no Brasil sofreu um leve crescimento em 2007. Este material é utilizado em grande parte para a produção de carvão vegetal e em menores escalas para o uso em residências, indústrias e setor agropecuário, sendo que, apenas 1% da produção de madeira neste mesmo ano foi destinada para a geração de energia elétrica e consumo comercial.

A designação biomassa compreende a matéria vegetal gerada pela fotossíntese e seus derivados, como: resíduos florestais e agrícolas, resíduos animais e matéria orgânica contida em resíduos industriais, domésticos e municipais. Desta maneira, os biocombustíveis podem ser apresentados em grupos principais, que são: os biocombustíveis da madeira (dendrocombustíveis), os de plantações não florestais (agrocombustíveis) e os de resíduos urbanos (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Karekesi¹ et al. (2005, citado por GUARDABASSI, 2006) classifica a biomassa em três categorias de acordo com a tecnologia empregada na utilização energética, sendo:

¹¹ KAREKESI et al, 2005 Status of Biomass Energy in Developing Countries and Prospects for International Collaboration. In GFSE-5 Enhancing International Cooperation on Biomass. Background Paper. Áustria, Maio 2005

Tecnologias tradicionais de uso da biomassa: refere-se a combustão direta de madeira, resíduos agrícolas, animais e urbanos, usados para cocção, secagem e produção de carvão.

- a) Tecnologias “aperfeiçoadas”: são técnicas mais eficientes de combustão direta de biomassa, como fornos e fogões.
- b) Tecnologias modernas: estão inseridas as técnicas avançadas de conversão de biomassa em eletricidade e uso de biocombustíveis.

Há também uma relação de sustentabilidade do uso de biomassa que Nogueira (2005) estabeleceu através da relação entre oferta e demanda. Assim, quando a demanda supera a oferta, o sistema não é sustentável, visto que a capacidade de regeneração da floresta é interferida.

Couto *et al.* (2004), afirma que o uso da biomassa como combustível ao longo de várias décadas tem sido um dos mais importantes fatores para o desenvolvimento econômico e social do país; e caracteriza a biomassa como os seres vivos e o conjunto de produtos orgânicos gerados por estes seres vivos, mas que não se encontram completamente decompostos em moléculas elementares.

As principais fontes de materiais ligno-celulósicos potencialmente utilizados para energia podem ser distintas entre: a) material advindo da colheita florestal, que é caracterizado por materiais diversificados de acordo com as técnicas silviculturais e de colheita utilizada; b) materiais provenientes das indústrias de transformação, que por sua vez são concentrados localmente e relativamente heterogêneos e c) culturas de curta e média rotação destinadas especificamente para a utilização energética (COUTO *et al.*, 2004).

A madeira utilizada para a geração de energia possui duas vantagens relevantes que são: a baixa emissão de enxofre quando comparada com os combustíveis fósseis e a emissão de CO₂ da queima de material é compensada pela própria absorção deste durante o seu crescimento (COUTO *et al.*, 2004).

2.2 VIAS DE TRANSFORMAÇÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA

A transformação da biomassa em energia é embasada não apenas no tipo de material disponível, mas também nas opções de conversão, no uso final desejado, na quantidade de material exigido, na infra-estrutura disponível, e é necessário atender requisitos econômicos e ambientais.

O uso de biomassa é uma forma de energia renovável que pode ser utilizada para redução do impacto ambiental causado pelas fontes de energia fósseis. Como qualquer outra forma, há limitações no uso e na aplicabilidade, competindo desta forma com outras fontes renováveis como a energia eólica, solar e das ondas do mar (McKENDRY, 2002a).

Os processos de conversão energética podem ser classificados em físicos, termoquímicos e biológicos (NOGUEIRA e LORA, 2003). Na Figura 1 é apresentado um esquema geral destes processos, indicando os produtos principais que podem ser combustíveis intermediários ou a própria energia para uso final.

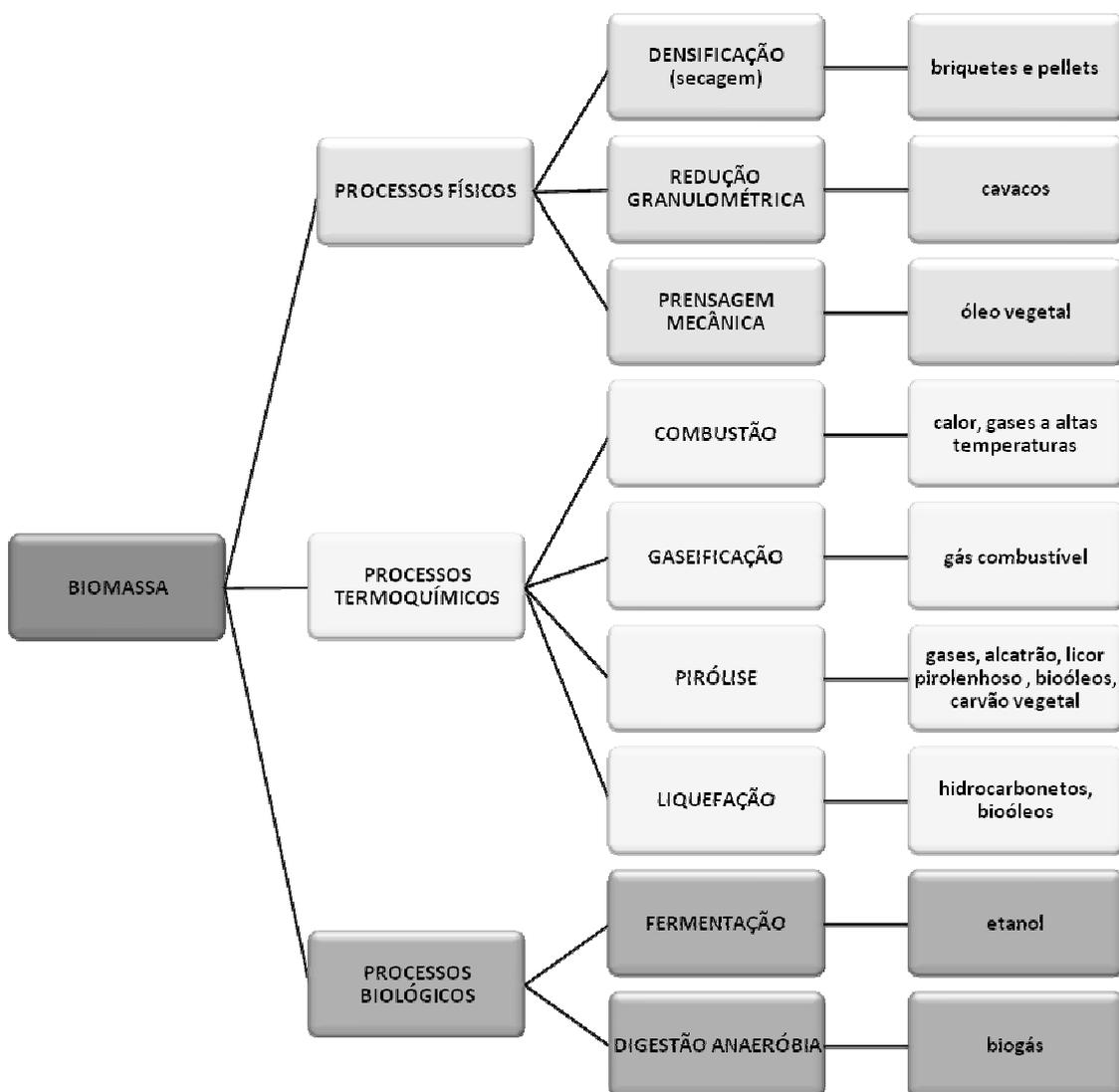


FIGURA 1- PROCESSOS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA E RESPECTIVOS PRODUTOS. FONTE: NOGUEIRA e LORA (2004).

Os processos físicos são caracterizados pela densificação, redução granulométrica e prensagem, estes mecanismos se caracterizam por não afetarem a composição química original do material; já os processos termoquímicos são basicamente realizados em altas temperaturas o que acarreta mudanças significativas na estrutura e composição dos materiais e são utilizados majoritariamente em materiais com menores teores de umidade. Por último os processos biológicos se desenvolvem geralmente com produtos que apresentam altos teores de umidade e temperaturas mais próximas ao ambiente (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Em termos de energia proveniente da madeira ou dendroenergia, os processos termoquímicos são os mais relevantes e compreendem desde técnicas mais simples e como a combustão até os mais sofisticados processos de pirólise para a produção de combustíveis líquidos (NOGUEIRA e LORA ,2004).

2.2.1 Combustão

A queima direta (combustão) é uma tecnologia bastante utilizada e é responsável pela conversão da energia química estocada no material em calor, vapor de processos ou eletricidade usando equipamentos diferenciados. Os gases gerados neste processo possuem temperaturas que variam de 800 a 1000°C. Tecnicamente é possível utilizar vários materiais, porém na prática a combustão é realizada principalmente em combustíveis que tenham teores de umidade abaixo de 50% na base seca (McKENDRY, 2002 a).

O processo de combustão pode ser diferenciado entre completo e incompleto. A combustão completa ocorre quando há oxigênio suficiente no ar da fornalha para a completa oxidação dos elementos combustíveis, sendo os produtos destas reações basicamente CO₂ (dióxido de carbono), H₂O (vapor de água), SO₂ (dióxido de enxofre) e N₂ (nitrogênio) presente no ar. No caso da combustão incompleta, a quantidade de ar na câmara de combustão é menor que a quantidade necessária e desta forma irá formar CO (monóxido de carbono), um gás tóxico (VLASSOV, 2001).

Brito e Barrichelo (1979) escrevendo sobre a combustão da madeira, separaram este processo em três fases, das quais a primeira é caracterizada pelo aquecimento da madeira para a evaporação e eliminação da água. A segunda se

inicia quando a temperatura atinge aproximadamente 260°C e a madeira começa a ser quimicamente degradada e materiais voláteis começam a ser vaporizados e quando a temperatura chega aos 600°C estes gases passam a se inflamar. Caso a temperatura não seja mantida neste valor e a quantidade de ar não for suficiente a combustão não se completa.

A terceira fase é a queima do carvão que permanece após a liberação dos gases voláteis. Este se queima em temperaturas acima de 600°C, e finalmente uma pequena quantidade de cinzas resta após a queima. Um ponto importante neste assunto é que entre 50 – 60% do calor aproveitável na queima da madeira está nos gases voláteis.

Estas três fases da combustão ocorrem ao mesmo tempo, porém as duas primeiras ocorrem predominantemente quando o fogo ainda está se iniciando. (BRITO E BARRICHELO 1979).

2.2.2 Gaseificação

A gaseificação visa a conversão da biomassa em gás combustível, um produto intermediário que poderá ser empregado em outros processos subseqüentes para geração de calor ou de potência mecânica (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Cortez *et al.*(2008), descreve a gaseificação como um processo termoquímico que converte um insumo sólido ou líquido em um gás, chamado de gás pobre, que possui características combustíveis mediante oxidação parcial em temperaturas intermediárias, ou seja, acima das recomendadas nos processos de pirólise rápida e abaixo das recomendadas nos processos de combustão.

Neste processo há a produção de uma mistura de gases CH₄, CO e H₂, onde as proporções são determinadas pelas quantidades de ar e oxigênio. Estes gases podem ser de baixo poder calorífico (entre 4 a 6 MJ/Nm³), médio (12–18 MJ/Nm³) e alto (40MJ/Nm³) (McKENDRY, 2002 a, 2002 b).

Um conceito promissor é o uso da gaseificação em ciclos combinados com turbinas a gás, denominados de BIG/GT (Biomass Integrated Gasifier/ Gas Turbine), onde uma turbina converte o combustível gasoso em eletricidade com alta eficiência energética (NOGUEIRA e LORA, 2003 , McKENDRY, 2002a).

Nos sistemas BIG/GT, os gases formados após a combustão na turbina são limpos, o que permite redução do espaço útil a ser utilizado e menores gastos com equipamentos para a filtragem..

Para uma gaseificação bem sucedida, alguns parâmetros da biomassa são importantes como: umidade, teores de cinzas e voláteis e também o pré-tratamento deste material como a secagem e a redução granulométrica. McKendry (2002b) cita que o uso de resíduos para a gaseificação influencia de maneira positiva os fatores econômicos relacionados com as plantas de operação de gaseificadores além das questões ambientais relacionadas ao uso destes.

Existem vários tipos de tecnologias para este processo, a mais conhecida e dominada é baseada em reatores de leito fixo, embora existam outros modelos como o leito fluidizado, contracorrente e concorrente (CORTEZ *et al.*, 2008).

2.2.3 Pirólise

A pirólise é um processo bastante conhecido desde a época dos antigos egípcios, que usavam uma técnica rudimentar para obtenção de piche usado para calafetagem de barcos e vedação de tumbas. Atualmente a técnica segue os mesmos princípios, onde o calor é fornecido a biomassa em um ambiente inerte, sem oxigênio ou com baixa concentração (CARDOSO, 2004).

O processo possui uma série de reações químicas, acompanhadas de transferências de calor e massa. As reações primárias são caracterizadas como aquelas que incidem diretamente sobre o substrato e secundárias aquelas responsáveis pela decomposição dos produtos intermediários e que ocorrem durante a degradação dos principais componentes da biomassa que são a celulose, hemicelulose e lignina (CORTEZ *et al.*, 2008).

Os principais produtos obtidos deste processo podem ser separados em uma fração condensável, uma fração sólida carbonosa e uma gasosa não condensável. Na Figura 2 são apresentados os produtos pirolíticos e seus possíveis rendimentos (McKENDRY, 2002a).

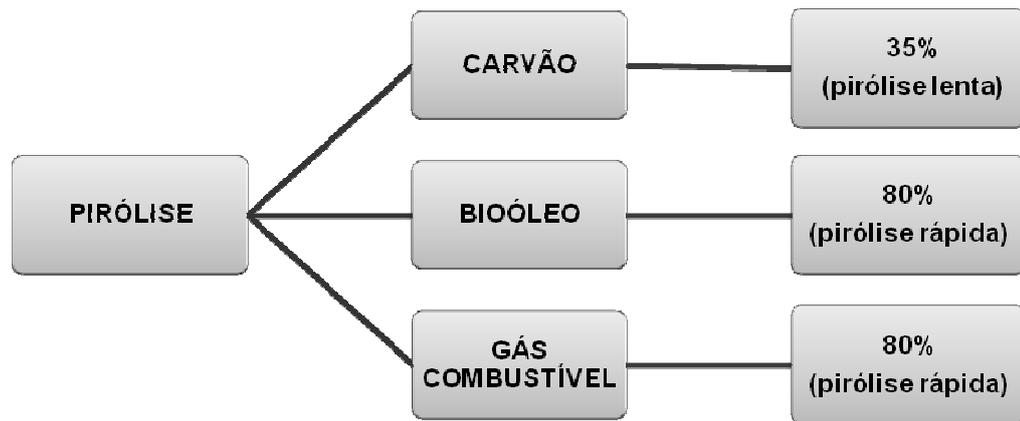


FIGURA 2 - PRODUTOS DA PIRÓLISE E POSSÍVEIS RENDIMENTOS
 FONTE: McKENDRY (2002a)

Cortez *et al.*, (2008) através de curvas termogravimétricas (TG) e termogravimétrica diferencial (DTG) mostraram como se é o comportamento de um material durante as três etapas principais do processo de pirólise:

- a) A primeira etapa ocorre até o material atingir aproximadamente 180°C, onde a biomassa absorve calor e libera a umidade na forma de vapor de água, caracterizando uma fase tipicamente endotérmica. Nesta etapa enquanto se atinge temperaturas de 110°C a 180°C ocorre reações de desidratação envolvendo os grupos –OH presentes nas moléculas.
- b) A segunda etapa se inicia quando a temperatura atinge 180°C e termina com 370°C, sendo que: entre 180°C e 290°C ocorre a degradação da hemicelulose e degradação parcial da celulose e lignina; são liberados gases como CO, CO₂ e ácido acético na forma de voláteis. Quando se atinge 290°C ocorre o maior taxa de degradação da hemicelulose. Entre 290°C e 370°C ocorre a degradação total da celulose, e no ponto máximo são liberados grande quantidade de voláteis e altas concentrações de CO, H₂, CH₄, e CO₂.
- c) Finalmente a terceira etapa acontece acima de 370°C, ocorrendo a completa degradação da lignina e formação de alcatrões pesados e de hidrocarbonetos, sendo que esta fase é responsável pela formação de 50% do carbono fixo do material.

