



UnB

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS

**QUANTIFICAÇÃO DE RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DE CINCO
ESPÉCIES COMERCIAIS AMAZÔNICAS E ANÁLISE DO POTENCIAL
ENERGÉTICO**

MAYARA PAULA OLIVEIRA MACHADO

ORIENTADOR
AILTON TEIXEIRA DO VALE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PUBLICAÇÃO: PPGEFL.DM – 247/2015

BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO - 2015

BRASÍLIA, DISTRITO FEDERAL

2015

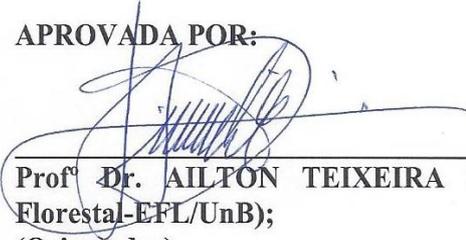
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

“QUANTIFICAÇÃO DE RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DE CINCO
ESPÉCIES COMERCIAIS AMAZÔNICAS E ANÁLISE DO POTENCIAL
ENERGÉTICO”

MAYARA PAULA OLIVEIRA MACHADO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



Prof^o Dr. AILTON TEIXEIRA DO VALE (Departamento de Engenharia
Florestal-EFL/UnB);
(Orientador)



Prof^o Dr. ALEXANDRE FLORIAN DA COSTA (Departamento de Engenharia
Florestal-EFL/UnB);
(Examinador Interno)



Prof^o Dr. RICARDO FAUSTINO TELES (Instituto Federal de Brasília - IFB);
(Examinador Externo)

Prof^o Dr. THIAGO OLIVEIRA RODRIGUES (Fundação de Tecnologia Florestal
e Geoprocessamento-FUNTEC/DF).
(Examinador Suplente)

Brasília-DF, 24 de fevereiro de 2015.

FICHA CATALOGRÁFICA

M149q	<p>Machado, Mayara Paula Oliveira.</p> <p>Quantificação de resíduos do processamento de cinco espécies comerciais amazônicas e análise do potencial energético / Mayara Paula Oliveira Machado. -- 2015. xi, 58 f. : il. ; 30 cm.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Pós-Graduação em Ciências Florestais, 2015.</p> <p>Inclui bibliografia.</p> <p>Orientação: Ailton Teixeira do Vale.</p> <p>1. Serrarias. 2. Biomassa florestal. 3. Resíduos vegetais. 4. Energia da biomassa. I. Vale, Ailton Teixeira do. II. Título.</p> <p>CDU 620.9</p>
-------	--

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MACHADO, M. P. O. (2015). Quantificação de resíduos do processamento de cinco espécies comerciais amazônicas e análise do potencial energético. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM – 247/2015, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 58p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Mayara Paula Oliveira Machado

TÍTULO: Quantificação de resíduos do processamento de cinco espécies comerciais amazônicas e análise do potencial energético.

GRAU: Mestre

ANO: 2015

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Mayara Paula Oliveira Machado

E-mail: mayara_paula@hotmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pelo dom da vida e oportunidade concedida.

Aos meus pais Ciro Neto e Fátima Adelaide pelos ensinamentos, por acreditar em mim e principalmente por me proporcionar um lar cheio de amor e respeito.

Aos meus queridos avós Ciro Machado e Maria pelo amor, excesso de cuidado e proteção, pela agradável companhia em cada entardecer com palavras de coragem acompanhadas de um café quente em uma varanda para assistir o pôr-do-sol.

Ao meu vovô Chico por todas as formas de carinho que recebi do senhor, que saudade in memoriam.

Ao meu irmão Ciro Paulo pela força e companheirismo. Aos meus tios Eurico, Ceila, Antônio e Antônia pelo apoio e amor. A Maitê e minha afilhada Maria Luísa por serem nosso sonho realizado. A minha prima Mírian por ser a irmã que escolhi ter.

Ao meu orientador Dr. Ailton Teixeira do Vale pelas valiosas contribuições, por sua dedicação, e amizade. Aprendi muito com o senhor, mais uma vez obrigada!

Aos funcionários, professores e colegas do Departamento de Engenharia Florestal do Programa de Pós-Graduação, em especial: ao Dr. Ildeu pela contribuição nas análises estatísticas, ao Dr Reginaldo, Bruna Bárbara, Jorge Breno, Nádia Viana, Chiquinho, Pedro.

Aos amigos do Laboratório de Produtos Florestais – LPF, em especial Dr. Patrick Rousset, Dr. Thiago Rodrigues, Ms Lucélia, Bruno, Ms Alessandro, Lula e Fátima muito obrigada pelo apoio.

Aos amigos que fiz na Fazenda Água Limpa – FAL em especial ao Ms Vandui.

Aos meus pais e avós, imensurável é o amor que sinto!

DEDICO.

RESUMO

QUANTIFICAÇÃO DE RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DE CINCO ESPÉCIES COMERCIAIS AMAZÔNICAS E ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO

Autor: Mayara Paula Oliveira Machado

Orientador: Ailton Teixeira do Vale

Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais

Brasília, mês de Fevereiro de (2015).

Este trabalho apresenta a análise da produção de resíduos em uma serraria de pequeno porte no município de Sena Madureira e teve por objetivos principais quantificar a biomassa seca e determinar o potencial energético dos resíduos gerados no processamento de cinco espécies comerciais amazônicas e como objetivo secundário caracterizar o resíduo quanto à sua qualidade energética. Como base metodológica, acompanhou-se o processamento de 73 toras: 16 toras da espécie *Cedrela odorata* L (cedro) em 12 horas; 20 toras da espécie *Couratari spp* (tauari) em 14 horas; 15 toras da espécie *Eschweilera grandiflora* (castanharana) em 8 horas; 12 toras da espécie *Apuleia molaris Spruce ex Benth* (garapa) coletadas em 12 horas e 10 toras da espécie *Clarisia racemosa* (guariúba) 4 horas, sendo quantificado o volume de tábuas produzidas e o volume de resíduos (serragem e pedaços). Para a determinação do volume de resíduos na forma de serragem, a espessura do fio de corte da serra de fita foi mensurada, determinando assim o volume antes mesmo que este fosse produzido. Foi retirada de casca-a-casca uma amostra de madeira para obtenção do teor de umidade e da densidade da tora na condição de pátio. Após a determinação da densidade e teor de umidade pátio as amostras foram divididas em duas partes: uma para determinação da densidade básica e outra após moagem e classificação para determinação do poder calorífico superior e análise imediata. Os resultados mostram que os resíduos gerados pelas espécies apresentaram boas qualidades para a geração de energia, com destaque para a castanharana. Mostram também que, pelo sistema de corte adotado 17,95% da massa seca do resíduo é gerada na forma de serragem e 82,05% na forma de pedaços. Quanto ao potencial energético as espécies apresentam densidades energéticas de 2,21 Gcal/m³ para o cedro; 2,99 Gcal/m³ para o tauari; 3,63 Gcal/m³ para a castanharana; 3,00 Gcal/m³ para a guariúba e 3,09Gcal/m³ para a garapa. A serraria mostra uma capacidade de produção de 744 kg/h de resíduos a 25% de umidade, em base seca, e, portanto, teria uma capacidade de gerar 0,38 MWh/hora, com a queima destes resíduos.