Além de características intrínsecas da biomassa utilizada, parâmetros como taxa de aquecimento, temperatura, tempo de residência, pressão, tipo de atmosfera e uso de catalisadores tem grande influência sobre os tipos de produtos resultantes e principalmente na quantidade das frações de sólido, líquido e gás. Com relação a taxa de aquecimento, de modo geral, quando a temperatura é aumentada muito rapidamente há tendência de formação de voláteis, já quando o aquecimento é gradual há formação de frações sólidas (CORTEZ *et al.*, 2008).

Na Tabela 1 estão relacionados os vários processos de pirólise que são utilizados atualmente, bem como alguns parâmetros e os respectivos produtos principais.

TABELA 1 - PROCESSOS DE PIRÓLISE E RESPECTIVAS CARACTERÍSTICAS

| Processo de pirólise | Tempo de residência | Taxa de aquecimento | Temperatura máxima (°C) | Principais produtos |
|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Convencional | 5 – 30min | pequena | 600 | bioóleo, carvão e gás |
| Rápida | 0,5 – 5 segs | intermediária | 650 | bioóleo |
| Flash | < 1 seg | alta | < 650 | bioóleo, gás |
| Ultra-rápida | < 0,5 segs | muito alta | 1000 | prod químicos e gás combustível |
| Vácuo | 2 -30 segs | intermediária | 400 | bioóleo |
| Hidropirólise | < 10 segs | alta | < 500 | bioóleo e prod. químicos |
| Metanopirólise | < 10 segs | alta | >700 | produtos químicos |

FONTE: BRIDGWATER E BRIDGE (1991) adaptado de CORTEZ *et al.* (2008).

No caso da pirólise lenta de madeira e resíduos florestais, parâmetros como temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência e tamanho da partícula são os que mais influenciam nos rendimentos de gases de carvão. Cardoso (2004) estudou a pirólise para o aproveitamento de resíduos de biomassa, especificamente a serragem de eucalipto, obteve como resultado que o maior rendimento em bioóleo foi com uma taxa de aquecimento de $20^{\circ}\text{C min}^{-1}$, temperatura máxima final de 500°C , tempo de permanência de 5 min a 100, 200, 300, 400 e 500°C , sob vazão de $0,3 \text{ L.min}^{-1}$ de nitrogênio e utilizando tamanho médio de partículas de 0,24mm.

Já Figueiredo (2009) pesquisando sobre a influência da pressão na pirólise da madeira de *Eucalyptus grandis*, demonstrou que para este caso o rendimento gravimétrico apresentou um ganho que 17% quando a pressão foi elevada de 0 para 5 bars na temperatura de 450°C . Com relação a densidade aparente para a madeira

com 110% de umidade, quando a pressão foi aumentada de 5 para 10 bars houve um incremento significativo de 33%, e a pressão apresentou um efeito negativo sobre o teor de carbono fixo do carvão gerado e do poder calorífico superior.

2.2.4 Liquefação

A liquefação pode ser definida como o processo de conversão de biomassa em hidrocarbonetos líquidos estáveis usando baixas temperaturas e altas pressões (McKENDRY, 2002a).

Existem processos redutores e oxidativos de liquefação. Nos redutores o oxigênio da biomassa é removido na forma de CO e CO₂, restando hidrocarbonetos puros com alto valor de poder calorífico e podem ser usados como combustíveis ou matéria-prima em indústrias. No caso dos processos oxidativos o oxigênio é incorporado à biomassa e obtem-se fenóis e ácidos mono e dicarboxílicos (CORTEZ *et al.*, 2008).

A hidrólise é um processo estudado desde 1922, em 1932 Berl² realizou conversões termoquímicas à partir de material vegetal e obteve óleos ou betume, mais a frente em 1944³, utilizando bagaço de cana, obteve gasolina, óleos leves e óleos lubrificantes. (Citado por Cortez *et al.*, 2008).

Este mesmo autor conclui que para os processos de liquefação é mais recomendado a separação da biomassa em macromoléculas, visto que somente a lignina é técnica e economicamente viável para ser submetida à estes processos, pois os polissacarídeos são melhores de se converter em açúcares e álcool.

Há também questões como a disponibilidade de lignina nas indústrias e que a liquefação deve estar sempre associada a um processo de refino para se obter produtos comercializáveis como os fenóis e o benzeno.

2.3 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA

Desde o ano de 1979, Brito e Barrichelo, já mencionavam que o uso da madeira e seus derivados como fonte energética era uma atividade de grande

² Berl, E. *Naturwissenschaften* 20, 1932, 652.

³ Berl, E. *Science*, 99, 1044, 309.

interesse, inclusive com a premissa de plantios florestais destinados exclusivamente para esta atividade.

Para que a madeira possa ser usada para a geração de calor e/ou energia, ela tem que passar pelo processo de combustão, o qual inclui reações físicas e químicas já mencionadas anteriormente.

Os resíduos lignocelulósicos além de apresentarem uma relevante capacidade calorífica, são fonte energética potencialmente capaz de substituir algumas formas de combustíveis fósseis, o que pode tornar esta atividade vantajosa (SILVA, 2001).

Rocha e Klitzke (1998) mencionam que é importante a verificação da viabilidade da utilização de resíduos para a geração de energia, onde a energia gerada por estes deve superar a energia de picagem, processamento e de transporte, bem como os custos de preparação com os combustíveis.

Os resíduos usados para este fim, não devem possuir nenhum elemento químico adicional, pois podem emitir poluentes causadores de danos ambientais (SILVA, 2001). Algumas vantagens e desvantagens podem ser levantadas quanto a utilização energética de resíduos de madeira, como é apresentado na Tabela 3

QUADRO 1 - VANTAGENS E DESVANTAGENS NO USO DE RESÍDUOS DE MADEIRA PARA GERAR ENERGIA

| Vantagens | Desvantagens |
|--|--|
| - geração de energia para o próprio processo | - volume de resíduos pode ser insuficiente |
| - diminuição de efeitos nocivos ao meio ambiente | - incertezas quanto ao suprimento contínuo de material |
| - economia com outras fontes energéticas | - necessidades de maiores estudos para a transformação de resíduos em energia elétrica |
| - não emissão de gases como enxofre e nitrogênio | - maior desgaste de equipamentos como caldeiras |

FONTE: ADAPTADO DE FONTES, 1994.

A maioria das indústrias de transformação de madeira, incorporam à planta industrial queimadores de serragem que são suficientes para gerar economia nos custos destinados a combustíveis fósseis. Porém, para esta utilização alguns itens devem ser observados, tais como: custos atuais e futuros; necessidades energéticas da indústria; disponibilidade e características dos resíduos; custo de capital do

equipamento para recolher, tratar e queimar os resíduos de madeira e valor de mercado dos materiais se não fossem queimados (SILVA, 2001)

Pérez *et al.*, (2006) avaliou o potencial energético de resíduos das espécies *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens* na região de Cantabria na Espanha e puderam concluir que sob o ponto de vista do poder calórico, os resíduos de *E. nitens* são levemente superiores que os de *E. globulus* e que este fato pode estar relacionado com a elevada concentração de substâncias voláteis e óleos essenciais. As folhas de ambas as espécies foi a parte da árvore que apresentou maior poder calorífico superior..O uso destes resíduos em Cantabria para a geração de energia, pode gerar aproximadamente 57GWh/ano.

2.3.1 Resíduos florestais e madeireiros como fonte de energia

Magossi (2007) descreve que o termo “resíduo” significa qualquer sobra decorrente de uma ação ou processo produtivo, que são acumulados ou descartados no ambiente e potencialmente capazes de gerar problemas ambientais.

Os resíduos florestais podem ser caracterizados como aqueles gerados e deixados na floresta devido às atividades da colheita de madeira. Este conceito engloba todo o material resultante da exploração da madeira e que permanecem sem utilização definida, são considerados resíduos florestais os seguintes materiais: casca, galhos, copas, árvores com diâmetro inferior ao mínimo comercial, árvores doentes, mortas, tocos e raízes.

Há algum tempo as raízes não eram consideradas como fontes de material, devido à condução por talhadia utilizada nas florestas, mas atualmente, como os ciclos de corte estão cada vez menores, e as florestas cada vez mais produtivas, esta técnica não é amplamente utilizada e a biomassa referente às raízes representa um grande volume de material que pode ser retirado da floresta (MAGOSSI, 2007; SALMERON, 1980).

Os resíduos gerados na floresta podem chegar a valores de 30 a 35% do volume de madeira para fins industriais e em torno de 5% do volume destinado para fins energéticos. Muito embora a biomassa residual proveniente das atividades de colheita sejam de bom uso para a geração de energia, é necessário ressaltar que resíduos como galhos finos, folhas e cascas podem ser muito importantes para a

ciclagem de nutrientes no solo florestal, assegurando a manutenção das propriedades físicas e químicas deste. (MAGOSSO, 2007).

Brito *et al.*, (1979) avaliando características de resíduos de exploração florestal para uso energético puderam observar que houve predominância de materiais como copa e madeira fina em relação à casca após a picagem. Em termos percentuais a casca representou 5,2% e a copa mais a madeira fina 11,9% do peso total da parte aérea da árvore. Características como a densidade aparente se mostraram semelhantes para os materiais da copa e madeira fina e superiores para os materiais provenientes da casca.

Nesse mesmo trabalho, foi comparado em valores energéticos da madeira e dos resíduos que: 1 hectare de floresta de *Eucalyptus saligna* com 8 anos de idade, pode representar em termos de madeira o equivalente a 18 ton de óleo combustível, em termos de casca e madeira fina mais copa o equivalente a 6,3 e 5,9 ton de óleo combustível respectivamente.

Outra forma de obtenção de material lignocelulósico é através do processamento das toras feito pelas indústrias de base florestal. Destas indústrias, a cadeia produtiva de madeira e móveis possui como insumo a madeira serrada que, por processos de usinagem, geram resíduos sólidos em várias etapas do sistema de produção.

Os resíduos madeireiros podem ser definidos como a porcentagem da tora não transformada em madeira comercial, destacando-se as costaneiras, aparas, peças descartadas, destopos e serragem, e possuem características físicas, químicas e mecânicas que podem variar grandemente dependendo do tipo de material. O destino final destes resíduos é diretamente afetado por estas características (OLANDOSKY, 2001).

O desdobro de madeira pode ser considerado como o processo de transformação de uma tora de madeira de seção circular em peças de seção quadrangular (FONTES, 1994). Nesta etapa o rendimento volumétrico, ou coeficiente de serragem é um parâmetro bastante estudado para que se possa embasar dados à respeito da quantificação de resíduos no processo.

O processamento das toras para a produção de tábuas, vigas, pranchas e outras peças, por si só já é responsável pela geração de grande quantidade de resíduos. Outros itens como a qualidade das toras, a espécie utilizada, o sistema de

desdobro, as condições do maquinário e a qualificação da mão-de-obra também interferem diretamente no volume de resíduos gerados.

Cortez *et al.*, (2008) afirmam que de modo geral, os resíduos gerados em uma cadeia produtiva de serrados podem constituir-se de aproximadamente 7% de casca, 10% de serragem e 28% de pedaços em geral.

Desde 1970 a FAO⁴ (citado por FONTES,1994), adota alguns fatores de conversão que ajudam a estimar os resíduos gerados pela indústria de madeira. Sendo assim, para a geração de 1,0 m³ de produto acabado tem-se conforme apresentado na Tabela 2.

TABELA 2- FATOR DE CONVERSÃO PARA MADEIRA DE CONÍFERA E FOLHOSA

| Tipo de produto | Tora | Fator de conversão (%) |
|--------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Madeira serrada conífera | 1,67 m ³ | 59,8 |
| Madeira serrada folhosa | 1,82 m ³ | 54,9 |
| Chapa compensado | 2,30 m ³ | 43,5 |
| Laminado | 1,90 m ³ | 52,6 |

FONTE: FAO (1970), ADAPTADO POR FONTES (2004)

Vieira (2006) salienta que o processamento mecânico da madeira é uma atividade do setor florestal que gera enormes quantidades de resíduos. Estimativas grosseiras sobre a quantidade de resíduos podem ser geradas através das áreas florestais, da produção primária e do grau de rendimento. Pode-se dizer que, entre 40 a 60 % do volume de uma tora constituem-se em resíduos oriundos do seu processamento.

Considerando os dados referentes ao rendimento do processo de produção de serrados é possível, através de dados setoriais da ABRAF (2009), demonstrar o que seria o volume de resíduos gerados, especificamente pelo setor de serrados no Brasil, nas indústrias associadas, no ano de 2008. O anuário referente ao ano de 2008, trás como consumo 174,2 milhões de m³ de madeira em tora abrangendo todas as indústrias consumidoras. A parcela referente ao consumo de toras para serrados se encontra em torno de 19,67% representando 34.270 m³ de madeira em

⁴ FAO – Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação. Yearbook of Forest products. Romas, Italy, 1970.

toras. Analisando que o rendimento do processo se apresenta entre 40 e 60%, calcula-se que o volume de resíduos gerados pelas indústrias de serrados no ano de 2008 poderia ter ficado entre 13.708 e 20.562 milhões de m³.

Vale ressaltar que os cálculos mostrados no parágrafo anterior, são embasados em dados setoriais, e possuem apenas o objetivo de demonstrar o quão significativo pode ser o volume de resíduos madeireiros gerados em uma indústria. Sem dúvidas que uma enormidade de fatores estão envolvidos nestes processos, e muitas das vezes os materiais são prontamente utilizados na própria indústria ou em outros segmentos.

Fontes (1994) evidencia que na maioria das instalações de serrarias mais modernas o aproveitamento dos resíduos já é parte integrante normal da empresa e que os equipamentos necessários para este processo são considerados tão importantes como as serras e sistemas de desdobro.

Uma classificação antiga para os resíduos de indústrias florestais feita IBDF/FUNPAR (1982), onde os materiais gerados nos processos foram diferenciados basicamente entre: a) serragem: originado da operação das serras; b) cepilho: gerado pelas plainas essencialmente nas serrarias e disponíveis com baixos teores de umidade e c) lenha: resíduos de maiores dimensões compostos por costaneiras, aparas, refilos e cascas.

Embora haja classificação dos diferentes tipos de resíduos gerados por indústrias de processamento de madeira, poderão existir outros tipos de materiais pois há a produção destes em vários setores e em vários maquinários diferentes. Portanto, segundo Brand *et al.*, (2002) é muito importante a avaliação da potencialidade das indústrias em termos da geração e utilização dos resíduos.

Hilling *et al.*, (2006) realizaram um estudo visando a identificação e quantificação dos resíduos gerados em 30 empresas do pólo madeireiro de Corede – Serra/ RS. Foram analisados três espécies: Pinus, Eucalipto e Araucária, com desdobro de 2279, 1314 e 175 m³/mês, respectivamente. Destes, foram obtidos valores de aproveitamento médio de: 73 % para Araucária, 64% para Eucalipto e 63% para Pinus, sendo que os dois últimos valores estão bem próximos devido a homogeneidade dos materiais vindo de plantios florestais. O rendimento obtido para a Araucária pode ser devido ao maior diâmetro e maior idade das árvores.