Palavras chave: Serraria, descarte, caracterização energética.

ABSTRACT

QUANTIFICATION OF PROCESSING WASTE OF FIVE AMAZON COMMERCIAL SPECIES AND ANALYSIS OF POTENTIAL ENERGY

Author: Mayara Paula Oliveira Machado

Supervisor: Ailton Teixeira do Vale

Postgraduate Programme in Forest Sciences

Brasília, month of February (2015).

This work presents the analysis of waste production in a small sawmill at Sena Madureira municipality and had the main objectives quantify the dry matter and determine the energy potential of waste generated in the processing of five Amazonian commercial species and as a secondary objective to characterize the residue on its energy quality. As a methodological basis, followed up the processing of 73 logs: 16 logs of the species *Cedrela odorata* L (cedro) in 12 hours; 20 logs of the species *Couratari spp* (tauari) in 14 hours; 15 logs of the species *Eschweilera grandiflora* (castanharana) in 8 hours; 12 logs of the species *Apuleia molaris Spruce ex Benth* (garapa) collected in 12 hours and 10 logs of the species *Clarisia racemosa* (guariúba) 4 hours, and quantified the volume of produced boards and the volume of waste (sawdust and piece). During processing of the logs were generated two types of waste: sawdust and pieces. To determine the volume of waste in the form of sawdust, the thickness of the cutting edge of the saw blade was measured, thereby determining the volume even before the latter was produced. Was taken from peace of a wood sample to obtain the moisture content and density of the log in the courtyard condition. After determining the density and moisture content courtyard samples were divided into two parts: one for determination of the density and other after grinding and classification to determine the gross calorific value and immediate analysis. The results show that the waste generated by species showed good qualities for power generation, especially the castanharana. They also show that by cutting system adopted 17.95% of the dry mass of waste is generated in the form of sawdust and 82.05% in the form of pieces. As for the energy potential species have energy densities of 2.21 Gcal /m³ for cedro; 2.99 Gcal/m³ for tauari; 3.63 Gcal/m³ for castanharana; 3.00 Gcal/m³ for guariúba and 3,09 Gcal/m³ for garapa. The sawmill shows a production capacity of 744 kg / h of waste 25% moisture on a dry basis, and therefore have an ability to produce 0,38 MWh/hour by burning these residues.

Palavras chave: Sawmill, discard, energy characterization.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Hipóteses	2
2 REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 Matriz energética brasileira	2
2.2 Aspectos gerais sobre biomassa	4
2.3 Resíduos	4
2.4 Resíduos florestais	5
2.5 Serraria	6
2.6 Rendimento volumétrico de serraria.....	7
2.7 Qualidade da biomassa	10
2.7.1 Densidade	10
2.8.2 Teor de umidade na madeira	11
2.7.3 Poder calorífico.....	12
2.7.4 Densidade energética.....	12
2.7.5 Análise imediata	14
2.8 Espécies estudadas	15
2.8.1 <i>Couratari spp.</i> – Tauari	15
2.8.2 <i>Cedrela odorata L</i> – Cedro	15
2.8.3 <i>Eschweilera grandiflora</i> – Castanharana	16
2.8.4 <i>Clarisia racemosa</i> – Guariuba	16
2.8.5 <i>Apuleia molaris Spruce ex Benth</i> – Garapa	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1 A serraria.....	18
3.2 Coleta de dados em laboratório.....	26
3.3 Análise estatística	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1 Características do processamento.....	29
4.2 Características energéticas das espécies.....	36
4.3 Potencial energético da serraria.....	40
5 CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
APÊNDICES.....	53

A – ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	54
--------------------------------	----

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Espécies coletadas, número de toras de cada espécie e o tempo de coleta...	20
Tabela 4.1. Características dimensionais das toras, produção volumétrica e em massa no processamento das cinco espécies.....	31
Tabela 4.2. Valores de “F” para rendimento volumétrico (Rv), diâmetro das toras (D), comprimento das toras (C) e teor de umidade (Tu).....	33
Tabela 4.3. Valores de “F” para volume da tora (Vt), volume de peças comerciais produzidas (Vpp), volume de serragem (Vs), volume de pedaços (resíduos) (Vped), e volume total de resíduos (Vtotal).....	33
Tabela 4.4. Valores de “F” para massa seca das toras (Mst), massa seca de pedaços produzidos (Msp), massa seca de serragem (Mss), massa seca de pedaços (Msped) e massa seca total de resíduos (Mstotal).....	34
Tabela 4.5. Teste de Tukey para as variáveis rendimento volumétrico (Rv), teor de umidade (Tu), volume de serragem (Vs), volume de pedaços (Vped), volume total de resíduos (Vtotal), massa seca das toras (Mst), massa seca de peças produzidas (Msp) e massa seca de serragem (Mss).....	34
Tabela 4.6. Características energéticas das cinco espécies.....	37
Tabela 4.7. Valores de “F” para densidade básica (Db), poder calorífico superior (PCS), poder calorífico útil (PCU) e densidade energética (De).....	38
Tabela 4.8. Valores de “F” para material volátil (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF).....	38
Tabela 4.9. Teste de Tukey para as médias densidade básica (Db), densidade energética (De), poder calorífico superior (PCS), poder calorífico útil (PCU), teor de material volátil (MV), teor de cinzas (CZ) e carbono fixo (CF).....	39
Tabela 4.10. Potencial energético da serraria com a produção de resíduos do processamento das 5 espécies.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Fontes de energias primárias consumidas no Brasil em 2012.....	3
Figura 2.2. Evolução da oferta interna de energia.....	3
Figura 2.3. Tora da espécie de cedro (A); Tora da espécie de tauari (B); Tora da espécie de guariúba (C); Tora da espécie de garapa.....	17
Figura 3.1. Layout da serraria.....	18
Figura 3.2. Máquina principal da serraria - Serra-de-fita vertical simples (A, B); Serra-circular simples responsável pelo canteamento das peças (C, D); Destopadeira responsável pelo destopamento das peças (E, F).....	19
Figura 3.3. Modelo de corte adotado pela serraria.....	20
Figura 3.4. Coleta de amostra casca-a-casca da tábua oriunda da tora para obter a densidade aparente e o teor de umidade na condição pátio de cada tora.....	21
Figura 3.5. Esquema para determinação do volume de serragem em uma tora mostrando a espessura do fio-de-corte da serra-de-fita.....	22
Figura 3.6. Saturação das amostras para obter o teor de umidade máximo das amostras (A). Pesagem das amostras para controle (B). Secagem das amostras em estufa para obter a massa seca (C).....	27
Figura 3.7. Pesagem dos cadinhos para determinação do teor de materiais voláteis (A); Cadinhos na mufla a temperatura de 700°C para determinação do teor de cinzas; Pesagem da amostra para ensaio de poder calorífico (C); Calorímetro PARR modelo 1341 (D).....	28

1 INTRODUÇÃO

Na região Amazônica em 2009, 2.226 empresas madeireiras consumiram 14,2 milhões de metros cúbicos de toras e produziram 5,8 milhões de metros cúbicos de madeira processada, com 72% dessa madeira processada basicamente em nível primário, o que resulta em um produto de baixo valor agregado. (HUMMEL *et al.*, 2010). Embora a Amazônia seja a principal produtora de madeira tropical do mundo, as serrarias com baixo padrão tecnológico formam o tipo de empresa predominante.

A utilização desse potencial madeireiro amazônico sempre foi direcionada no sentido de se explorar aquelas espécies que já tinham demanda no mercado, porém ao atuarem em um mercado cada vez mais complexo e competitivo, a alternativa para os gestores das indústrias madeireiras foi priorizar a adoção de iniciativas de valoração da economia florestal como o manejo florestal. Com isso a exploração convencional das florestas foi substituída pela exploração de impacto reduzido e o comércio de espécies tradicionais pelo comércio de mais de 40 espécies.

Apesar da prática do manejo florestal o setor de um modo geral ainda enfrenta dificuldades para tornar seu produto competitivo no mercado devido à falta de capital e investimentos, o uso de maquinários obsoletos no processamento da madeira e o pouco conhecimento das espécies resultando em grande geração de resíduos. A melhoria do nível tecnológico dos maquinários classifica-se como condição primordial para melhorar o aproveitamento de uma serraria e está intimamente relacionada à conservação dos recursos florestais, provando que, a indústria que não tiver preocupada em melhorar seus rendimentos assume risco de paralisar suas atividades e consequentemente não sobreviver.

Atualmente no estado do Acre, 95% da madeira explorada é oriunda de planos de manejo florestal. Parte dos resíduos provenientes do processamento de madeira está sendo aproveitada para queima em caldeiras e fornos artesanais para a fabricação de tijolos em olarias, mas ainda em quantidade pequena, ficando esses resíduos sem uso em sua totalidade (OGUNBODE *et al.*, 2013).

A energia produzida a partir dos resíduos de madeira apresenta inúmeras vantagens do ponto de vista ambiental como redução dos impactos ambientais provocados pela queima e descarte, geração de postos de trabalho em mini usinas e em unidades de transformação dos resíduos, inovações tecnológicas e possibilidade de expansão da capacidade produtiva. Neste sentido Omer (2010) afirma que, para atender a crescente demanda por energia o aproveitamento de resíduos para fins energéticos apresenta-se como a melhor solução.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivos principais, quantificar a biomassa seca e determinar o potencial energético dos resíduos gerados no processamento de cinco espécies comerciais amazônicas em uma serraria de pequeno porte do Estado do Acre e como objetivo secundário caracterizar o resíduo quanto à sua qualidade energética.

1.2 Hipóteses

Os resíduos produzidos pela serraria têm potencial para serem utilizados para geração de energia elétrica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Matriz energética brasileira

No Brasil, com base no balanço energético nacional, os tipos de biomassa mais utilizadas para a geração de energia térmica são: a lenha e os produtos da cana-de-açúcar, principalmente o bagaço de cana, conforme Figura 2.1 (BEN, 2013).

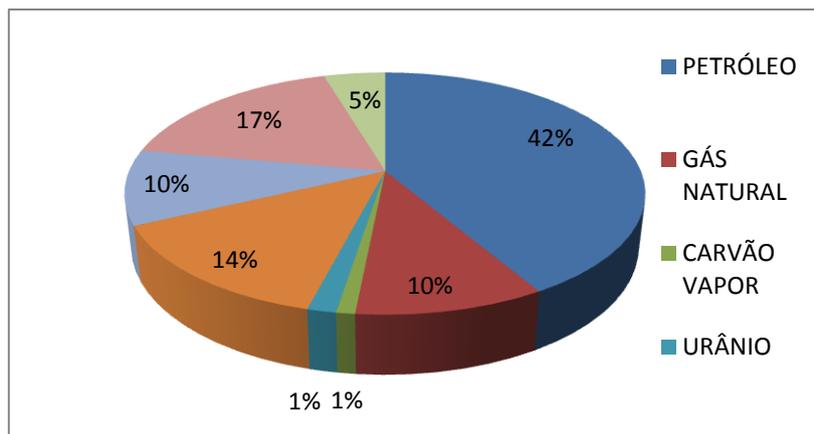


Figura 2.1. Fontes de energias primárias consumidas no Brasil em 2012.

O Brasil apresenta uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável, com 85% originada de fontes renováveis, sendo a energia hidráulica a que mais se destaca (TOLMASQUIN, 2012).

O Plano Decenal da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) prevê que a capacidade instalada no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN) deve evoluir de cerca de 110 gigawatt (dezembro de 2010) para 171 gigawatt (dezembro de 2020), com a priorização das fontes renováveis (hidráulica, eólica e biomassa). Se, por um lado, a participação das hidrelétricas cair, a participação da geração oriunda de fontes alternativas, como a de usinas eólicas, de térmicas à biomassa e de PCH (Pequenas Centrais Hidrelétricas), vai dobrar em dez anos, conforme Figura 2.2 (TOLMASQUIN, 2012).

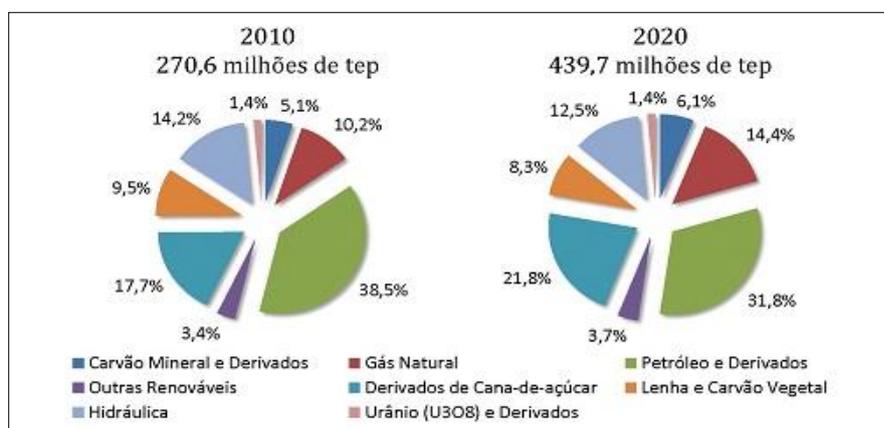


Figura 2.2. Evolução da oferta interna de energia.

2.2 Aspectos gerais sobre biomassa

Biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizado para a geração de energia (YOKOYAMA e MATSUMURA, 2008).

Segundo Genovese *et al.* (2006), entre os diversos tipos de biomassa que podem ser usadas como combustíveis, se destacam no Brasil: lenha, serragem, cavacos e o bagaço de cana que também é muito empregado, devido à grande produção brasileira de açúcar e álcool. A forma mais comum de utilização da biomassa é através da queima direta para produzir energia térmica, vapor e energia elétrica. Outra forma de utilização é através da conversão da biomassa para produção de combustíveis, como por exemplo, a gaseificação.

Uma importante fonte de biomassa para energia são os resíduos provenientes das indústrias de base florestal. Esses resíduos são constituídos por todo aquele material que é deixado para trás na coleta da madeira, tanto em florestas e bosques naturais como em reflorestamento, e pela serragem e aparas produzidas na indústria no processamento da madeira. (CORTEZ *et al.*, 2008).