Nesse mesmo trabalho, foi verificado a geração mensal de 951 m³ de serragem, 210 m³ de maravalhas, 647 m³ de costaneiras e 578 m³ de outros resíduos como casca e lenha.

Com relação ao desdobro de espécies tropicais, pesquisas referentes às espécies Cedrinho (*E. uncinatum*), Cambará (*Q. albiflora*) e Itaúba (*M. itauba*) feitas por Biasi (2005), foram obtidos dados referentes ao rendimento em madeira serrada e porcentagem de resíduos gerados (Tabela 3). Houve a necessidade de divisão em classes diamétricas, sendo 1) 31,00 e 40,00 cm; 2) 41,00 e 50,00 cm; 3) 51,00 e 60,00 cm e 4) 61,00 e 70,00 cm.

TABELA 3 - VOLUME MÉDIO DE SERRAGEM E OUTROS RESÍDUOS GERADOS (%) POR ESPÉCIE E POR CLASSE DIAMÉTRICA

| Espécie | Classe diâmetro | Volume médio de resíduos (%) | | |
|----------|-----------------|------------------------------|-----------------|-----------|
| | | Serragem | Outros resíduos | TOTAL (%) |
| Cedrinho | 1 | 9,34 | 33,36 | 42,70 |
| | 2 | 9,86 | 29,61 | 39,47 |
| | 3 | 10,17 | 27,42 | 37,59 |
| | 4 | 9,64 | 31,25 | 40,89 |
| Cambará | 1 | 9,65 | 31,18 | 40,83 |
| | 2 | 10,22 | 27,09 | 37,31 |
| | 3 | 10,33 | 26,30 | 36,63 |
| | 4 | 10,64 | 24,07 | 34,71 |
| Itaúba | 1 | 8,11 | 42,17 | 50,28 |
| | 2 | 9,22 | 34,23 | 43,45 |
| | 3 | 9,32 | 33,47 | 42,79 |
| | 4 | 8,5 | 39,37 | 47,87 |

FONTE: BIASI (2005)

Sob o ponto de vista de resíduos gerados em outros setores como por exemplo em indústrias de chapas compensadas Olandosky (2001), em seu estudo, pôde verificar que o ponto crítico para a geração de resíduos neste processo são O conjunto de refiladeiras, encoladeiras e juntadeiras, e a gilhotina, totalizando uma perda de aproximadamente 1/3 do total processado.

2.3.2 Características de resíduos para a geração de energia

✓ Umidade

O teor de umidade é considerado o fator que exerce a maior influência sobre a queima de materiais combustíveis. Além de ser uma característica que não possui

dificuldades para ser mensurada, o conteúdo de umidade é sempre um parâmetro importante para ser avaliado na madeira e em resíduos que serão destinados ao uso energético.

Em árvores vivas o teor de água pode variar desde 25% até valores superiores a 200%, sendo que, na maioria das espécies o teor de umidade do cerne é menor que o teor no alburno. A água pode existir na madeira como água líquida (água livre) ou vapor de água no lúmen das células e água quimicamente aderida nas paredes celulares (FONTES, 1994).

O teor de umidade da madeira pode ser definido como a quantidade de água presente na madeira expressa em percentagem com relação ao peso da madeira seca (WOOD HANDBOOK, 1968), e pode ser escrita como:

$$U = \frac{W_u - W_o}{W_o} * 100 [kg / kg] \quad (1)$$

Onde W_u representa o peso do material com a conteúdo de umidade (U) original e W_o o peso do material após secagem, desta forma poderá se obter o conteúdo de umidade referenciado na base seca. Em indústrias de celulose, o conteúdo de umidade é baseado no peso original da amostra, caracterizando assim o teor de umidade na base úmida (WOOD HANDBOOK, 1968; Levelton e O'Connor, 1978).

Farinhaque (1981) concluiu em seu trabalho sobre influência da umidade no poder calorífico da Bracatinga (*Mimosa scabrella*) que há perda de calorías na queima de madeira úmida devido ao gasto no aquecimento e vaporização da água. Neste caso houve uma redução de 57% do poder calorífico quando a umidade alterou de 0% para 80%. Ele também ressalta que para um bom aproveitamento do material para a combustão, este deve ser utilizado em teores abaixo de 25% não apenas pela redução do poder calorífico disponível mas também porque acima deste valor poderá formar crostas e fuligem nas chaminés e no interior da câmara de combustão.

Tomaselli (1983) mostrou que uma tonelada de madeira pode gerar: 2520 Mcal de energia quando verde, 4368 Mcal quando seca ao ar e com umidade de 10% e 4800 Mcal quando absolutamente seca.

✓ *Poder calorífico*

O poder calorífico de um material é também definido como a quantidade de calor liberado durante a combustão da unidade de massa ou de volume e pode ser descrito como poder calorífico inferior ou superior. O poder calorífico superior se refere à quantidade de calor liberado considerando a condensação do vapor de água e arrefecimento dos produtos da combustão até 25°C. Já no poder calorífico inferior é contabilizado o calor de condensação da água formada pela combustão do hidrogênio do combustível (VLASSOV, 2001). Silva (2001) ressalta que para cálculos térmicos é recomendado utilizar o poder calorífico inferior pois já representa a quantidade de calor útil que o material irá disponibilizar no processo.

Normalmente utiliza-se uma bomba calorimétrica para a determinação do poder calorífico de um material combustível, obtendo-se o poder calorífico superior pois a água contida no combustível é evaporada e condensada durante sua combustão (FONTES, 1994). Como já mencionado, na prática o que interessa é o poder calorífico inferior, que pode ser calculado pela equação 2 (KOLLMANN, 1968).

$$PCI = PCS - ((600 \times 9.H) / 100) \quad (2)$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior (Kcal/Kg)

PCS = poder calorífico superior (Kcal/Kg)

H = teor de hidrogênio (%)

De acordo com a composição química elementar média da madeira podemos assumir o teor de hidrogênio como 6%. (SILVA, 2001).

A determinação do poder calorífico superior de materiais combustíveis é feito de modo direto e experimental, normalmente utilizando-se bombas calorimétricas dos tipos, Berthelot-Mahler, Davis, Parr e Junker e para a obtenção do poder calorífico inferior usa-se a bomba Kröler (JUVILLAR⁵, 1984, citado por SILVA, 2001).

Há também outras formas de obtenção de valores de poder calorífico de maneira mais prática, sendo feita através da estimativa por fórmulas matemáticas embasadas no teor de umidade (equação 3) e no teor de carbono (equação 4) (DUMONT, 1980 e JUVILLAR³ 1984, citado por SILVA, 2001.)

⁵ Juvillar. J.B. A madeira como combustível. CNI. **Biomassa coadjuvante na oferta total de energia**. Brasília, v.8, p. 45-53, 1984.

$$PCI = 4590 - 51,9 * U \quad (3)$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior (Kcal/Kg)

U = teor de umidade de material

e

$$PCI = 84,2 * C\% \quad (4)$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior (Kcal/Kg)

%C = teor de carbono presente no material

O poder calorífico da madeira pode variar em torno de 3.000 kcal/kg até 5.400 kcal/kg, sendo que espécies como as coníferas que apresentam maiores teores de resina, podem apresentar os maiores valores, haja vista que o poder calorífico de resinas podem chegar à valores de 9.600 Kcal/Kg (BRITO E BARRICHELO, 1979).

Quirino *et al.*, (2004), estudando 146 espécies de árvores obteve o valor de 4.685 kcal/kg de poder calorífico em média, com coeficiente de variação de 3,9%. Com relação ao poder calorífico de diversos resíduos ligno-celulósicos foram obtidos valores de 4.524 Kcal/Kg com um coeficiente de variação de 9,4%; dentre estes resíduos estavam presentes costaneiras de *Pinus* sp., aparas de madeira, resíduos de compensados, casca de arroz e bagaço de cana.

Como já mencionado anteriormente, a umidade é um fator que influencia extremamente o valor do poder calorífico de um material, sendo assim, Brito (1993), considera que são necessárias aproximadamente 600Kcal de energia para evaporar 1Kg de água presente na madeira, o que deverá ser descontado do poder calorífico do material quando úmido.

Há uma equação que permite a dedução da quantidade de energia que é gasta com a evaporação da água contida na madeira, sendo que é necessário obter previamente os valores do poder calorífico inferior e do teor de umidade da madeira, conforme equação 5.

$$PCLu = [(PCI - 6 * U) / (100 + U)] * 100 \quad (5)$$

Onde:

PCLu = poder calorífico líquido à umidade “U” (Kcal/Kg)

PCI = poder calorífico inferior

U = teor de umidade base seca (%)

KOLLMANN (1968) afirma que é necessário atenção especial aos combustíveis que contêm hidrogênio e umidade, pois em seus gases de combustão são encontrados água e que cujo estado de agregação influi no valor do poder calorífico.

Pode ser adotado como valor típico de PCS de resíduos vegetais 4.500 a 5.000 kcal/kg, sendo o PCI dependente da umidade, pode-se considerar para umidade em torno de 30%, PCI de 3000 kcal/kg para resíduos vegetais (PINHEIRO et.al, 2006).

✓ *Densidade*

A densidade exprime a quantidade de massa contida num determinado volume de material e é de grande importância para a caracterização da biomassa florestal (SILVA, 2001). Este parâmetro poderá influenciar no poder calorífico de um material na medida em que, o calor gerado pela combustão está relacionado com a quantidade de massa, assim madeiras e derivados mais densos, apresentaram maior poder calorífico por unidade volumétrica.

A densidade é comumente expressa pela densidade básica, que consiste da relação entre a massa seca do material em gramas e o volume do sólido saturado em cm³.

Fontes (1994) frisou a importância das dimensões das partículas de madeira (cavacos e serragem) para atividades como manuseio, armazenagem, transporte e eficiência da queima, visto que as partículas mais finas podem ser queimadas em suspensão e os resíduos maiores devem ser queimados em grelhas.

Ensaio realizados por Pinheiro *et al.*, (2006) indicaram que o parâmetro que influenciou de maneira mais expressiva a densidade energética dos resíduos, foi a densidade a granel dos mesmos, com ressalvas ao teor de umidade. Deve-se considerar, portanto, as biomassas com melhor desempenho aquelas com maiores densidade a granel sem que estejam com umidades altas. Por exemplo, a densidade a granel da serragem para este estudo foi de 150 Kg/cm³ para madeiras mais leves

(menos densas) a 250 Kg/cm³ para madeiras mais pesadas (mais densas) e a densidade energética na faixa de 450.000 a 600.000 Kcal/m³.

Brand et.al (s/d) em estudos sobre os parâmetros da biomassa florestal para a geração de energia, relata que a valoração dos materiais é feita pela unidade co-geradora de energia mediante teor de cinzas e poder calorífico líquido, além de fatores como a distância de transporte. De acordo com este modelo de valoração a biomassa que apresenta maior PCL e menor teor de cinzas pode ser melhor remunerada que as demais. Neste contexto é destacado que há empresas que buscam o tratamento da biomassa para melhorar suas propriedades energéticas e por conseqüência melhorar o valor de comercialização.

2.4 VIABILIDADE ECONÔMICA

De acordo com Hoffman (1984): “Só é justificada a implantação de um projeto se os rendimentos esperados forem comprovadamente superiores ao montante de recursos que é necessário investir.”

Os métodos quantitativos para a avaliação de investimentos buscam indicadores que relacionem os benefícios e os custos do projeto. Estes métodos podem ser divididos em dois grandes grupos que são:

1) Os que não levam em consideração a variação do capital com o tempo, dos quais são considerados:

- a) tempo de recuperação do capital investido (*Pay-back*),
- b) método da razão receita/custo (R/C),
- c) método da razão receita média/custo e

2) Os que levam em conta a variação que o capital sofre com o tempo, se destacando:

- a) método do valor presente líquido (VPL),
- b) método da taxa interna de retorno (TIR) e
- c) método da razão benefício/custo (B/C) (HOFFMANN, 1984).

As técnicas de avaliação de projetos estão embasadas em medidas de rentabilidade e a análise de benefício/custo(B/C) é utilizada para verificar a viabilidade econômica de projetos.

Destacando a relação benefício-custo, pode-se considerar esta como o cociente entre o valor atual das rendas a serem obtidas e o valor atual dos custos, incluindo os investimentos necessários ao desenvolvimento do projeto (HOFFMANN, 1984; REZENDE e OLIVEIRA, 2001). Desta forma, um projeto será economicamente viável se apresentar a razão benefício/custo maior ou igual a 1, dado que os mesmos revelam possibilidades de produzirem benefícios em excesso aos custos. (REZENDE e OLIVEIRA, 2001).

Berger (1980) relata as análises de benefício/custo são muito semelhantes as análises marginais de entradas e saídas pois em ambos os casos os objetivos são basicamente obter um máximo saídas (benefício) para uma determinada entrada (custo) e obter um determinado nível de benefício tendo-se o mínimo de custos.

Hirschfeld (2009) afirma que a razão benefício-custo pode ser empregada em análises econômicas pequenas ou grandes e também conceitua os termos benéficos e custos como:

- a) Benefícios: é tudo que possa ser beneficiado do empreendimento, ou seja, receitas, faturamentos, dividendos.
- b) Custos: é tudo o que possa endividar o empreendimento, ou seja, avaliações de dispêndios, gastos, despesas.

Esta razão pode ser expressa como:

$$\text{Relação } B/C = \frac{\sum_{j=0}^n R_j / (1+i)^j}{\sum_{j=0}^n C_j / (1+i)^j} \quad (6)$$

Onde:

R_j = Receitas oriundas do projeto no ano j

C_j = Custo do projeto no ano j

i = Taxa de desconto

n = Vida útil do projeto

Os custos podem ser classificados em custos fixos e custos variáveis. Os fixos são aqueles que não variam com a quantidade produzida e os custos variáveis são aqueles que variam de acordo com o nível de produção da empresa. Holffmann (1942) destaca que a classificação dos custos é frequentemente difícil e arbitrária e depende fortemente da situação específica em que se está analisando.

Conforme REZENDE e OLIVEIRA (2001), dentre os custos pode-se destacar os seguintes:

- a) Juros: é definido como a remuneração atribuída ao fator capital, ou seja, ao se usar um capital por um determinado tempo, paga-se pelo uso desse fator.
- b) Conservação ou manutenção: é o custo anual necessário para manter o bem de capital em condições de uso, sendo que um maior custo de manutenção corresponderá geralmente a uma menor depreciação.
- c) Riscos: é a soma que se considera cada ano para formar um fundo que permita pagar danos imprevistos que o bem pode sofrer.
- d) Depreciação: é o custo necessário para substituir os bens de capital quando tornados pelo desgaste físico ou quando perdem valor passar dos anos devido a inovações tecnológicas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 REGIÃO DE ESTUDO

O trabalho foi desenvolvido em uma serraria de propriedade da Empresa FV de Araujo Ltda., localizada na cidade de Tunas do Paraná, Estado do Paraná, situada a aproximadamente 80 Km da capital Curitiba.

A serraria realiza o processamento primário das toras, a secagem das tábuas e posteriormente o processamento secundário para a fabricação de peças para a montagem de *pallets* vendidos para a fabricação de embalagens.

A empresa possui produtividade variando entre 54 a 55 m³ de madeira serrada por dia, sendo que a espécie utilizada é o *Pinus taeda L.*

3.2 MATERIAIS COLETADOS

A obtenção dos materiais ocorreu durante o mês de dezembro de 2008. Foram observados os locais geradores de resíduos do processamento da madeira, aos quais se tornaram as fontes de coleta dos materiais. Na Figura 3 é apresentado um esquema das etapas do processamento da madeira e dos locais onde há geração de resíduos, bem como os materiais gerados.