2.3 Resíduos

A principal fonte para gerar energia da biomassa está nos resíduos, sendo estes caracterizados como: resíduos vegetais e florestais, resíduos agrícolas, resíduos urbanos e industriais e resíduos animais. Houve muitas tentativas para estimar a produção e o uso dos resíduos globais, mas todas apresentaram muitas variações, pela existência dos diferentes usos alternativos e também pela necessidade de se determinar o que é e o que não é um resíduo reutilizável para obtenção de energia (CORTEZ *et al.*, 2008).

A energia presente na biomassa pode ser transformada (através de processos de conversão físicos, químicos e biológicos) em combustíveis líquidos, sólidos e gasosos. O objetivo desta conversão é transformar um material carbonáceo de baixa eficiência energética para uma eficiência economicamente viável (AÇMA, 2003).

Werther *et al.* (2000) afirmam que, biomassa com potencial energético incluem resíduos agrícolas como: palha, bagaço de cana, casca de café, casca de arroz, entre outros e resíduos da floresta tais como lascas de madeira, serragem e casca.

2.4 Resíduos florestais

Os produtos oriundos da indústria de base florestal são os mais variados, podendo ser divididos em oito cadeias produtivas principais: chapas e compensados; óleos e resinas; fármacos; cosméticos; alimentos; carvão, lenha e energia; papel e celulose; madeira e móveis (SBS, 2007).

A geração de resíduos é consequência do processamento primário ou secundário da madeira sólida, independente do tipo de serraria. Segundo Fontes (1994), de acordo com suas características morfológicas, os resíduos dessas indústrias são classificados como: cavacos - partículas com dimensões máximas de 50 × 20 mm, em geral provenientes do uso de picadores; maravalhas - resíduo com menos de 2,5 mm; serragem - partículas de madeira com dimensões entre 0,5 e 2,5 mm, provenientes do uso de serras; pó - resíduos menores que 0,5 mm; lenha - resíduos de maiores dimensões, compostos por costaneiras, aparas e resíduo de topo de tora.

Em trabalho realizado por Brand *et al.* (2002), foram avaliados os consumos de energia elétrica e térmica em uma indústria de base florestal composta por três unidades, indústria de compensado, de painéis e uma serraria e concluíram que a serraria foi o setor que mais consumiu energia térmica e elétrica. Silva (2011) mostrou a importância do aproveitamento de resíduos das indústrias madeireiras para a geração de energia elétrica, em um estudo de caso da Empresa B K Energia Itacoatiara no Estado do Amazonas. Os resíduos produzidos em serrarias, quando queimados, geram energia térmica, que pode ser transformada em energia elétrica e assim substituir a energia comprada (DOWAKI e MORI, 2005).

Araújo (2003) afirma que, o aproveitamento de resíduos por parte das serrarias apresenta importantes vantagens, como a redução dos custos de produção; redução dos impactos ambientais provocados pela queima e pelo descarte dos resíduos (destinos dos

mais correntes); geração de postos de trabalho; inovações tecnológicas da indústria; e possibilidade de expansão da capacidade produtiva pelo aumento da oferta de energia.

2.5 Serraria

Denomina-se serraria, o local onde toras são armazenadas e processadas em madeira serrada, sendo posteriormente estocadas por um determinado período para secagem (ROCHA, 1999). A primeira serra alimentada por motor movido a corrente elétrica surgiu em 1896 e, assim, as serrarias passaram a ser construções de grande porte, podendo ser construídas, independentes das rodas d'águas, longe dos rios (LATORRACA, 2004). Com base na produção, as serrarias podem ser classificadas em pequenas com até 50 m³ de toras/dia, médias com 50 a 100 m³ de toras/dia e grandes com produção acima de 100 m³ de toras/dia (VITAL, 2008).

Na etapa inicial de transformação da matéria-prima na serraria, as toras ainda são corpos cilíndricos em seguida são convertidas em produtos de madeira, mediante a aplicação de um ou mais processos mecânicos que as transformam em peças de dimensões menores (GATTO, 2002). As máquinas e equipamentos utilizados no desdobro principal são serras de quadro ou alternativas; serras circulares; serras de fita e carro porta toras. A utilização desses equipamentos é capaz de gerar produtos e subprodutos, tais como: semiblocos, blocos, pranchões, tábuas, costaneiras, serragem e cavacos (ROCHA, 2002).

As serrarias, frequentemente são indústrias isoladas, com pequeno capital e manejo inadequado, além de empregarem equipamento de mal estado, e obsoleto. Devido ao baixo estado de conservação dos equipamentos de produção, a maioria das serrarias tornam-se ineficientes e antieconômicas e geram uma grande quantidade de resíduos (VITAL, 2008).

Na região Amazônica, em 2009, 2.226 empresas madeireiras consumiram 14,2 milhões de metros cúbicos de toras e produziram 5,8 milhões de metros cúbicos (m³) de madeira processada, com 72% deste total proveniente de madeira serrada de baixo valor agregado (HUMMEL *et al.*, 2010).

2.6 Rendimento volumétrico de serraria

Ese-Etame (2006) defende que, mudanças no mercado, aumento na concorrência e no custo da matéria-prima são fatores que vem pressionando as serrarias de madeira para se tornarem mais eficientes e com isso maximizar o volume de madeira serrada o que possibilita obter aumento na receita.

O desempenho de uma serraria, também chamado de rendimento volumétrico, coeficiente de serragem ou coeficiente de transformação consiste no cálculo da relação entre o volume de peças comercializáveis produzidas e o volume de toras processadas. Com o cálculo do rendimento, obtêm-se as seguintes informações: volume e quantidade de toras para a produção, equipamentos necessários, estoque a ser disponibilizado, projeções futuras (custos, ampliações e investimentos), bem como alteração dos métodos, sistemas utilizados que otimizem a produção e a porcentagem de perdas de matéria prima (SILVA, 2010).

Para Rocha (2002), o rendimento em madeira serrada é influenciado pelas técnicas de desdobro, pelas máquinas utilizadas e até pelo nível de treinamento e as decisões dos operadores. De acordo com Néri *et al.* (2005), diversas técnicas são apresentadas por vários pesquisadores visando o aumento do rendimento da madeira serrada. Enumeram-se vários parâmetros, tais como: a seleção de toras por classes diamétricas, tratamento otimizado de toras, aplicativos computacionais de otimização no sistema de desdobro, feixes de laser para refilo e adequação do layout da serraria.

Em serrarias modernas localizadas no Canadá, Estados Unidos, Alemanha e Finlândia, o rendimento volumétrico pode chegar até 80%, sendo esse alto rendimento explicado pelo uso de madeira de alta qualidade, equipamentos modernos e mão-de-obra treinada (MARCHESAN, 2012). No Brasil, em geral o rendimento de uma serraria fica entre 55% e 65% para madeira de coníferas e 45 e 55%, para madeira de folhosas nativas. Essa diferença de amplitude deve-se ao fato de as coníferas terem tronco mais cilíndrico, com menos defeitos, o alburno ser sempre utilizável (GOMIDE, 1977; VITAL, 2008).

Rocha (2000), encontrou um rendimento médio de serragem para *Eucalyptus grandis* de 45,71% e para *Eucalyptus dunnii* de 41,26%. Para tal, foi adotado corte tangencial nas toras utilizando dois picadores perfiladores e uma serra circular múltipla de dois eixos, onde no primeiro picador eram retiradas duas costaneiras, sendo a tora transformada em um semibloco e no segundo picador perfilador eram retiradas as duas costaneiras restantes, obtendo-se finalmente um bloco. Logo após, o bloco passou em uma serra circular múltipla para obter tábuas de alta qualidade.

Em estudo realizado por Junior *et al.* (2005), em uma serraria de pequeno porte no município de São Bento do Sul – SC, 100 toras da espécie *Pinus taeda* foram processadas utilizando serra-de-fita para o desdobro principal. Para tal foram utilizados dois métodos de desdobro: desdobro convencional onde as toras eram classificadas aleatoriamente, sem nenhuma classificação diamétrica e desdobro otimizado onde as toras eram separadas por classe diamétrica e para cada classe foi definido um diagrama de corte específico. Os rendimentos volumétricos médios encontrados foram: 44,21% para desdobro convencional e 53,60% para desdobro otimizado.

Junior *et al.* (2012) em trabalho produzido em uma serraria convencional onde no desdobro principal de 37 toras de *Pinus taeda* foi utilizado serra-de-fita, encontraram um rendimento médio de 57%. Manhiça (2010), em desdobro de 80 toras também da espécie *Pinus taeda* processadas em uma serraria de pequeno porte no município de Campina Grande - PR encontrou um rendimento médio de 52%.

Anjos (2013), trabalhando com três espécies do gênero *Eucalyptus* coletadas no município de Telêmaco Borba - PR dividiu as classes diamétricas destas em toras finas, medias e grossas. De uma maneira geral, as toras mais grossas, independente da espécie apresentaram-se com maior rendimento, e para o desdobro destas utilizou-se como engenho principal uma serra-de-fita vertical simples, duas serras horizontais, uma serra circular e uma mesa destopadeira. O rendimento volumétrico médio encontrado por espécie foi: 42,35% para *Eucalyptus dunnii*, 48,29% para *Eucalyptus saligna* e 44,49% para *Eucalyptus grandis*.

Para a região Amazônica Oliveira *et al.* (2003) verificaram o rendimento de 59,95% para *Tabebuia sp* (ipê) em três serrarias convencionais com serras-de-fitas para

o desdobro no município de Jaru – RO. Segundo os autores, pode-se atribuir os altos índices de rendimento obtidos pela seleção das toras quanto a qualidade e diâmetro. Biasi e Rocha (2007), no município de Sinop – MT, selecionaram três espécies de importância econômica na região Amazônica: *Erismia uncinatum* (cedrinho), *Qualea albiflora* (cambará) e *Mezilaurus itauba* (itaúba). Os rendimentos volumétricos médios encontrados para cedrinho, cambará e itaúba foram respectivamente: 59,83%, 62,63% e 53,90%.

Cavallet *et al.* (2010) em trabalho com desdobro utilizando serra-de-fita semi-automática realizado no município de Guarantã do Norte – MS, encontrou um rendimento médio de 35,18%, para *Hymenaea courbaril* (jatobá). Marchesan (2012) verificou valores baixos de rendimento por espécie, a saber: 33,99% para *Astronium lecointei* Ducke (muiracatiara); 29,22% para *Brosimum rubescens* Taub (muirapiranga) e 26,44% para *Hymenaea courbaril* (jatobá), justificando estes valores pela presença de brocas e rachaduras nas toras utilizadas neste trabalho.

Garcia *et al.* (2012) em estudo de rendimento do processamento primário com 3 toras por espécie no município de Novo Mundo – MT encontraram rendimento médio obtidos de 46,39% para *Couratari guianensis* (tauari) e 49,64% para *Mezilaurus itauba* (itaúba). Piovesan *et al.* (2013) selecionaram de forma aleatória 15 toras de *Handroanthus sp.* (ipê) no município de Uruará – Pará, considerando 3 classes diamétricas. O volume total de toras de ipê utilizado foi de 27,58 m³, que após o desdobro resultou em um volume total em madeira serrada de 13,67 m³, totalizando um rendimento de serragem de 49,56%.

Garcia (2013) no município de Alta Floresta – MT analisou 895 toras da espécie *Qualea albiflora* Warm (cambará), sendo que a seleção das toras não seguiu um padrão de escolha e o rendimento médio obtido através de desdobro primário foi avaliado ao final de cada dia de produção da serraria. O volume total das toras foi igual a 782,60 m³ e dos vigamentos foi igual a 382,70 m³, resultando em um rendimento médio igual a 48,90% coletados durante 23 dias.

Em resumo, tanto o rendimento em madeira serrada quanto a eficiência de uma serraria são afetados pela qualidade das toras, que também influencia na qualidade da

madeira serrada (VITAL, 2008). A deficiência tecnológica das serrarias aliada ao pouco conhecimento das espécies caracteriza-se como um dos maiores problemas encontrados pela indústria de madeira resultando em um aumento do custo do produto final e uma geração excessiva de resíduos, caracterizando o estudo das propriedades físicas e tecnológicas da madeira essencial para determinar a potencialidade de um combustível e avaliar se o mesmo está sendo utilizado dentro de sua plena capacidade (BIASI e ROCHA, 2007).

Desta maneira, características como a densidade, teor de umidade, poder calorífico e análise imediata apresentam-se como propriedades importantes da madeira para sua utilização como combustível (BRITO e BARRICHELO, 1978).

2.7 Qualidade da biomassa

2.7.1 Densidade

A densidade da madeira é uma característica complexa resultante da combinação de diversos fatores. Esta, apresenta relação com as dimensões das fibras, particularmente espessura da parede, volume dos vasos e parênquimas, proporção entre lenho primaveril e outonal, e arranjo dos elementos anatômicos. A densidade básica pode ser determinada pela razão entre a massa seca e o volume saturado da madeira ou pelo método de máximo teor de umidade, em pequenas amostras (FOELKEL *et al.*, 1971; BOWYER *et al.*, 2003).

A densidade básica tem-se mostrado um bom índice universal para avaliar a qualidade da madeira (FOELKEL *et al.*, 1990), sendo esta propriedade a que mais fornece informações sobre as demais características das madeiras, como por exemplo o seu uso (GARCIA, 1995; MOURA e FIGUEIREDO, 2002).

Queiroz *et al.* (2004), determinaram a densidade básica através da técnica do máximo teor de umidade de cavacos de madeira de dois clones híbridos de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. As densidades encontradas para os cavacos foram: 555,00 kg/m³ e 450,00 kg/m³ respectivamente.

Em estudo realizado por Vale *et al.* (2010) determinaram-se as propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. Os resultados médios encontrados por espécie para densidade básica foram: *Pterodon pubescens* – 820,00 kg/m³; *Dalbergia miscolobium* – 800,00 kg/m³; *Scelerolobium paniculatum* – 780,00 kg/m³; *Stryphnodendron adstringens* – 610,00 kg/m³ e *Vochysia thyrsoidea* – 580,00 kg/m³.

Silveira *et al.* (2013), determinaram o teor de umidade e densidade básica de nove espécies da floresta amazônica coletadas no município de Itacoatiara – AM. Para cada espécie foram retiradas amostras em quatro posições: tronco na base, tronco no topo, galhos grossos diâmetro maior e galhos finos. Em resumo, as densidades do tronco foram maiores que as densidades dos galhos, podendo ser explicada pela maior proporção de lenho jovem nos galhos.