O processamento primário (Linha 1) se refere às atividades iniciais de desdobro da tora. As toras estocadas no pátio de toras seguem para uma serra fita vertical responsável apenas pelo corte longitudinal e central da tora permanecendo ainda com casca. Logo em seguida o material é encaminhado para uma serra fita horizontal múltipla onde são feitos cortes paralelos gerando tábuas, essas seguem para um conjunto de serras circulares responsáveis pelo ajuste da largura, daí a geração de serragem e costaneiras, estas últimas são picadas e transportadas via esteira para um silo de armazenagem. As tábuas são levadas para as câmaras de secagem.

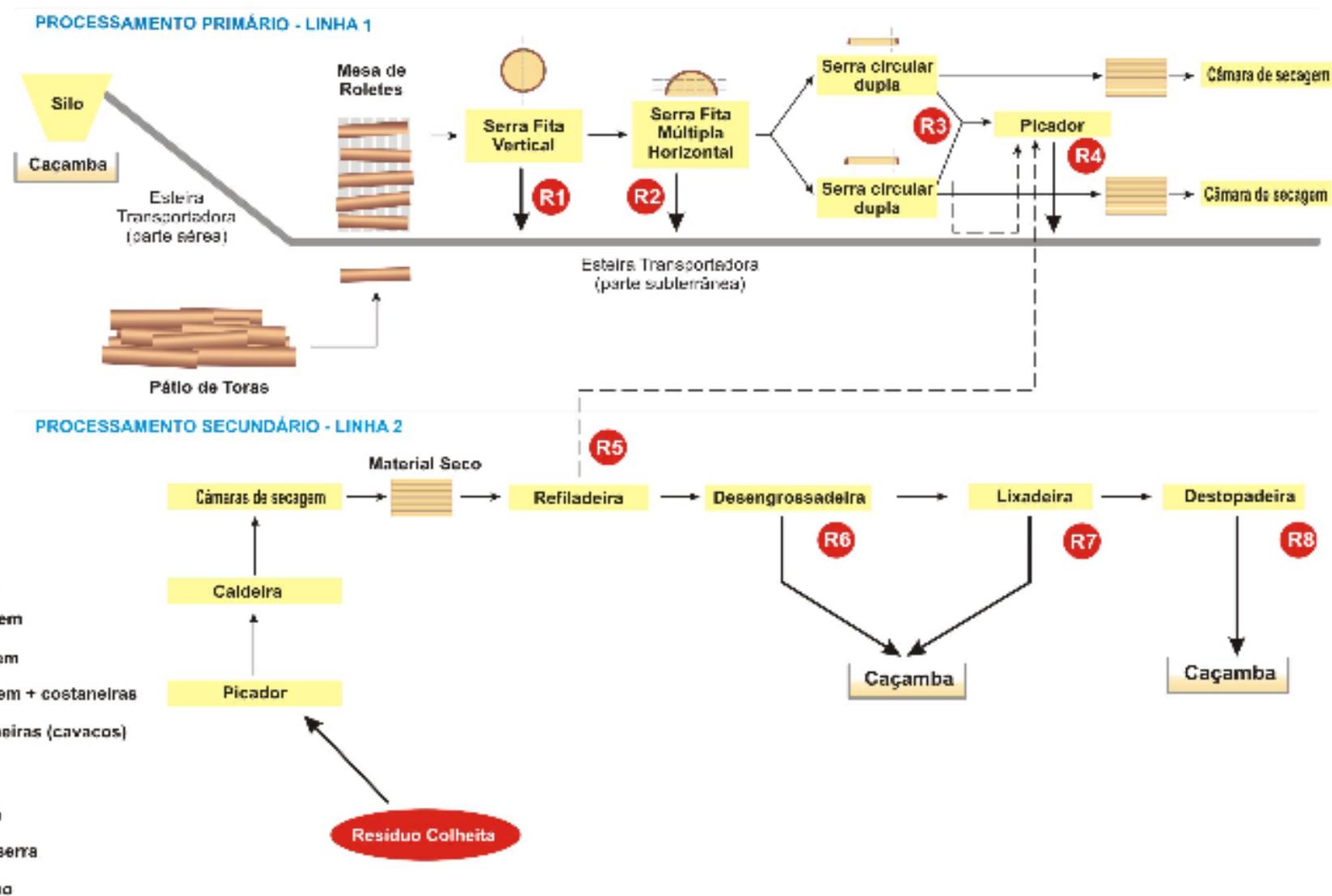


FIGURA 3 - ESQUEMA DO PROCESSAMENTO DA MADEIRA E DAS FONTES GERADORAS DE RESÍDUOS

Após a secagem, o material é retirado das câmaras e encaminhado ao processamento secundário (Linha 2), sendo que este é responsável pelo ajuste da espessura, largura e comprimento das peças que serão encaminhadas para a confecção de *pallets*. Nestas etapas há geração de cepilho, refilos e pó de serra, respectivamente nos equipamentos desengrossadeira, refiladeria, e lixadeira.

Desta forma, foram coletados os resíduos apresentados na Tabela 4.

TABELA 4- QUANTIDADE E LOCALIZAÇÃO DA COLETA DOS MATERIAIS

| Material | Quantidade (kg) | Localização |
|------------------|-----------------|-----------------------------------|
| Resíduo Colheita | 8 | Estoque de abastecimento caldeira |
| Costaneiras | 8 | Processamento primário |
| Refilo | 8 | Processamento secundário |
| Cepilho | 8 | Processamento secundário |
| Pó de serra | 6 | Processamento secundário |

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os resíduos coletados na colheita florestal e no processamento das toras, foram encaminhados ao Laboratório de Energia da Biomassa da Universidade Federal do Paraná e foram determinados a densidade e os teores de umidade e o poder calorífico conforme descrição abaixo.

✓ *Teor de Umidade*

O teor de umidade dos materiais foi calculado de acordo com a norma ABNT/NBR 14929/2003. Para tanto foi utilizado uma balança com sensibilidade de 0,01g e uma estufa com temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$.

A umidade em base seca foi calculada de acordo com a equação 1 referenciada anteriormente.

Foi determinado o teor de umidade assim que os materiais chegaram ao laboratório, para tentar estimar os valores que estes apresentavam no local de coleta.

✓ *Densidade*

A determinação da densidade aparente foi através da norma ABNT/NBR 14984/2003 com algumas adaptações para pequenas amostras.

O teste de densidade aparente foi realizado utilizando uma balança de analítica de precisão para a determinação do peso (com a umidade original) das amostras e um cilindro volumétrico para a conferência do volume dos materiais, e foi calculado através da equação:

$$DA = \frac{\text{massa}(g)}{\text{volume}(cm^3)} \quad (7)$$

Onde:

DA = densidade aparente (g/cm^3)

✓ *Poder Calorífico*

A determinação do poder calorífico superior foi feito de acordo com a norma ABNT/NBR 8633/84. Utilizou uma bomba calorimétrica adiabática modelo IKA-WERNE; C5000.

Foi necessário a transformação dos valores de poder calorífico superior para poder calorífico inferior. Este cálculo foi feito utilizando-se a equação 2 já mencionada e usando o percentual de hidrogênio presente no material como 6%.

✓ *Análise Química Imediata*

Foi realizada de acordo com a norma ABNT/NBR 8112/86 para determinação de materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo. Foi utilizada balança analítica e mufla com controle de aquecimento.

3.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS E AJUSTE DE EQUAÇÕES

A Análise Estatística foi efetuada utilizando-se da Estatística Descritiva, Análise de Variância e Análise de Regressão.

As variáveis referentes à caracterização dos resíduos foram analisadas estatisticamente através da Análise de Variância (ANOVA) e teste de “Tukey”, ao nível de 95%. Para o teor de umidade foram realizadas 10 repetições tentando caracterizar todo o material; para a densidade foram feitas 3 repetições, haja vista a homogeneidade dimensional de cada resíduo e para o poder calorífico 2 repetições de acordo com a atividade do calorímetro.

Para gerar dados que possibilitassem o ajuste de equações que representassem a relação entre o poder calorífico e o teor de umidade dos materiais, foram realizadas duas etapas. A primeira referente ao ajuste dos teores de umidade e posteriormente o cálculo dos valores de poder calorífico em cada umidade.

Para o ajuste dos teores de umidade foi necessário inicialmente a secagem completa dos resíduos em estufa, visto que cada um apresentou diferentes níveis de umidade inicial. Os materiais preparados e secos foram umedecidos de acordo com os teores de umidade base seca pré-definidos, em que se desejava averiguar o poder calorífico.

Foram separadas, por recipiente, amostras de 2,0g de cada material e em cada um foi adicionado uma massa de água referente à umidade desejada, conforme apresentado na Tabela 5. Para melhor representar os teores de umidade, foi considerado classes de 5 unidades de amplitude, desta forma, foi calculado a massa de água mediante o centro de classe da umidade desejada. Foi considerado o material seco (0%) até a classe de 155 a 160% (centro 157,5%), visto que Juvillar (1984, citado por SILVA, 2001) justifica que a madeira é combustível até 160% de umidade base seca.

Este valor de a umidade máxima, no caso 160% na base seca, foi utilizado apenas para o ajuste das equações do resíduo da colheita e das costaneiras pois estes materiais foram coletados com maiores teores de umidade. Já o cepilho, refilo e pó de serra, a umidade máxima considerada foi de 80% base seca.

TABELA 5 - MASSA DE ÁGUA ADICIONADA À 2,0G DE MATERIAL PARA OBTENÇÃO DE UMA UMIDADE (UBS) DESEJADA.

| Ubs desejada (%) | Massa água (g) |
|------------------|----------------|
| 2,5 | 0,05 |
| 7,5 | 0,15 |
| 12,5 | 0,25 |
| 17,5 | 0,35 |
| 22,5 | 0,45 |
| 27,5 | 0,55 |
| 32,5 | 0,65 |
| 37,5 | 0,75 |
| 42,5 | 0,85 |
| 47,5 | 0,95 |
| 52,5 | 1,05 |
| 57,5 | 1,15 |
| 62,5 | 1,25 |
| 67,5 | 1,35 |
| 72,5 | 1,45 |
| 77,5 | 1,55 |
| 82,5 | 1,65 |
| 87,5 | 1,75 |
| 92,5 | 1,85 |
| 102,5 | 2,05 |
| 122,5 | 2,45 |
| 127,5 | 2,55 |
| 132,5 | 2,65 |
| 137,5 | 2,75 |
| 142,5 | 2,85 |
| 147,5 | 2,95 |
| 152,5 | 3,05 |
| 157,5 | 3,15 |

FONTE: O Autor (2010)

Os valores referentes à massa de água a ser adicionada foram pequenos devido a quantidade de material utilizado na amostra, portanto foi necessário a conversão destes valores para números de gotas da pipeta utilizada, haja vista que é uma forma mais fácil para a adição da água. Neste caso foi obtido uma média da massa de água contida em uma gota uniforme da pipeta utilizada, este valor foi de 0,036017g. Desta forma, foi calculado o número de gotas equivalentes à massa de água desejada, quando os valores obtidos não eram números inteiros os mesmos

foram arredondados e a massa de material ajustada pra que a umidade desejada continuasse a mesma.

Após a adição da água, o material foi vigorosamente misturado e tampado, permanecendo por repouso durante 10 minutos e logo em seguida foi medido o respectivo poder calorífico.

As equações ajustadas foram utilizadas para representar a relação entre poder calorífico e umidade dos materiais e subsidiar a análise de custos, sendo que as equações testadas foram as seguintes:

a) Modelo polinomial de 2º grau:

$$Y = a + bx + cx^2 \quad (8)$$

b) Modelo exponencial:

$$Y = \exp(a + bx) \quad (9)$$

c) Modelo Y Recíproco:

$$Y = \frac{1}{a + bx} \quad (10)$$

d) Modelo Raiz quadrada de Y:

$$Y = (a + bx)^2 \quad (11)$$

e) Modelo Raiz quadrada de X:

$$Y = a + b\sqrt{x} \quad (12)$$

A variável considerada como dependente é o poder calorífico inferior e a independente é o teor de umidade na base seca. Foram apresentados os modelos de equações de regressão e polinomial mais adequados para estimar o poder calorífico dos resíduos, mediante observação da tendência dos dados. Na relação

dos modelos foi usada as estimativas dos coeficientes dos melhores modelos testados, bem como seus respectivos coeficientes de determinação ajustados ($R^2_{aj.}$), erro padrão da estimativa em percentagem ($S_{xy}\%$) e análise dos resíduos dos erros.

3.5 ANÁLISE DE CUSTOS

3.5.1 Custos para utilização do secador

Para obtenção dos custos de secagem, foi realizado um levantamento dos custos fixos e custos variáveis para a aquisição e utilização de um secador rotativo de tambor para partículas de biomassa ligno-celulósica.

A obtenção destes dados foi feita mediante consulta à empresa LIPPEL – Equipamentos de Alta Performance situada em Agrolândia – SC, que forneceu o orçamento apresentado na Tabela 6.

TABELA 6 - DADOS SECADOR ROTATIVO DE TAMBOR

| Secador rotativo de tambor LIPPEL | |
|--|---------------------------|
| Valor de aquisição | R\$119.750,00 |
| Vida útil | 20 anos |
| Dias de trabalho / ano | 264 |
| Horas de trabalho / dia | 24 |
| Manutenção anual | 5% ao ano |
| Consumo de energia | 67 kW/h |
| Capacidade entrada | 880 Kg/h |
| Capacidade saída | 500 Kg/h |
| Gastos com instalação | R\$ 50.000 |
| Gasto com alimentação da fornalha | 20% da capacidade nominal |

FONTE: EMPRESA LIPPEL (2009)

É importante ressaltar que para o cálculo do custo referente à alimentação da fornalha foi feito levado em consideração os materiais que a própria empresa produz e que devido à baixa umidade podem ser utilizados como fonte de energia. Para este caso foram feitos os cálculos supondo a necessidade de 176 kg/h (20% da capacidade nominal) usando-se refilo, cepilho e pó de serra para o abastecimento, que possuem valor de mercado apresentados na Tabela 7.

TABELA 7- VALOR DE MERCADO DOS RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO

| Preço de Mercado dos Resíduos | | |
|-------------------------------|--------------------|--------|
| | R\$/m ³ | R\$/Kg |
| Cepilho | 35 | 0,19 |
| Refilo | 35 | 0,19 |
| Pó de serra | 15 | 0,09 |

FONTE: FV. DE ARAUJO (2008)

Assim, os cálculos realizados foram os seguintes:

Custos fixos (CF)

A taxa de juros estipulada para este estudo foi de 10% ao ano. O cálculo dos custos fixos se dá pela soma dos juros, da depreciação e da manutenção, sendo obtido em R\$/hora de trabalho do secador.

Foram calculado o juros, a depreciação e a manutenção para a aquisição do secador e novamente para a instalação do secador.

Sendo:

$$Juros = \frac{\left(\frac{0,10 * VA}{2} \right)}{N^{\circ} horas / ano} \quad (13)$$

$$Depreciação = \frac{VA}{Vida \text{ útil}} \quad (14)$$

$$Manutenção = \frac{0,05 * VA}{Horas \text{ totais}} \quad (15)$$

Onde:

VA = Valor de Aquisição do equipamento

Nº horas/ano = número de horas que o equipamento trabalha por ano

Horas totais = número de horas que o equipamento trabalhará por toda a vida útil.

Custos variáveis (CV)

Para o cálculo dos custos variáveis foi levado em consideração os gastos com energia e com os salários dos operadores do equipamento.