2.8.2 Teor de umidade na madeira

De acordo com Oliveira *et al.* (2005), a determinação do teor de umidade e de sua variação na madeira é de relevante importância no seu desempenho e utilização. Os elevados gradientes de umidade da madeira constituem-se em uma das causas de defeitos de secagem e empenamentos na madeira. Segundo Cunha *et al.* (1989), quanto maior o conteúdo de umidade da madeira, menor é o seu poder de combustão, devido ao processo de evaporação da umidade, o qual absorve energia em combustão.

A resistência da madeira varia com seu teor de umidade, por consequência com o aumento do teor de umidade observa-se uma diminuição desta resistência na madeira (LOGSDON e JUNIOR, 2002).

Santos *et al.* (2003) utilizaram 20 tábuas da espécie *Eucalyptus grandis* coletadas ao acaso. As amostras foram distribuídas em um secador a fim de acompanhar a perda de massa através de pesagens periódicas. Inicialmente as amostras de *Eucalyptus grandis* tinham um teor de umidade de 51%, em 72 horas de secagem 29% e por fim em 216 horas 18% de umidade. Os resultados obtidos mostram o comportamento característico da madeira, com a taxa de secagem decrescendo com o tempo, à medida que diminui o teor de umidade. Em estudo realizado por Quirino *et al.* (2005) utilizando

resíduos lignocelulósicos, foi encontrado teor de umidade médio para as sete espécies de 17,59%.

2.7.3 Poder calorífico

De acordo com Corder (1973), o poder calorífico é a propriedade mais importante de um combustível, por representar a quantidade de calor liberado durante a queima de uma determinada quantidade de combustível sendo expresso em caloria por grama ou quilocaloria por quilograma.

O poder calorífico é subdividido em superior, inferior e útil. No poder calorífico superior (PCS) a água é formada durante a combustão, na reação entre o hidrogênio e oxigênio da madeira, é condensada e seu calor latente é recuperado e somado à energia mensurada. Em termos práticos o poder calorífico superior é o mais utilizado nas pesquisas pois mostra o máximo potencial energético fornecido pelo combustível. Já no poder calorífico inferior (PCI) o calor de condensação da água não é considerado pois o mesmo é perdido na forma de vapor (CORDER, 1973). O poder calorífico útil (PCU) é a quantidade de calor liberado pela queima, com a água presente em seu estado gasoso, sendo descontada a energia necessária para evaporar a água referente à umidade da madeira (LIMA, 2010).

Vale *et al.* (2002) em estudo realizado com 47 espécies do cerrado encontrou um poder calorífico superior que variou de 4516,00 kcal/kg para *Blepharocalix salicifoliusa* 4989,00 kcal/kg para *Acosmium dasycarpum*. Quirino *et al.* (2005) indicaram valores de poder calorífico superior variando entre 3350,00 kcal/kg a 5260,00 kcal/kg para mais de cem espécies brasileiras, podendo destacar para as espécies amazônicas como *Dypteryx odorata*, *Cedrela odorata* e *Clarisia racemosa* um poder calorífico superior médio de 4754,00 kcal/kg.

2.7.4 Densidade energética

A densidade energética é a quantidade de energia por unidade de volume de um combustível sendo que para utilização energética dos combustíveis de biomassa, é

desejável alta densidade energética, ou seja, a maior quantidade de energia por unidade de volume (GARCIA *et al.*, 2012; PROTÁSIO *et al.*, 2012).

Brito *et al.* (1983), trabalhando com 9 indivíduos de *Eucalyptus* cortados aos 10 anos de idade encontraram 2,41 Gcal/m³ de densidade energética para *Eucalyptus pilularis*, 1,87 Gcal/m³ para *Eucalyptus grandis* e 2,32 Gcal/m³ para *Eucalyptus saligna*. Lima *et al.*, (2011), encontraram para 91 indivíduos de *Eucalyptus benthamii* uma densidade energética média de 2,30 Gcal/m³.

Protásio *et al.* (2014), calcularam duas densidades energéticas DE1 (utilizando o poder calorífico superior) e DE2 (utilizando o poder calorífico inferior) para dois clones comerciais de *Eucalyptus spp.* com 49 e 61 meses respectivamente. Os valores encontrados para DE1 foram: 2,26 Gcal/m³ e 1,96 Gcal/m³; para DE2: 2,09 Gcal/m³ e 1,81 Gcal/m³. O valor de DE2 foi inferior ao DE1 pois para a determinação de DE2 foi utilizado o poder calorífico inferior o que diminuiu o valor da densidade energética encontrada.

Pinheiro *et al.* (2005) em estudo realizado com 32 amostras de resíduos vegetais entre os quais casca da castanha e fibra de dendê encontraram uma densidade energética que variou de 0,60 Gcal/m³ a 2,00 Gcal/m³. Para tal, utilizaram o poder calorífico inferior (PCI) e densidade a granel das amostras. Vale *et al.* (2013) em trabalho com resíduos do milho encontraram uma densidade energética de: 1,00 Gcal/m³ para sabugo, 1,42 Gcal/m³ para palha, 0,87 Gcal/m³ para folha e 0,57 Gcal/m³ para o caule.

Garcia *et al.* (2012), analisaram cinco procedências de pellets de madeira de três estados brasileiros: dois de São Paulo, dois do Paraná e um de Santa Catarina. A densidade energética encontrada foi de 2,66 Gcal/m³ e também foi obtida através do produto do poder calorífico inferior (PCI) com a densidade a granel das amostras. Protásio *et al.* (2012), encontraram para briquetes produzidos com resíduos do processamento dos grãos de café, utilizando o poder calorífico superior (PCS) e densidade aparente, uma densidade energética média de 5,18 Gcal/m³.

Protásio *et al.* (2013), selecionando 7 clones do gênero *Eucalyptus* para a produção de energia e/ou carvão vegetal encontraram valores médios de densidade

energética de 2,50 Gcal/m³ para três clones de *Eucalyptus urophylla* e 2,30 Gcal/m³ para quatro clones de *Eucalyptus grandis*. A espécie *Eucalyptus urophylla* se destacou por apresentar maior densidade energética, fato este justificado pelo maior valor de densidade básica desta.

Moutinho *et al.* (2011), encontraram para as espécies florestais *Eschweilera ovata* e *E. amazônica* conhecidas como mata-matá, coletadas na região de Paragominas – AM, uma densidade energética de 4,19 Gcal/m³ e 4,30 Gcal/m³ respectivamente. Santos e Oliveira (2014) em trabalho realizado com espécie amazônica obtiveram uma densidade energética de 1,86 Gcal/m³ para *Schizolobium amazonicum Huber ex Ducke* conhecida como paricá.

2.7.5 Análise imediata

A análise imediata de um combustível fornece a porcentagem do material que se queima no estado gasoso (material volátil) e no estado sólido (carbono fixo), bem como o percentual do material residual inorgânico (cinzas) (BRITO e BARRICHELO, 1978). Sendo assim, os voláteis apresentam um papel importante durante a ignição e as etapas iniciais de combustão de biomassa (CORTEZ, 2008).