Sendo:

Gasto com energia = para a transformação dos valores de kWh consumidos pelo equipamento em valores monetários foi utilizado a tarifa fornecida pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL), na modalidade industrial – convencional, adimplente com impostos (Tabela 8).

TABELA 8 - VALOR TARIFÁRIO PARA KWH DE ACORDO COM COPEL 2009

| Tarifa Industrial B3 | | |
|-----------------------------|---|----------------|
| CONVENCIONAL | Resolução ANEEL Nº 839, de 23 de junho de 2009 | |
| Tarifa em R\$/kWh | Resolução | Com impostos |
| Adimplente | 0,24383 | 0,37397 |
| Inadimplente | 0,27068 | 0,41515 |

Vigência em 24/072009

FONTE: COPEL (2009)

Salário dos operadores = a base para os cálculos está descrita na Tabela 9 sendo que os dados foram obtidos com o setor de contabilidade da FUPEF do Paraná. Para a operação do secador foi considerado a necessidade de três funcionários.

TABELA 9 - RELAÇÃO DOS CUSTOS ATRIBUIDOS PARA O PAGAMENTO DE SALÁRIO

| Custo para um funcionário/mês | |
|--------------------------------------|--------------------------|
| Salário Mínimo Federal | R\$ 455,00 |
| INSS | 26,5% do salário |
| FGTS | 8% do salário |
| Custo décimo terceiro | salário/12 |
| Custo férias | (33,33% *salário)/12 |
| Vale alimentação | entre R\$5 e R\$ 20/ dia |
| Vale transporte | 2 passes/dia |

FONTE: FUPEF do Paraná (2009)

3.5.2 Análise Benefício/Custo

Esta análise foi realizada considerando a secagem dos resíduos que foram coletados com altas umidades, ou seja, do resíduo da colheita e as costaneiras.

Para o cálculo da receita obtida com a utilização dos materiais foi utilizado como parâmetro a quantidade de energia que estes podem gerar por unidade de massa, quando úmidos e quando secos. Este foi obtido através do poder calorífico inferior estimado através das equações ajustadas para as classes de umidade em questão.

Para valorar esta energia produzida foi considerado o valor equivalente em óleo diesel, cotado para o dia 26/01/2010, nos postos Shell e Ipiranga, no valor de R\$ 2,05. As conversões foram feitas com dados do Balanço Energético Nacional (2008) onde:

- Poder Calorífico Óleo Diesel = 10100 Kcal/Kg
- Densidade = 840 Kg/m³

Os custos utilizados foram os referentes ao valor de mercado para os resíduos já secos (refilo, cepilho e pó de serra) e o valor de mercado acrescido dos custos de secagem para os resíduos da colheita e as costaneiras. Neste caso, para os custos da secagem foram considerados os diferentes materiais para alimentação da fornalha (refilo, cepilho e pó de serra).

3.5.3 Análise comparativa de custos da secagem de diferentes matérias-primas

Para estes cálculos foi feita apenas uma comparação entre o valor de mercado dos materiais e o custo de secagem dos mesmos. O valor de mercado praticado pela empresa para os resíduos em estudo estão apresentados na Tabela 10.

A transformação para R\$/Kg foi feita usando-se os valores de densidade encontrados para os materiais, e já estão aqui apresentados para facilidade de entendimento.

TABELA 10 - VALOR DE MERCADO DOS RESÍDUOS

| Preço de Mercado dos Resíduos | | |
|--------------------------------------|--------------------------|---------------|
| | R\$/ton | R\$/Kg |
| Res. Colheita | 80 | 0,08 |
| Costaneira | 63 | 0,06 |
| | R\$/m³ | R\$/Kg |
| Cepilho | 35 | 0,19 |
| Refilo | 35 | 0,19 |
| Pó de serra | 15 | 0,09 |

FONTE: FV. DE ARAUJO (2008)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA COLHEITA FLORESTAL E DO PROCESSAMENTO DA MADEIRA

4.1.1 Umidade

Os resultados médios para os teores de umidade dos resíduos estudados estão apresentados na Tabela 11, bem como os respectivos coeficientes de variação e testes de médias.

TABELA 11 - TEORES DE UMIDADE MÉDIOS NA BASE SECA (U_{bs}) E RESPECTIVOS TESTES DE MÉDIAS E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO (CV) PARA RESÍDUOS DA FLORESTA E DO PROCESSAMENTO DA MADEIRA.

| Procedência | Material | U _{bs} (%) | CV(%) |
|---------------|------------------|---------------------|-------|
| Processamento | Costaneira | 91,81 (a) | 5,89 |
| Floresta | Resíduo Colheita | 63,36 (b) | 9,63 |
| Processamento | Refilo | 10,64 (c) | 1,42 |
| Processamento | Pó de serra | 8,80 (c) | 2,53 |
| Processamento | Cepilho | 7,14 (c) | 13,89 |

FONTE: O Autor (2010)

NOTA: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Pode-se observar na Tabela 11 que houve a distinção de três grupos de acordo com os teores de umidade médios. As Costaneiras provenientes do processamento da madeira apresentaram a maior média de teor de umidade, seguido pelos resíduos vindos da Colheita Florestal e pelos resíduos do processamento da madeira referentes à Linha 2.

Os resultados obtidos para os resíduos do processamento da madeira já eram esperados visto as condições de processamento primário e secundário. Já o resíduo proveniente da Colheita Florestal obteve valores de umidade menores que os esperados, haja vista que quando se procede a colheita florestal, as toras podem apresentar teores de umidade acima de 100%. Assim, pode-se supor que este material permaneceu no campo após a colheita, dando tempo para que ocorresse uma secagem parcial.

Conforme estudo realizado por Brand (2007), o tempo de estocagem tem influência sobre o teor de umidade, sendo que há uma variação significativa da umidade com relação ao período de estocagem. Neste estudo, foi evidenciado que o teor de umidade foi alto no material recém-coletado e que diminuiu nos primeiros quatro meses de estocagem e voltou a aumentar após este período. Concluindo-se que o tempo de estocagem até os seis meses tem grande influência sobre a qualidade da biomassa para uso como fonte de energia.

4.1.2 Densidade

Os resultados médios para a densidade aparente dos resíduos coletados estão apresentados na Tabela 12, bem como os respectivos coeficientes de variação e testes de médias.

TABELA 12 - VALORES MÉDIOS DE DENSIDADE APARENTE (DENS. APARENTE) E RESPECTIVOS TESTES DE MÉDIAS E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO (CV) PARA OS RESÍDUOS DA FLORESTA E DO PROCESSAMENTO DA MADEIRA.

| Procedência | Material | Dens. aparente (g/cm ³) | CV(%) |
|---------------|------------------|-------------------------------------|-------|
| Processamento | Costaneira | 0,347 (a) | 1,83 |
| Floresta | Resíduo Colheita | 0,235 (b) | 2,33 |
| Processamento | Refilo | 0,187 (c) | 4,26 |
| Processamento | Cepilho | 0,180 (c) | 0,82 |
| Processamento | Pó de serra | 0,161 (d) | 3,41 |

FONTE: O Autor (2010)

NOTA: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Pode-se observar a presença de 4 grupos distintos sendo que apenas o Cepilho e Refilo apresentam valores significativamente iguais de densidade. O resíduo Costaneira apresentou maior valor de densidade, o que pode ser explicado aparentemente pela presença de cascas neste, além da maior umidade apresentada. O resíduo da Colheita deveria apresentar a densidade estatisticamente igual à Costaneira, devido a presença de cascas, porém isto não foi observado possivelmente pela presença de árvores mortas e tocos velhos neste material.

4.1.3 Poder Calorífico

Na Tabela 13 são apresentados os valores médios para o poder calorífico e poder calorífico útil dos resíduos coletados e também os respectivos coeficientes de variação e testes de médias.

TABELA 13 - VALORES MÉDIOS PARA DE PODER CALORÍFICO SUPERIOR, INFERIOR E ÚTIL PARA OS RESÍDUOS EM ESTUDO

| Procedência | Material | Ubs | PCS | PCI | PCLu | CV |
|---------------|---------------|-------|----------|------|------|------|
| | | (%) | | | | (%) |
| Processamento | Cepilho | 7,14 | 4926(a) | 4602 | 4255 | 0,8 |
| Floresta | Res. Colheita | 63,36 | 4902(a) | 4578 | 2570 | 0,45 |
| Processamento | Pó de serra | 8,8 | 4747(ab) | 4423 | 4017 | 0,07 |
| Processamento | Costaneira | 91,81 | 4731(ab) | 4407 | 2010 | 0,03 |
| Processamento | Refilo | 10,64 | 4535(b) | 4211 | 3748 | 2,81 |

FONTE: O Autor (2010)

NOTA: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Mediante os dados apresentados nesta tabela pode-se ressaltar, que de acordo com o poder calorífico superior há a presença de dois grupos estatisticamente diferentes. As maiores médias foram obtidas com os materiais Cepilho e Resíduo da Colheita. Com relação ao poder calorífico útil dos materiais, observa-se que o Resíduo da Colheita e as Costaneiras apresentaram as menores médias, o que claramente é explicado pelo alto teor de umidade destes no momento da coleta.

Os valores de poder calorífico superior conferem com Kollmann (1968) que afirma que o poder calorífico da madeira seca, sem considerar o erro de cinzas, pode ser tomado com um valor médio de 4.500 Kcal/Kg. Os valores tanto de densidade quanto de poder calorífico para as costaneiras são condizentes com Fontes (1994) que encontrou para resíduos úmidos do processamento de *Pinus* spp., poder calorífico inferior com média de 2.9094,39 e densidade média de 0,38 g/cm³.

Fontes (1994) caracterizando energeticamente a madeira de *Pinus* sp. obteve o poder calorífico médio na ordem de 2246,93 kcal/kg para a serragem e de

2592,85 para os cavados. Para a densidade foram encontrados valores médios de 380 Kg/m³ para ambos os materiais.

Balloni (2009) obteve 4.323 Kcal/Kg de poder calorífico obtido a 0% de umidade para a madeira de *Pinus elliotti*. Segundo Staiss e Pereira (2001), o poder caloríficos superior está na faixa de 4.460 Kcal/Kg, para a madeira de conífera. Brito (1993) afirma que a variação do poder calorífico superior para a madeira em geral está entre 3.500 Kcal/Kg a 5.000 Kcal/Kg.

A densidade básica mostrou-se na faixa dos valores obtidos em outros estudos para as árvores da família das coníferas, com uma densidade básica média de 0,470 g/cm³. Andrew e Burley (1972) observaram densidade básica média de 0,48 g/cm³ para árvores de pinus com idades variando entre 16 e 18 anos. De acordo com Rosa (2003), a madeira mais procurada atualmente para conversão em pasta celulose é a que apresenta uma densidade ótima, a qual se encontra entre 0,450 e 0,550 g/cm³.

4.1.4 Análise Química Imediata

Os valores médios para os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas para os cinco resíduos estudados estão apresentados na Tabela 14, bem como os respectivos coeficientes de variação e testes de médias.

TABELA 14 - VALORES MÉDIOS PARA OS COMPONENTES DA ANALISE QUIMICA IMEDIATA E RESPECTIVOS TESTES DE MÉDIAS E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO (CV%) PARA OS RESÍDUOS DA FLORESTA E DO PROCESSAMENTO DA MADEIRA.

| Procedência | Material | Materiais Voláteis | | Carbono Fixo | | Cinzas | |
|------------------------|---------------|--------------------|-------|--------------|-------|------------|-------|
| | | Média (%) | CV(%) | Média (%) | CV(%) | Cinzas (%) | CV(%) |
| Processamento Floresta | Costaneira | 82,57 (a) | 0,67 | 17,01(a) | 3,92 | 0,42 (a) | 26,94 |
| | Res. Colheita | 85,09 (b) | 0,10 | 14,06 (b) | 0,17 | 0,20 (a) | 30,07 |
| Processamento | Cepilho | 85,09 (b) | 0,92 | 14,01 (b) | 5,91 | 0,30 (a) | 26,03 |
| Processamento | Refilo | 84,90 (b) | 0,26 | 14,80 (b) | 1,73 | 0,30 (a) | 12,20 |
| Processamento | Pó de serra | 86,24 (b) | 0,02 | 13,44 (b) | 1,01 | 0,31 (a) | 36,70 |

FONTE: O Autor (2010)

NOTA: Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Primeiramente, com relação aos valores para materiais voláteis e carbono fixo foram apresentados dois grupos estatisticamente diferentes, sendo apenas o

resíduo Costaneira diferente dos demais. As maiores médias encontradas para este resíduo pode ser influenciada mais uma vez pela presença de cascas, porém ainda estão dentro dos valores normalmente observados.

Pode-se observar que todos os materiais são estatisticamente iguais para o teor de cinzas, o que pode ser ressaltado como uma característica positiva para a utilização destes em caldeiras. Vale ressaltar também que os valores de CV% para os teores de cinzas são bem maiores que para os demais componentes, isso pode ser explicado devido ao fato do valor numérico referente ao teor de cinzas ser pequeno.

Embora não significativo, o maior conteúdo de cinzas pode ser explicado devido a fração de casca no material Costaneiras.

4.2 MODELOS DE REGRESSÃO PARA ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO DOS RESÍDUOS

4.2.1 Dispersão e Tendência dos Dados

Na Figura 4 é apresentada a dispersão dos dados e suas curvas de tendência para os resíduos em estudo. Pode-se observar a tendência inversamente proporcional entre o poder calorífico e o teor de umidade dos materiais coletados.

Esta relação entre poder calorífico é bastante conhecida e pode ser confirmada pelos estudos de Kollmann (1968), que apresenta da mesma forma o poder calorífico inferior em função da umidade da madeira, demonstrando que o quanto maior o teor de umidade presente na madeira, menor será sua capacidade de combustão.