As cinzas são substâncias inorgânicas que não entram em combustão e podem ser constituídas de silício (Si), potássio (K), sódio (Na), enxofre (S), cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg) e ferro (Fe) (KLAUTAU, 2008). Vale ressaltar que, quando a lenha é queimada, geralmente 75 a 80% são materiais voláteis, 20 a 24% são carbono fixo e 1 a 3%, cinzas (AROLA, 1976). Se houver cinzas em alta concentração o poder calorífico pode diminuir e causar perda de energia e sua presença afeta também a transferência de calor, o que pode interferir na logística operacional (MOERS *et al.*, 2011).

O carbono fixo é definido como a quantidade de carbono presente na biomassa, sendo considerado como a massa remanescente após a liberação dos voláteis (SANTOS, 2009; MOERS *et al.*, 2011).

Vale *et al.* (2002) observaram durante a queima de madeiras do cerrado que os teores médios da composição imediata foram: 77,91% para material volátil , 20,73%

para carbono fixo e um teor de cinzas variando de 0,15 a 2,73%. Barros *et al.* (2012) em estudo realizado com três espécies amazônicas: *Acacia mangium*, *Tachigali chrysophylla* e *Inga edulis* encontraram teores médios de: 79,04% para material volátil, 1,36% para teor de cinzas e 19,60% para teor de carbono fixo.

2.8 Espécies estudadas

As cinco espécies utilizadas para o estudo foram: *Couratari spp.* (tauari), *Cedrela odorata L* (cedro), *Eschweilera grandiflora* (castanharana), *Clarisia racemosa* (guariuba) e *Apuleia molaris Spruce ex Benth* (garapa). Essas espécies fazem parte do grupo de espécies da Amazônia que tem sido explorado para o consumo de madeira no mercado interno e externo também.

2.8.1 *Couratari spp.* – Tauari

Pertencente à família Lecythidaceae e conhecido como tauari, possui madeira de cerne e alburno indiferenciados quanto à cor, branco-palha, levemente rosado, textura média, superfície lisa conforme mostra Figura 2.3 e cheiro e gosto imperceptíveis. É macia ao corte, apresentando um bom acabamento e possui densidade básica de 540,00 kg/m³ podendo ser usada em painéis, compensados, embalagens, peças encurvadas e torneadas, móveis de uso geral e partes interiores na construção civil (JANKOWSKY, 1990).

2.8.2 *Cedrela odorata L* – Cedro

Pertencente à família Meliaceae e conhecido como cedro, cedro branco, cedro odoríferos, pântano de cedro, cedro rosa e cedro vermelho é comum na Mata Atlântica, na floresta amazônica e no interior das matas ciliares de todo o Brasil tropical (LORENZI, 1998). Fora do Brasil, é conhecido como cedro, cedro colorado, castillas cedro, dulce de cedro, cedro amargo, e "redceder" (LOUREIRO e SILVA 1968; MANIERI e CHIMELO 1989).

A madeira de cedro possui cerne variando do bege-rosado-escuro até o castanho-avermelhado e alburno branco e rosado; superfície lustrosa, com reflexos dourados;

cheiro característico, agradável; gosto ligeiramente amargo e textura grosseira, como mostra a Figura 2.3 (JANKOWSKY, 1990).

Apresenta densidade entre 430,00 – 510,00 kg/m³, sendo classificada como leve, macia e fácil de trabalhar (LORENZI, 1998). É bastante utilizado na construção civil e naval, bem como na fabricação de móveis finos e instrumentos musicais. O crescimento anual de camadas altamente visíveis torna fácil a determinação da idade, tornando as espécies de um grande potencial para estudos de dendrocronologia (DÜNISCH *et al.*, 2003).

2.8.3 *Eschweilera grandiflora* – Castanharana

Pertencente à família Lecythidaceae e conhecida como castanharana, mata-matá, mata-matá-branco, mourão-vermelho e ripeiro possui cerne róseo-pardacento-escuro, superfície lisa ao tato e brilho pouco acentuado e cheiro e gosto imperceptíveis. É de fácil trabalhabilidade, possui uma densidade básica de 750,00 kg/m³, sendo considerada uma madeira pesada e por isso possui propriedades mecânicas altas, podendo ser utilizada para construção civil em geral, construções externas como estruturas de pontes, postes, mourões, dormentes, cruzetas e estacas (JANKOWSKY, 1990).

2.8.4 *Clarisia racemosa* – Guariuba

Pertencente à família Moraceae e conhecida como guariúba, guariúba-amarela, oiticica e oiticica-amarela possui cerne de coloração amarelo-limão e o alburno é estreito como mostra Figura 2.3. Grã irregular a reversa, textura média, superfície brilhante e lisa ao tato com cheiro e gosto imperceptíveis. É de fácil trabalhabilidade, possui sílica e uma densidade básica de 530,00 kg/m³ podendo ser utilizada para acabamento interno em construção civil como esquadrias, caixilhos, lambris e forros; móveis, painéis, compensados, embalagens leves, tábuas em geral, vigamentos para construções temporárias, laterais de escadas extensíveis, etc (JANKOWSKY, 1990).

2.8.5 *Apuleia molaris Spruce ex Benth* – Garapa

Pertencente à família Leguminosae e conhecida como garapa, garapeira, amarelão, barajuba, grápia, maraúba, miratoá, cumaru-cetim e pau-cetim, possui cerne e albúrneo distintos com cerne variando do bege-amarelado ou amarelo levemente rosado, e albúrneo branco-amarelado, como mostra Figura 2.3. Grã irregular, superfície lustrosa e lisa ao tato. Caracterizada por uma madeira fácil de ser trabalhada e possui uma densidade básica de $700,00 \text{ kg/m}^3$. Quanto à secagem, é considerada difícil ao ar, com tendência a rachaduras e empenamentos. A madeira de garapa é indicada para construção de estruturas externas, dormentes, postes estacas, mourões, carrocerias; em construção civil, como vigas, caibras, ripas, tábuas e tacos para assoalhos; marcos de portas e janelas (JANKOWSKY, 1990).



Figura 2.3. Tora da espécie de cedro (A); Tora da espécie de tauari (B); Tora da espécie de guariúba (C); Tora da espécie de garapa.

Fonte: Souza *et al.* (1997).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 A serraria

A coleta de dados foi realizada na serraria Acre Verde Industrial Ltda. localizada no município de Sena Madureira – AC, classificada como de pequeno porte. É composta por uma serra-de-fita Langer, ano 1989, volante de 90 cm e motor 20 cv; com carro porta tora, de 3,0 m de comprimento, dotado de bitolador manual e quatro garras fixadas na tora; uma serra circular e uma serra destopadeira, ano 1989; e um setor de afiação de lâminas onde são realizados afiação da serra, solda da serra e a retirada de calos características indispensáveis para o bom da funcionamento da serraria (Figura 3.1 e Figura 3.2). Os produtos da serraria são: régua, lambri, caibro, longarina, taco, barrote, pranchado, peças para movelarias e construção civil.

A serraria trabalha com 100% de sua produção oriunda de Plano de Manejo florestal sustentável obedecendo a legislação florestal do estado, resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA e código florestal. O regime de trabalho desta é de 11 meses ao ano, 20 dias ao mês e 8 horas/dia. A manutenção dos equipamentos bem como a organização do pátio são realizados aos finais de semana, durando em média 5 horas.