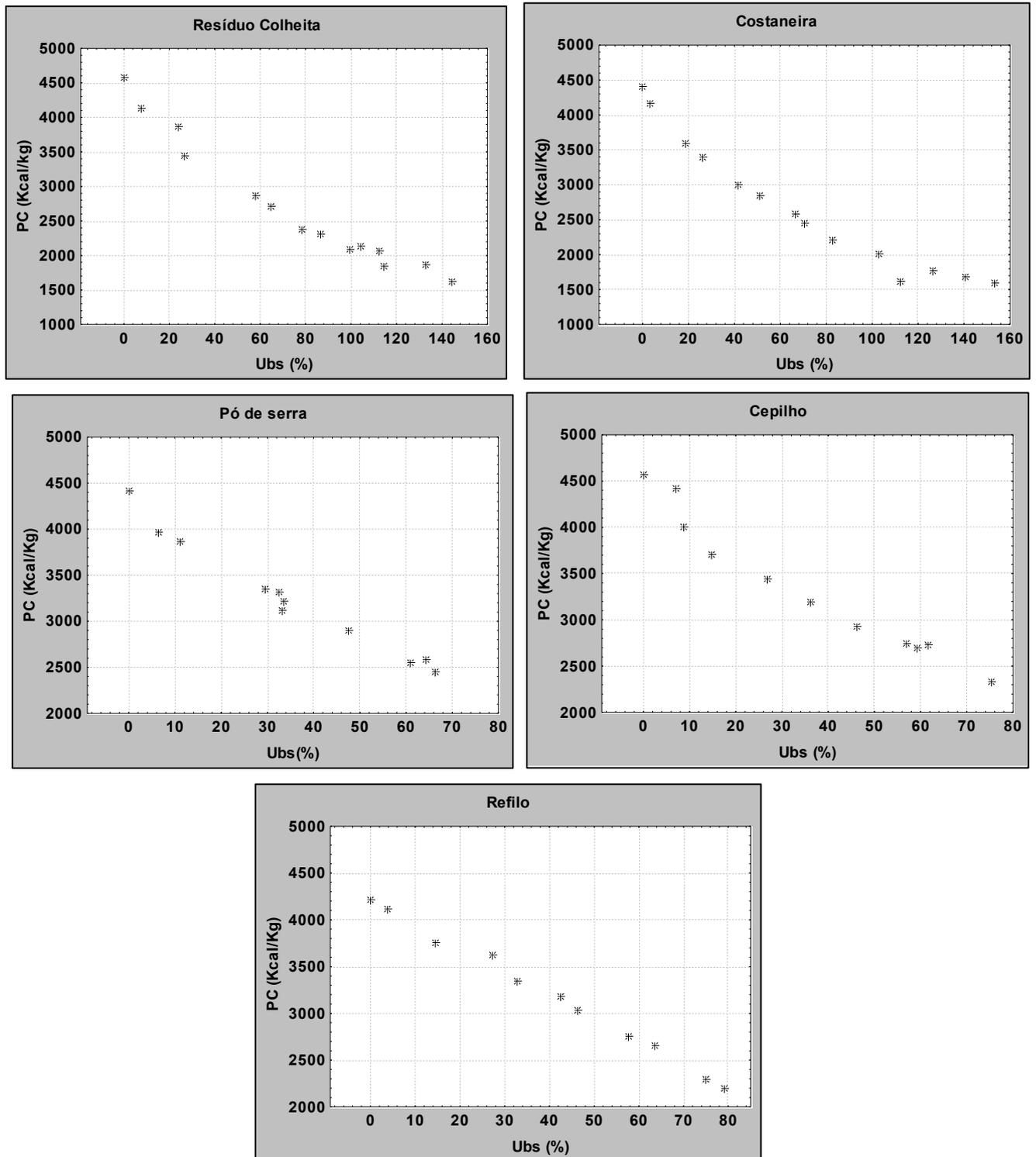


FIGURA 4 - RELAÇÃO ENTRE PODER CALORÍFICO E TEOR DE UMIDADE PARA OS RESÍDUOS DA COLHEITA FLORESTAL E DO PROCESSAMENTO DA MADEIRA

4.2.2 Seleção de Modelos

Os modelos foram desenvolvidos para serem aplicados utilizando resíduos da colheita e do processamento da madeira de *Pinus taeda* com o objetivo de se determinar o poder calorífico inferior destes materiais. Todos os modelos apresentaram valores de F significativos ($p < 0,01$). Os valores dos coeficientes de determinação encontrados foram bons. Nas Tabelas 15 a 19 são apresentados os modelos estudados.

TABELA 15 - RELAÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS PARA ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO DOS RESÍDUOS DA COLHEITA FLORESTAL

| Variável Resposta (Y) | Modelos | a | b | c | R ² _{aj.} | S _{yx} % |
|----------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Poder Calorífico (Kcal/Kg) | Y = a+ bx+cx ² | 4473,46 t= 62,8071 | -34,0764 t= - 4,7309 | 0,103823 t= 6,48976 | 0,9871 | 3,93 |
| | Y = exp (a+bx) | 8,37623 t= 352,89 | - 0,0069714 t = - 25,5976 | - | 0,9807 | 3,62 |
| | Y = 1/(a+bx) | 0,000210205 t = 22,4832 | 0,00000262695 t = 24,5976 | - | 0,9789 | 3,61 |
| | Y = a + (raizx) | 4799,16 t = 51,6111 | -262,455 t = -24,4701 | - | 0,9787 | 3,61 |
| | Y = (a+bx) ² | 65,1615 t = 78,1633 | -0,183635 t = -19,2838 | - | ,09661 | 3,57 |

FONTE: O autor (2010)

TABELA 16 - RELAÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS PARA ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO PARA AS COSTANEIRAS

| Variável Resposta (Y) | Modelos | a | b | c | R ² _{aj.} | S _{yx} % |
|----------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Poder Calorífico (Kcal/Kg) | Y = a+ bx+cx ² | 4292,01 t = 72,1202 | - 34,4697 t= -18,1797 | 0,111166 t = 9,0796 | 0,9897 | 3,71 |
| | Y = a + (raizx) | 4563,07 t = 58,7623 | 248,938 t = -27,0295 | - | 0,9825 | 3,68 |
| | Y = exp (a+bx) | 8,31513 t = 256,948 | - 0,00680107 t = -18,1077 | - | 0,9617 | 3,61 |
| | Y = 1/(a+bx) | 0,000224033 t = 16,8802 | 0,00000275023 t = 17,8543 | - | 0,9607 | 3,60 |
| | Y = (a+bx) ² | 63,2233 t = 64,0772 | - 0,173185 t = - 15,1232 | - | 0,9459 | 3,58 |

FONTE: O autor (2010)

TABELA 17 - RELAÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS PARA ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO PARA O PÓ DE SERRA

| Variável Resposta (Y) | Modelos | a | b | c | R ² _{aj.} | S _{yx} % |
|----------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Poder Calorífico (Kcal/Kg) | Y = a+ bx+cx ² | 4311,2 t = 68,7508 | - 38,4919 t = -9,24571 | 0,167262 t = 2,88358 | 0,9823 | 3,02 |
| | Y = exp (a+bx) | 8,35859 t = 618,901 | - 0,00825877 t = - 25,3029 | - | 0,9846 | 3,03 |
| Variável Resposta (Y) | Modelos | a | b | c | R ² _{aj.} | S _{yx} % |
| | Y = 1/(a+bx) | 0,000227683 t = 51,1989 | 0,00000258505 t = 24,0528 | - | 0,9850 | 3,02 |
| | Y = (a+bx) ² | 65,0029 t = 142,907 | - 0,235272 t = - 21,4023 | - | 0,9786 | 3,01 |
| | Y = a + (raizx) | 4572,67 t = 57,3909 | - 245,122 t = - 18,2082 | - | 0,9706 | 2,99 |

FONTE: O autor (2010)

TABELA 18 - RELAÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS PARA ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO PARA O CEPILHO

| Variável Resposta (Y) | Modelos | a | b | c | R ² _{aj.} | S _{yx} % |
|----------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Poder Calorífico (Kcal/Kg) | Y = a+ bx+cx ² | 4521,29 t = 50,0958 | - 45,579 T = - 7,25154 | 0,239161 t = 2,83426 | 0,9701 | 2,09 |
| | Y = 1/(a+bx) | 0,00021987 t = 46,2821 | 0,00000259774 t = 23,7385 | - | 0,9825 | 2,94 |
| | Y = exp (a+bx) | 8,39496 t = 447,11 | - 0,00847168 T = - 19,5873 | - | 0,9745 | 2,91 |
| | Y = (a+bx) ² | 66,2233 t = 100,8 | - 0,24223 T = - 16,1378 | - | 0,9629 | 2,88 |
| | Y = a + (raizx) | 4803,98 t = 46,4932 | - 271,2 T = - 15,6895 | - | 0,9608 | 2,87 |

FONTE: O autor (2010)

TABELA 19 - RELAÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS PARA ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO PARA O REFILO

| Variável Resposta (Y) | Modelos | a | b | c | R ² _{aj.} | S _{yx} % |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Poder Calorífico (Kcal/Kg) | Y = a + bx+cx ² | 4192,91 t = 111,159 | - 23,6145 t = -10,7296 | - 0,020008 t = - 0,74476 | 0,9940 | 2,62 |
| | Y = a + bx | 4210,33 t = 145,949 | - 25,1878 t = -41,8159 | - | 0,9943 | 3,11 |
| | Y = (a+bx) ² | 65,2684 t = 195,099 | - 0,224456 t = -32,133 | - | 0,9904 | 3,10 |
| | Y = exp (a+bx) | 8,37222 t = 499,632 | - 0,00805447 t = -23,0205 | - | 0,9814 | 3,07 |
| | Y = 1/(a+bx) | 0,000220496 t = 233,8325 | 0,0000026462 t = 13,698 | - | 0,9491 | 2,97 |

FONTE: O autor (2010)

✓ Modelo selecionado

O modelo selecionado para estimar o poder calorífico inferior dos resíduos da colheita florestal e do processamento da madeira de *Pinus taeda* foi o polinomial de 2º grau ($Y = a + bx + cx^2$). Embora todos os modelos mostrados obtiveram um bom desempenho, este foi escolhido devido ao fato de apresentar valores de R^2_{aj} relativamente próximos para todos os resíduos e também pelo $S_{yx}\%$ se apresentar com baixos valores.

4.3 ANÁLISE DE CUSTOS

4.3.1 Custos para utilização do secador

Os custos fixos e variáveis referentes à utilização do secador para os resíduos em estudo estão apresentados na Tabela 20.

TABELA 20 - CUSTOS REFERENTES AO PROCESSO DE SECAGEM DOS RESÍDUOS

| Custos Fixos do Equipamento | | |
|--------------------------------------|-------|-------|
| Juros | 0,94 | R\$/h |
| Depreciação | 0,94 | R\$/h |
| Manutenção | 0,94 | R\$/h |
| Custos Fixos da Instalação | | |
| Juros | 0,39 | R\$/h |
| Depreciação | 0,26 | R\$/h |
| Manutenção | 0,24 | R\$/h |
| Custo Alimentação da Fornalha | | |
| Usando Cepilho | 34,14 | R\$/h |
| Usando Refilo | 32,91 | R\$/h |
| Usando Pó de serra | 16,37 | R\$/h |
| Custos Variáveis | | |
| Gasto energia | 24,31 | R\$/h |
| Salários operadores (3) | 23,28 | R\$/h |

FONTE: O autor (2010)

Pode-se observar que os custos mais elevados são referentes à alimentação da fornalha do próprio secador e gastos com energia e salário dos operadores. A

matéria-prima de base florestal representa a parte dos custos de maior relevância, afirmou Delespinassi (1995) em seu estudo sobre análise investimentos na indústria de compensados.

Para o caso da alimentação da fornalha, a utilização de Cepilho, se torna a mais dispendiosa, o que é explicado pelo valor de mercado mais alto que este possui perante os outros materiais.

De acordo com as características do secador, para o processo de secagem de 880Kg de Resíduo da Colheita gasta-se 1 hora. Já, para as Costaneiras que possuem umidade inicial maior em comparação com o Resíduo da Colheita, é necessário o tempo de 1,45 horas considerando a mesma massa. Assim, na Tabela 21 são apresentados os custos totais por hora, para a secagem dos Resíduos da Colheita e das Costaneiras, utilizando-se os três possíveis materiais para alimentação da fornalha.

TABELA 21 - CUSTOS TOTAIS PARA A SECAGEM DOS RESÍDUOS DA COLHEITA E DAS COSTANEIRAS UTILIZANDO DIFERENTES MATERIAIS PARA ALIMENTAÇÃO DA FORNALHA.

| CUSTOS TOTAIS | | |
|---------------------------------------|-----------------|---------------|
| Secagem do Resíduo da Colheita | | |
| Alimentação da fornalha: | R\$/hora | R\$/Kg |
| Cepilho | 85,46 | 0,17 |
| Refilo | 84,23 | 0,17 |
| Pó de serra | 67,68 | 0,14 |
| Secagem de Costaneiras | | |
| Alimentação da fornalha: | R\$/hora | R\$/Kg |
| Cepilho | 123,83 | 0,25 |
| Refilo | 122,05 | 0,24 |
| Pó de serra | 98,07 | 0,20 |

FONTE: O autor (2010)

Novamente, observa-se a elevação dos custos quando o material usando para alimentar a fornalha é o Cepilho. Nesta tabela também pode-se ressaltar que os custos para a secagem das Costaneiras são maiores que para os Resíduos da Colheita, o que pode ser explicado pela variação de umidade destes.

4.3.2 Análise Benefício/Custo

A) Para a secagem de Resíduos da Colheita

Na Tabela 22 é apresentada a razão Benefício/Custo para a secagem de Resíduos da Colheita considerando três diferentes tipos de alimentação para a fornalha do secador.

TABELA 22 - BENEFÍCIO/CUSTO PARA A SECAGEM DE RESÍDUOS DA COLHEITA UTILIZANDO DIFERENTES MATERIAIS PARA A ALIMENTAÇÃO DA FORNALHA.

| Alimentação da fornalha | Classe de umidade | PCI estimado | Custo | Equivalente em óleo diesel | Valor em óleo diesel | Razão B/C |
|-------------------------|-------------------|--------------|-------|----------------------------|----------------------|-------------|
| | % | Kcal/Kg | R\$ | L | R\$ | |
| Cepilho | 67,5 | 2646,35 | 0,08 | 0,31 | 0,63 | 2,20 |
| | 7,5 | 4223,73 | 0,25 | 0,50 | 1,01 | |
| Refilo | 67,5 | 2646,35 | 0,08 | 0,31 | 0,63 | 2,23 |
| | 7,5 | 4223,73 | 0,25 | 0,50 | 1,01 | |
| Pó de serra | 67,5 | 2646,35 | 0,08 | 0,31 | 1,01 | 2,77 |
| | 7,5 | 4223,73 | 0,22 | 0,50 | 0,63 | |

FONTE: O autor (2010)

Os Resíduos da Colheita com umidade na classe de 67,5%, ou seja, na classe em que são obtidos na empresa, geram em torno de 2646,35Kcal/Kg o que comparativamente, equivale a 0,31L de óleo diesel, aproximadamente R\$ 0,63 com a cotação atual do óleo combustível. Este mesmo resíduo quando seco (classe 7,5%) pode gerar 4223,73 Kcal/Kg, que da mesma forma, equivale a 0,50 L de óleo e R\$ 1,01. Portanto, com a secagem deste material há um incremento de R\$ 0,38 em equivalente óleo combustível mediante o aumento do poder calorífico do material.

Assim, quando se utiliza Cepilho para o abastecimento da fornalha, há um custo de R\$ 0,25 para a aquisição e secagem de Resíduos da Colheita enquanto que para o resíduo úmido há apenas o custo de aquisição que é de R\$ 0,08. A partir desta relação entre os custos e o valor gerado equivalente em óleo combustível, dá-se a razão Benefício/Custo que para este caso foi de 2,20, ou seja, para cada

R\$1,00 investido é obtido um retorno de R\$2,20. Com a utilização de Refilo para a alimentação da fornalha obteve-se 2,23 e para o Pó de serra 2,77.

Embora a razão B/C seja análise individual e que compara somente a viabilidade de secagem de uma matéria-prima, tendo como base o equivalente em óleo diesel, os valores apresentados indicam que a secagem dos Resíduos da Colheita é uma atividade vantajosa independente do material utilizado para fornecimento de energia ao secador.

Houve uma pequena diferença entre as razões B/C, o que é explicado pelo baixo valor de aquisição do Pó de serra, portando para este caso é mais indicado a utilização desta matéria-prima, levando em consideração a disponibilidade de oferta na região de instalação do secador.

B) Para a secagem de Costaneiras

Na Tabela 23 é apresentada a razão Benefício/Custo para a secagem de Costaneiras, considerando três diferentes tipos de suprimentos para a fornalha do secador.

TABELA 23 - BENEFÍCIO/CUSTO PARA A SECAGEM DE COSTA-NEIRAS UTILIZANDO DIFERENTES MATERIAIS PARA A ALIMENTEÇÃO DA FORNALHA.

| Alimentação da fornalha | Classe de umidade | PCI estimado | Custo | Equivalente em óleo combustível | Valor em óleo combustível | Razão B/C |
|-------------------------|-------------------|--------------|-------|---------------------------------|---------------------------|-------------|
| | % | Kcal/Kg | R\$ | L | R\$ | |
| Cepilho | 97,5 | 1987,99 | 0,06 | 0,23 | 0,47 | 1,97 |
| | 7,5 | 4039,74 | 0,31 | 0,48 | 0,96 | |
| Refilo | 97,5 | 1987,99 | 0,06 | 0,23 | 0,47 | 2,00 |
| | 7,5 | 4039,74 | 0,30 | 0,48 | 0,96 | |
| Pó de serra | 97,5 | 1987,99 | 0,06 | 0,23 | 0,47 | 2,49 |
| | 7,5 | 4039,74 | 0,26 | 0,48 | 0,96 | |

FONTE: O autor (2010)

As Costaneiras com umidade na classe de 97,5%, ou seja, na classe em que são obtidos na empresa, podem gerar em torno de 1987,99Kcal/Kg o que comparativamente, equivale a 0,23L de óleo combustível, aproximadamente R\$ 0,47 com a cotação atual do óleo combustível. Este mesmo resíduo quando seco (classe

7,5%) pode gerar 4039,74 Kcal/Kg, que da mesma forma, equivale a 0,48 L de óleo e R\$ 0,49. Portanto, com a secagem deste material há um incremento de R\$ 0,38 em equivalente óleo combustível mediante o aumento do poder calorífico do material.

O custo para aquisição e secagem das Costaneiras no secador tendo como fonte de energia o Cepilho, há um custo de R\$ 0,31, enquanto que para o mesmo material porém úmido há apenas o custo de aquisição que é de R\$ 0,08. A razão Benefício/Custo para este caso foi de 1,97. Já, com a utilização de Refilo para a alimentação da fornalha obteve-se 2,00 e para o Pó de serra 2,49.

Os valores apresentados indicam que a secagem de Costaneiras é uma atividade vantajosa independente do material utilizado para fornecimento de energia ao secador. Ainda neste caso, observa-se novamente que, a secagem utilizando Pó de serra como fonte de energia é a mais vantajosa devido ao valor de aquisição deste, embora haja a necessidade de estudos que analisem a disponibilidade de oferta e custos com transporte do material planta de secagem.

4.3.3 Análise comparativa de custos da secagem de diferentes matérias-primas

Na Tabela 24 estão apresentados os valores praticados no mercado (dez. 2008) para os resíduos em estudo juntamente com os custos de secagem para aqueles que são gerados com altas umidades. Esta tabela visa a comparação da secagem de materiais com outros já disponíveis no mercado em condições já secas.

TABELA 24 - VALOR DE MERCADO E CUSTO DE SECAGEM PARA OS RESÍDUOS EM ESTUDO

| Material | Valor de mercado (R\$/Kg) | Custo secagem (R\$/Kg) | Custo aquisição + secagem (R\$/Kg) |
|-----------------|----------------------------------|-------------------------------|---|
| Res. Floresta | 0,08 | 0,14 - 0,17 | 0,22 - 0,25 |
| Costaneira | 0,06 | 0,20 - 0,25 | 0,26 - 0,31 |
| Cepilho | 0,19 | - | 0,19 |
| Refilo | 0,19 | - | 0,19 |
| Pó de serra | 0,09 | - | 0,09 |

FONTE: O autor (2010)

Analisando unicamente sob o ponto de vista do valor de mercado e do custo de secagem observa-se que, para a aquisição e secagem do Resíduo da Colheita e das Costaneiras, gasta-se em torno de R\$ 0,22 a R\$ 0,31, enquanto que para a aquisição de resíduos em condições já secas e mais vantajosas energeticamente gasta-se R\$ 0,19 e R\$ 0,09.

Assim, para este caso, não é vantajoso a secagem dos resíduos úmidos devido justamente a disponibilidade de materiais com menores preços e já secos. Embora a apresentação desta vantagem seja correta, deve-se observar a disponibilidade destas matérias-primas na região de instalação da unidade industrial, bem como o fornecimento contínuo e homogêneo.

Havendo Cepilho, Refilo ou Pó de serra de maneira sustentável na região é viável a utilização destes para fornecimento de energia, caso contrário, a secagem de resíduos úmidos como os da Colheita Florestal e de Costaneiras é uma atividade vantajosa para o uso posterior como fonte energética.

5. CONCLUSÕES

A) Com relação à caracterização do material:

- As Costaneiras e o Resíduo da Floresta apresentaram os maiores teores de umidade, não sendo indicados para o uso como fonte energética “in natura”.
- As costaneiras apresentaram a maior densidade.
- O poder calorífico superior dos resíduos foi observado entre a faixa de 4550 e 4950 Kcal/Kg, e o poder calorífico útil das Costaneiras e dos Resíduos da Colheita apresentou uma relevante queda visto o teor de umidade destes materiais.
- Apenas as costaneiras se mostraram significativamente diferente dos demais resíduos com relação ao teor de materiais voláteis e carbono fixo.
- O teor de cinzas foi estatisticamente igual para todos os resíduos.

B) Com relação ao ajuste das equações:

- As equações estudadas demonstraram um bom ajuste para todos os resíduos.
- O modelo selecionado expressa com mais de 97%, para todos os resíduos, a relação entre poder calorífico e umidade.

C) Com relação à viabilidade econômica da secagem:

- Para a atividade do secador de partículas, o custo mais elevado foi obtido com a alimentação da fornalha, principalmente quando usa-se cepilho no abastecimento.

- De acordo com a Razão Benefício/Custo, é viável utilizar o processo de secagem para as costaneiras e para o resíduo da floresta.
- De acordo com valor de mercado dos resíduos, se houver cepilho, refilo ou pó de serra de maneira sustentável na região é viável a utilização destes para o fornecimento de energia, não necessitando secagem.

REFERÊNCIAS

ABRAF, **Anuário estatístico**. 2009.

ABIMCI, **Estudo Setorial**. 2008. Indústria de Madeira Processada Mecanicamente.

ANDREW, I. A.; BURLEY, J. Variation of wood quality of *Pinus merkusii* jungh and de vriese: five trees 16-1 years old in Zambia. **Rhodesian-Journal-of-Agricultural-Research**, v. 10, n. 2, p. 183-202, 1972

BALLONI, C.J.V. **Caracterização Física e Química da Madeira de *Pinus elliottii***. Trabalho de Graduação apresentado no Campus Experimental de Itapeva - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como requisito para a conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira.

BERGER, R. Análise benefício-custo: instrumento de auxílio para a tomada de decisões na empresa florestal. Piracicaba: IPEF março 1980. **Circular Técnica n. 97**. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr097.pdf>>. Acesso em; 15/10/2009.

BIASI, C.P.; **Rendimento e eficiência no desdobro de três espécies tropicais**. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

BOWYER, J.L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J.G. **Forest Products and Wood Science: an introduction**. 3.ed. Backwell Publishing. 2003.

BRAND, M .A. Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem. 169 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

BRAND, M.A.; MUÑIZ, G.I.B.; SILVA, D.A.; KLOCK, U. Caracterização do rendimento e quantificação dos resíduos gerados em serrarias através do balanço de materiais. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 32, n. 2, p. 247-259, jul. 2005.

BRAND, M.A.; OLIVEIRA, J.; MARTINS, A.S.; OLIVEIRA, L.C.; NEVERS, M.D. **Parâmetros do controle da qualidade e preço da biomassa florestal para a geração de energia**. Revista ANEEL N° 3 – Projetos de Geradoras 36-38. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/REVISTAP&D3.PDF>>

Acesso em: 30/03/2010

BRASIL . Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional**, 2008.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Usos diretos e propriedades da madeira para a geração de energia. Piracicaba: IPEF junho 1979. **Circular Técnica n. 52**.

Disponível em: < <http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr052.pdf>>. Acesso em; 15/10/2009.

BRITO, J.O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In: 7 Congresso Florestal Brasileiro e I Congresso Florestal Panamericano, Curitiba, 19-24/setembro/1993. **Anais...** SBS; SBEF, Curitiba, 1993. P 280-282.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G.; COUTO, H.T.Z.; FAZZIO, E.C.M.; CORRADINI, L.; CARRARA, M.A.; MIGLIONI, A.J. **Avaliação das características dos resíduos de exploração florestal do eucalipto para fins energéticos**. Piracicaba: IPEF agosto 1979. Circular Técnica n. 62. Disponível em:

<<http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr062.pdf>> Acesso em: 15/07/2009.

CARDOSO, A. de L. **Pirólise lenta de serragem de eucalipto para obtenção de bioóleo e produção de carvão**. 139f. Dissertação (Mestrado em Química Analítica) – Setor de Química, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. Campinas, SP. Editora da UNICAMP, 2008.

COMPAINHA PARANAENSE DE ENERGIA, COPEL. Taxas e tarifas. Disponível em:< <http://www.copel.com/hpcopel/comercial/>>. Acesso em:15/10/2009

COUTO, L.C.; COUTO, L.; WATZLAWICK, L.F.; CÂMARA, D. Vias de valoração energética da biomassa. **Biomassa e Energia**, Viçosa v.1, n.1, p. 71 – 92, 2004. Disponível em:<http://www.renabio.org.br/arquivos/p_vias_biomassa_5919.pdf> . Acesso em: 20/09/2009

DELESPINASSE, B.F.M. **Simulação de análise de investimentos na indústria de compensados no Brasil**. 71f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

FIGUEIREDO, C. K. **Análise estatística do efeito das pressão na carbonização da madeira de *Eucaliptus grandis***. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Setor de Ciências Agrárias, Universidade de Brasília, 2009. Disponível em :<http://bdtd.bcr.unb.br/tesdesimplificado/tde_busca/arquivo?phpcodArquivo=4709>. Acesso em: 20/09/2009.

FONTES, P.J.P. **Auto-suficiência energética em serraria de Pinus e aproveitamento de resíduos**. 93f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. 1994

FARINHAQUE, R. **Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracatinga (*Mimosa scabrella*, Benth) e aspectos gerais da combustão**. Curitiba: FUPEF, 1981. Seria Técnica nº 6.

GOLDEMBERG, J. Pesquisa e Desenvolvimento na área de energia. **São Paulo em Perspectiva**, São Paulo, v.14, n.3, p. 91 – 97, 2000. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ssp/v14n3/9776.pdf>> Acesso em: 20/09/2009

GUARDABASSI, P.M. **Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia: perspectivas para países em desenvolvimento**. 126f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto de Eletrotécnica e Energia. São Paulo – Universidade de São Paulo. 2006.

HOFFMANN, R.; et.al. **Administração da Empresa Agrícola**. 4 ed. Piracicaba: Editora Pioneira Economia. 1984

HILLING, E.; SCHNEIDER, V.E.; WEBER, C.; TECCHIO, D.R. Resíduos de madeira da indústria madeireira – caracterização e aproveitamento. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 16., 2006. **Anais...** – Fortaleza, 2006. Disponível em:<http://www.abepro.org.br/biblioteca/ ENEGEP2006_TR520346_8192.pdf> Acesso em:20/09/2009

HIRSCHFELD, H. **Engenharia Econômica e Análise de Investimentos**. 7ed. São Paulo: Editora Atlas S.A. – 2009.
INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL,

IBDF. Levantamento dos resíduos de indústrias florestais do Paraná e Santa Catarina. Curitiba Convenio IBDF/Fundação da Universidade do Paraná. Relatório Final. 1984.

KOLLMANN, F.F.P.; COTÊ, W.A. **Principles of wood science and technology**, 2 vol. Berlin: Springer Verlag, , 1968,.

KOCH, P. Utilization of southern pines. 2v. Washington, USD Forest Service, Southern Foresta Experiment Station, 1972.

LEVELTON, B.H., O'CONNOR, D.V.. **An evaluation of wood-waste energy conversion systems.** Canadá. Environmet Canada Western Forest Products Lab. 1978.

LIMA, E.G.; SILVA, D. A. Resíduos gerados em indústrias de móveis de madeira situadas no pólo moveleiro de Araçongas – PR. **Revista Floresta**, Curitiba: v. 35, n. 1, p. 105-116, jan./abr. 2005.

MACKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion Technologies. **Bioresource Technology** n.83, p 42 – 54. 2002a.

MACKENDRY, P. Energy production from biomass (part 3): gasification Technologies. **Bioresource Technology** n.83, p 55 – 63 . 2002b.

MAGOSSI , D.C. **A produção florestal e a industrialização de seus resíduos na região de Jaguariaiva – Paraná.**88f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)- Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. 2007.

MONTESINO, F.F.M; MONTESINO, T.M.; ALCÁNTARA, T.C.; ACÁNTARA, J.C.;

MIRASOL, J.R.; Estudio del potencial energético de biomassa de Pinus Caribea Morelet var Morelet e Pinus tropicalis Morelet.Chanpingo. Revista Chapingo, Serie ciências forestales y del ambiente, v. 7, n.0017, 2005

NOGUEIRA, L. A. H. **Bioenergias e Sustentabilidade:** nexos e métodos. São Paulo: jan. 2005.

NOGUEIRA, L.A.H e LORA, E.E.S. **Dendoenergia:** fundamentos e aplicações - 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

OLNADOSKY, D.P. **Rendimento, resíduos e considerações sobre melhorias no processo em indústrias de chapas compensadas.** 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

PINHEIRO, G.F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J.T. Densidade energética de resíduos vegetais. **Biomassa e Energia.** 2006. Disponível em: <<http://www.ufpa.br/gedae/BIOMASSAEENERGIA2006.pdf> >. Acesso em:20/09/2009

PÉREZ, S.; RENEDO, C.J.; ORTIZ, A.; MAÑANA, M.; SILIÓ, D. Energy evaluation of the *Eucalyptus globulus* and the *Eucalyptus nitens* in the North of Spain (Cantabria). **Thermochimica Acta** n.451, p. 57-64., 2006. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em:20/09/2009

QUIRINO, W.F.; VALE, A.T do; ANDRADE, A.P.A. de; ABREU, V.L.S.; AZEVEDO, AC.dos S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa e Energia**, Viçosa, v.1, n.2, p. 173-182. 2004.

REZENDE, O; OLIVEIRA, A.D. **Análise econômica e social de projetos florestais**. 1 ed. Viçosa. Editora UFV. 2001

ROCHA, M. P. ; KLITZKE, R. J. ; SANFELICE, E. ; FAGION, L. F.. Madeira como fonte de energia. **Madeira e Tecnologia**, Curitiba, p. 26 - 27, 16 abr. 1998.

ROSA, C. A. B. **Influência do teor de lignina da madeira de eucalyptus globulus na produção e na qualidade da celulose kraft**. 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal/Tecnologia de Produtos Florestais). Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SALMERON, A. **Pesquisa sobre mecanização florestal para abastecimento industrial de resíduo visando a produção de energia**. Piracicaba: Série Técnica IPEF, v.1, n.2 , p.B.1 – B 12, jul. 1980.

SILVA, D. **Avaliação da eficiência energética em uma indústria de painéis compensados**. 182f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias – Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2001.

TOMASELLI , I. Secagem de lâminas para indústria de painéis. **Madeira Móveis**, n.1, v.1, p. 27-33, 1983.

U.S.D.A. **Wood Handbook**. Wasington: U.S. Government Printing Office, 1968.

VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: Editora UFPR. 2001.

VIERA, R. S. **Pequenos objetos de madeira de eucalipto: possibilidades de aproveitamento de resíduo**. 94f.. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira)- Setor de Ciências Agrárias - Universidade Federal de Lavras. 2006

APÊNDICES

APÊNDICE 1. ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA TEOR DE UMIDADE BASE SECA DOS RESÍDUOS COLETADOS.

Análise de variância para o teor de umidade dos resíduos

| Analysis of Variance | | | | | |
|----------------------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
| Between groups | 60783,3 | 4 | 15195,8 | 1124,99 | 0,0000 |
| Within groups | 607,836 | 45 | 13,5075 | | |
| Total (Corr.) | 61391,2 | 49 | | | |

Teste de médias para o teor de umidade por resíduo

Method: 95,0 percent Tukey HSD

| Material | Count | Mean | Homogeneous Groups | |
|---------------|-------|---------|--------------------|--|
| Cepilho | 10 | 7,1447 | X | |
| Pó de serra | 10 | 8,79952 | X | |
| Refilo | 10 | 10,6393 | X | |
| Res. Colheita | 10 | 63,361 | X | |
| Mistura | 10 | 91,8091 | X | |

| Contrast | Difference | +/- Limits |
|-----------------------------|------------|------------|
| Cepilho - Mistura | *-84,6644 | 4,67057 |
| Cepilho - Pó de serra | -1,65481 | 4,67057 |
| Cepilho - Refilo | -3,49457 | 4,67057 |
| Cepilho - Res. Colheita | *-56,2163 | 4,67057 |
| Mistura - Pó de serra | *83,0096 | 4,67057 |
| Mistura - Refilo | *81,1699 | 4,67057 |
| Mistura - Res. Colheita | *28,4481 | 4,67057 |
| Pó de serra - Refilo | -1,83976 | 4,67057 |
| Pó de serra - Res. Colheita | *-54,5615 | 4,67057 |
| Refilo - Res. Colheita | *-52,7218 | 4,67057 |

* denotes a statistically significant difference.

APÊNDICE 2. ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA A DENSIDADE APARENTE DOS RESÍDUOS COLETADOS.

Análise de variância para a densidade aparente dos resíduos

| Analysis of Variance | | | | | |
|----------------------|----------------|----|--------------|---------|---------|
| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
| Between groups | 0,0671787 | 4 | 0,0167947 | 504,85 | 0,0000 |
| Within groups | 0,000332667 | 10 | 0,0000332667 | | |
| Total (Corr.) | 0,0675113 | 14 | | | |

Teste de médias para a densidade aparente por resíduo

| Method: 95,0 percent Tukey HSD | | | |
|--------------------------------|-------|----------|--------------------|
| Material | Count | Mean | Homogeneous Groups |
| Pó de serra | 3 | 0,161333 | X |
| Cepilho | 3 | 0,180667 | X |
| Refilo | 3 | 0,187333 | X |
| Res. Colheita | 3 | 0,235333 | X |
| Mistura | 3 | 0,347 | X |

| Contrast | Difference | +/- Limits |
|-----------------------------|-------------|------------|
| Cepilho - Mistura | *-0,166333 | 0,0155001 |
| Cepilho - pó de serra | *0,0193333 | 0,0155001 |
| Cepilho - Refilo | -0,00666667 | 0,0155001 |
| Cepilho - Res. Colheita | *-0,0546667 | 0,0155001 |
| Mistura - pó de serra | *0,185667 | 0,0155001 |
| Mistura - Refilo | *0,159667 | 0,0155001 |
| Mistura - Res. Colheita | *0,111667 | 0,0155001 |
| Pó de serra - Refilo | *-0,026 | 0,0155001 |
| Pó de serra - Res. Colheita | *-0,074 | 0,0155001 |
| Refilo - Res. Colheita | *-0,048 | 0,0155001 |

* denotes a statistically significant difference.

APÊNDICE 3. ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA O PODER CALORÍFICO INFERIOR DOS RESÍDUOS COLETADOS.

Análise de variância para para o poder calorífico inferior dos resíduos

ANOVA Table for PCS by Material

| Analysis of Variance | | | | | |
|----------------------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
| Between groups | 198263,0 | 4 | 49565,8 | 13,57 | 0,0068 |
| Within groups | 18263,0 | 5 | 3652,6 | | |
| Total (Corr.) | 216526,0 | 9 | | | |

Teste de médias para o poder calorífico inferior por resíduo

Multiple Range Tests for PCS by Material

Method: 95,0 percent Tukey HSD

| Material | Count | Mean | Homogeneous Groups |
|--------------|-------|--------|--------------------|
| refilo | 2 | 4535,0 | X |
| costaneiras | 2 | 4731,0 | XX |
| po de serra | 2 | 4747,5 | XX |
| res colheita | 2 | 4902,5 | X |
| cepilho | 2 | 4926,0 | X |

| Contrast | Difference | +/- Limits |
|----------------------------|------------|------------|
| cepilho - costaneiras | 195,0 | 241,332 |
| cepilho - po de serra | 178,5 | 241,332 |
| cepilho - refilo | *391,0 | 241,332 |
| cepilho - res colheita | 23,5 | 241,332 |
| costaneiras - po de serra | -16,5 | 241,332 |
| costaneiras - refilo | 196,0 | 241,332 |
| costaneiras - res colheita | -171,5 | 241,332 |
| po de serra - refilo | 212,5 | 241,332 |
| po de serra - res colheita | -155,0 | 241,332 |
| refilo - res colheita | *-367,5 | 241,332 |

* denotes a statistically significant difference.

APÊNDICE 4. AJUSTE DE EQUAÇÕES PARA AS VARIÁVEIS: PODER CALORÍFICO INFERIOR E UMIDADE BASE SECA PARA OS RESÍDUOS.

A) Material: Resíduo Colheita

Parâmetros estimados

| Parameter | Estimate | Standard Error | T Statistic | P-Value |
|-----------|----------|----------------|-------------|---------|
| CONSTANT | 4473,46 | 71,2254 | 62,8071 | 0,0000 |
| Ubs | -34,0764 | 2,31326 | -14,7309 | 0,0000 |
| Ubs^2 | 0,103823 | 0,015998 | 6,48976 | 0,0000 |

Analysis of Variance

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|---------------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Model | 1,13555E7 | 2 | 5,67773E6 | 500,32 | 0,0000 |
| Residual | 124831,0 | 11 | 11348,2 | | |
| Total (Corr.) | 1,14803E7 | 13 | | | |

R-squared = 98,9127 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 98,715 percent

Standard Error of Est. = 106,528

Mean absolute error = 78,9361

Durbin-Watson statistic = 2,94361 (P=0,0033)

Lag 1 residual autocorrelation = -0,560729

Análise de variância para as variáveis após o ajuste

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|--------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Ubs | 1,08775E7 | 1 | 1,08775E7 | 958,52 | 0, |
| Ubs^2 | 477953,0 | 1 | 477953,0 | 42,12 | 0, |
| Model | 1,13555E7 | 2 | | | |

Analysis of Variance with Lack-of-Fit

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|---------------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Model | 1,13555E7 | 2 | 5,67773E6 | 500,32 | 0,0000 |
| Residual | 124831,0 | 11 | 11348,2 | | |
| Lack-of-Fit | 124831,0 | 11 | 11348,2 | | |
| Pure Error | 0,0 | 0 | | | |
| Total (Corr.) | 1,14803E7 | 13 | | | |

Intervalos de confiança para os coeficientes estimados a 95%

| Parameter | Estimate | Standard Error | Lower Limit | Upper Limit |
|-----------|----------|----------------|-------------|-------------|
| CONSTANT | 4473,46 | 71,2254 | 4316,7 | 4630,2 |
| Ubs | -34,0764 | 2,31326 | -39,1679 | -28,98 |
| Ubs^2 | 0,103823 | 0,015998 | 0,0686118 | 0,13903 |

B) Material: Costaneiras

Parâmetros estimados

Dependent variable: PCI

| Parameter | Estimate | Standard Error | T Statistic | P-Value |
|-----------|----------|----------------|-------------|---------|
| CONSTANT | 4292,01 | 59,5118 | 72,1202 | 0,0000 |
| Ubs | -34,4697 | 1,89606 | -18,1797 | 0,0000 |
| Ubs^2 | 0,111166 | 0,0122435 | 9,0796 | 0,0000 |

Analysis of Variance

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|---------------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Model | 1,14195E7 | 2 | 5,70977E6 | 623,19 | 0,0000 |
| Residual | 100784,0 | 11 | 9162,15 | | |
| Total (Corr.) | 1,15203E7 | 13 | | | |

R-squared = 99,1252 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 98,9661 percent

Standard Error of Est. = 95,7191

Mean absolute error = 66,828

Durbin-Watson statistic = 2,17508 (P=0,1457)

Lag 1 residual autocorrelation = -0,155637

Análise de variância para as variáveis após o ajuste

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Val |
|--------|----------------|----|-------------|---------|-------|
| Ubs | 1,06642E7 | 1 | 1,06642E7 | 1163,94 | 0,0 |
| Ubs^2 | 755319,0 | 1 | 755319,0 | 82,44 | 0,0 |
| Model | 1,14195E7 | 2 | | | |

Analysis of Variance with Lack-of-Fit

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Val |
|---------------|----------------|----|-------------|---------|-------|
| Model | 1,14195E7 | 2 | 5,70977E6 | 623,19 | 0,00 |
| Residual | 100784,0 | 11 | 9162,15 | | |
| Lack-of-Fit | 100784,0 | 11 | 9162,15 | | |
| Pure Error | 0,0 | 0 | | | |
| Total (Corr.) | 1,15203E7 | 13 | | | |

Intervalos de confiança para os coeficientes estimados a 95%

| Parameter | Estimate | Standard Error | Lower Limit | Upper Lim |
|-----------|----------|----------------|-------------|-----------|
| CONSTANT | 4292,01 | 59,5118 | 4161,02 | 4422, |
| Ubs | -34,4697 | 1,89606 | -38,6429 | -30,29 |
| Ubs^2 | 0,111166 | 0,0122435 | 0,0842181 | 0,1381 |

C) Material: Pó de serra

Parâmetros estimados

 Dependent variable: PCI

| Parameter | Estimate | Standard Error | T Statistic | P-Value |
|-----------|----------|----------------|-------------|---------|
| CONSTANT | 4311,2 | 62,7076 | 68,7508 | 0,0000 |
| Ubs | -38,4919 | 4,16321 | -9,24571 | 0,0000 |
| Ubs^2 | 0,167262 | 0,058005 | 2,88358 | 0,0204 |

Analysis of Variance

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|---------------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Model | 3,9358E6 | 2 | 1,9679E6 | 278,88 | 0,0000 |
| Residual | 56452,3 | 8 | 7056,54 | | |
| Total (Corr.) | 3,99225E6 | 10 | | | |

R-squared = 98,586 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 98,2324 percent

Standard Error of Est. = 84,0032

Mean absolute error = 63,7691

Durbin-Watson statistic = 2,58572 (P=0,0247)

Lag 1 residual autocorrelation = -0,423209

Análise de variância para as variáveis após o ajuste

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|--------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Ubs | 3,87713E6 | 1 | 3,87713E6 | 549,44 | 0,0 |
| Ubs^2 | 58675,3 | 1 | 58675,3 | 8,32 | 0,0 |
| Model | 3,9358E6 | 2 | | | |

Analysis of Variance with Lack-of-Fit

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|---------------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Model | 3,9358E6 | 2 | 1,9679E6 | 278,88 | 0,0000 |
| Residual | 56452,3 | 8 | 7056,54 | | |
| Lack-of-Fit | 56452,3 | 8 | 7056,54 | | |
| Pure Error | 0,0 | 0 | | | |
| Total (Corr.) | 3,99225E6 | 10 | | | |

Intervalos de confiança para os coeficientes estimados a 95%

| Parameter | Estimate | Standard Error | Lower Limit | Upper Limit |
|-----------|----------|----------------|-------------|-------------|
| CONSTANT | 4311,2 | 62,7076 | 4166,6 | 4455,8 |
| Ubs | -38,4919 | 4,16321 | -48,0923 | -28,8915 |
| Ubs^2 | 0,167262 | 0,058005 | 0,033502 | 0,301022 |

D) Material: Cepilho

Parâmetros estimados

Dependent variable: PCI

| Parameter | Estimate | Standard Error | T Statistic | P-Value |
|-----------|----------|----------------|-------------|---------|
| CONSTANT | 4521,29 | 90,2528 | 50,0958 | 0,0000 |
| Ubs | -45,579 | 6,28542 | -7,25154 | 0,0001 |
| Ubs^2 | 0,239161 | 0,0843822 | 2,83426 | 0,0220 |

Analysis of Variance

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|---------------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Model | 5,5057E6 | 2 | 2,75285E6 | 163,43 | 0,0000 |
| Residual | 134756,0 | 8 | 16844,5 | | |
| Total (Corr.) | 5,64045E6 | 10 | | | |

R-squared = 97,6109 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 97,0136 percent

Standard Error of Est. = 129,786

Mean absolute error = 84,8346

Durbin-Watson statistic = 1,78868 (P=0,1134)

Lag 1 residual autocorrelation = 0,0503586

Análise de variância para as variáveis após o ajuste

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|--------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Ubs | 5,37039E6 | 1 | 5,37039E6 | 318,82 | 0,0000 |
| Ubs^2 | 135313,0 | 1 | 135313,0 | 8,03 | 0,0220 |
| Model | 5,5057E6 | 2 | | | |

Analysis of Variance with Lack-of-Fit

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Val |
|---------------|----------------|----|-------------|---------|-------|
| Model | 5,5057E6 | 2 | 2,75285E6 | 163,43 | 0,00 |
| Residual | 134756,0 | 8 | 16844,5 | | |
| Lack-of-Fit | 134756,0 | 8 | 16844,5 | | |
| Pure Error | 0,0 | 0 | | | |
| Total (Corr.) | 5,64045E6 | 10 | | | |

Intervalos de confiança para os coeficientes estimados a 95%

| Parameter | Estimate | Standard Error | Lower Limit | Upper Lim |
|-----------|----------|----------------|-------------|-----------|
| CONSTANT | 4521,29 | 90,2528 | 4313,16 | 4729, |
| Ubs | -45,579 | 6,28542 | -60,0732 | -31,08 |
| Ubs^2 | 0,239161 | 0,0843822 | 0,0445752 | 0,4337 |

E) Material: Refilo

Parâmetros estimados

Dependent variable: PCI

| Parameter | Estimate | Standard Error | T Statistic | P-Value |
|-----------|-----------|----------------|-------------|---------|
| CONSTANT | 4192,91 | 37,7201 | 111,159 | 0,0000 |
| Ubs | -23,6145 | 2,20088 | -10,7296 | 0,0000 |
| Ubs^2 | -0,020008 | 0,0268648 | -0,744765 | 0,4777 |

Analysis of Variance

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|---------------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Model | 4,70519E6 | 2 | 2,35259E6 | 831,30 | 0,0000 |
| Residual | 22640,1 | 8 | 2830,01 | | |
| Total (Corr.) | 4,72783E6 | 10 | | | |

R-squared = 99,5211 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 99,4014 percent

Standard Error of Est. = 53,1978

Mean absolute error = 34,47

Durbin-Watson statistic = 3,42547 (P=0,0000)

Lag 1 residual autocorrelation = -0,720106

Análise de variância para as variáveis após o ajuste

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|--------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Ubs | 4,70362E6 | 1 | 4,70362E6 | 1662,05 | 0,0000 |
| Ubs^2 | 1569,73 | 1 | 1569,73 | 0,55 | 0,4650 |
| Model | 4,70519E6 | 2 | | | |

Analysis of Variance with Lack-of-Fit

| Source | Sum of Squares | Df | Mean Square | F-Ratio | P-Value |
|---------------|----------------|----|-------------|---------|---------|
| Model | 4,70519E6 | 2 | 2,35259E6 | 831,30 | 0,0000 |
| Residual | 22640,1 | 8 | 2830,01 | | |
| Lack-of-Fit | 22640,1 | 8 | 2830,01 | | |
| Pure Error | 0,0 | 0 | | | |
| Total (Corr.) | 4,72783E6 | 10 | | | |

Intervalos de confiança para os coeficientes estimados a 95%

| Parameter | Estimate | Standard Error | Lower Limit | Upper Limit |
|-----------|-----------|----------------|-------------|-------------|
| CONSTANT | 4192,91 | 37,7201 | 4105,92 | 4279,90 |
| Ubs | -23,6145 | 2,20088 | -28,6898 | -18,5392 |
| Ubs^2 | -0,020008 | 0,0268648 | -0,0819586 | 0,0419426 |