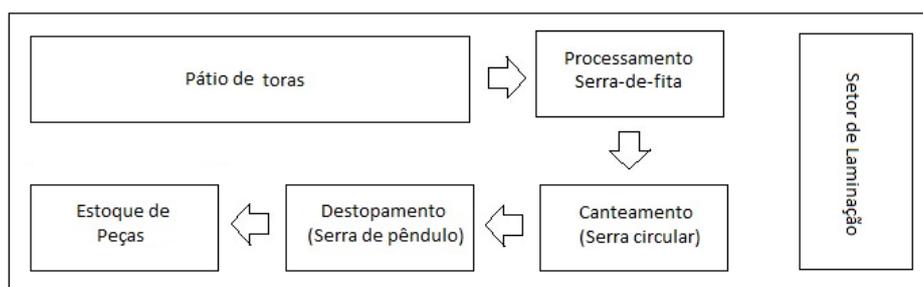


Figura 3.1. Layout da serraria.



Figura 3.2. Máquina principal da serraria - Serra-de-fita vertical simples (A, B); Serra-circular simples responsável pelo canteamento das peças (C, D); Destopadeira responsável pelo destopamento das peças (E, F).

As toras foram desdobradas utilizando o método de corte tangencial conforme Batista *et al.* (2013), como mostra a Figura 3.3.

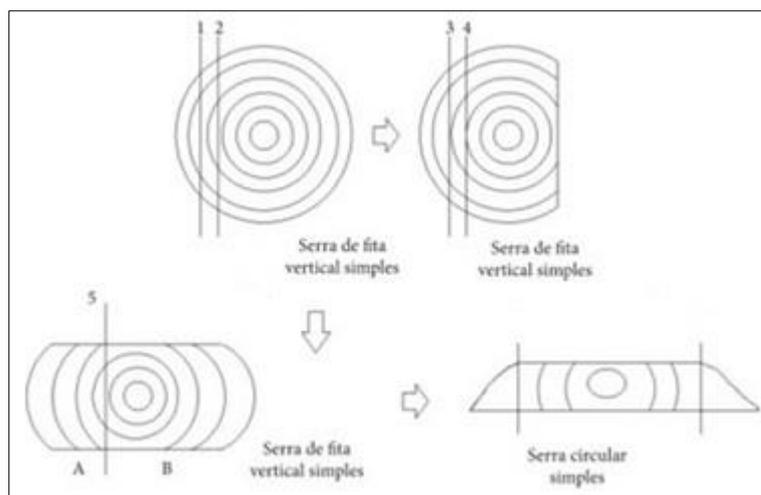


Figura 3.3. Modelo de corte adotado pela serraria.

3.1.1 Coleta de dados na serraria

Foram coletadas 5 espécies totalizando 73 toras em 56 horas, conforme Tabela 3.1. Todas as toras processadas no período de coleta de dados estavam sadias, com exceção do cedro com quatro toras apresentando brocas e rachaduras, que foram eliminadas.

Tabela 3.1. Espécies coletadas, número de toras de cada espécie e o tempo de coleta.

Espécie	Número de toras	Tempo de coleta (h)
<i>Cedrela odorata</i> L (cedro)	16	12
<i>Couratari spp</i> (tauari)	20	20
<i>Eschweilera grandiflora</i> (castanharana)	15	8
<i>Apuleia molaris Spruce ex Benth</i> (garapa)	12	12
<i>Clarisia racemosa</i> (guariúba)	10	4

As informações foram obtidas pelo plano de manejo executado, a partir do número da plaqueta que fornece o mapeamento e informações de cada tora. Com esses dados obteve-se o volume de cada tora calculado pela fórmula de volume do cilindro (Equação 1), e o volume de peças comerciais produzidas também foi quantificado

(Equação 2). Uma amostra de casca a casca foi retirada de uma tábua central, conforme Figura 3.4, para determinação do teor de umidade e da densidade aparente da tora na condição de umidade do pátio e pesada imediatamente para garantir fidelidade na determinação desta.

$$V_t = \left(\pi * \frac{(d)^2}{4} \right) * h \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde: V_t = volume de toras (m^3);

d = diâmetro médio da tora (cm);

h = comprimento da tora (m);

$$V_{pp} = C * L * E \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde: V_{pp} = volume de peças comerciais produzidas (m^3);

C = comprimento da tábua (m);

L = largura da tábua (cm);

E = espessura da tábua (mm)

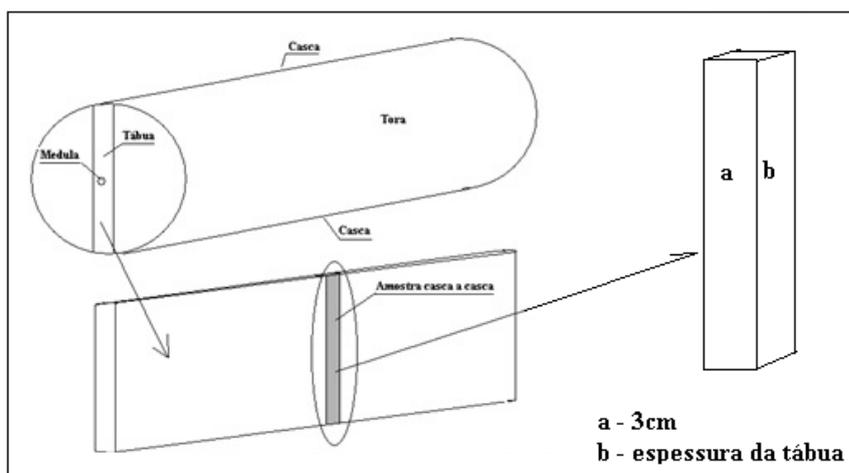


Figura 3.4. Coleta de amostra casca-a-casca da tábua oriunda da tora para obter a densidade aparente e o teor de umidade na condição pátio de cada tora.

O Rendimento volumétrico da serraria foi calculado para cada espécie, de acordo com a fórmula proposta por VITAL, (2008) (Equação 3).

$$R = \frac{V_t}{V_{pp}} * 100 \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde: R = rendimento volumétrico (%).

Vt = volume de toras (m³)

Vpp = volume de peças produzidas (m³).

O uso da densidade para estimar biomassa em povoamentos florestais foi utilizado por SILVEIRA *et al.*, (2007); RIBEIRO *et al.*, (2009) e LACERDA *et al.*, (2009). Neste trabalho utilizou-se o método considerando a densidade aparente da madeira no pátio para estimar a produção em massa de resíduos de serragem (pó-de-serra) e de pedaços (destopamento e canteamento).

O volume de serragem foi determinado com base no volume do fio de corte. Para a determinação deste volume foram considerados o comprimento e a largura da tábua e a espessura do fio de corte, determinado no momento do processamento da tora (Figura 3.5A e 3.5B), com auxílio de um paquímetro digital Caliper 150 mm.

A estimativa da massa residual de serragem (Equação 4) foi realizada a partir da densidade aparente da tora na condição de umidade do pátio e do volume do fio de corte da serra-de-fita com base na metodologia de Monteiro (2011). Com este método a massa de serragem é estimada antes mesmo do corte, sem a necessidade de uso de balança e utilizando a espessura do fio de corte da serra de fita, a largura e o comprimento da tábua (Figura 3.5), sendo a massa de pedaços estimada pela diferença entre a massa de tora e a massa de serragem (Equação 5). No intervalo de três horas a serra-de-fita era trocada implicando em nova leitura do fio-de-corte da serra para determinar o volume de serragem.

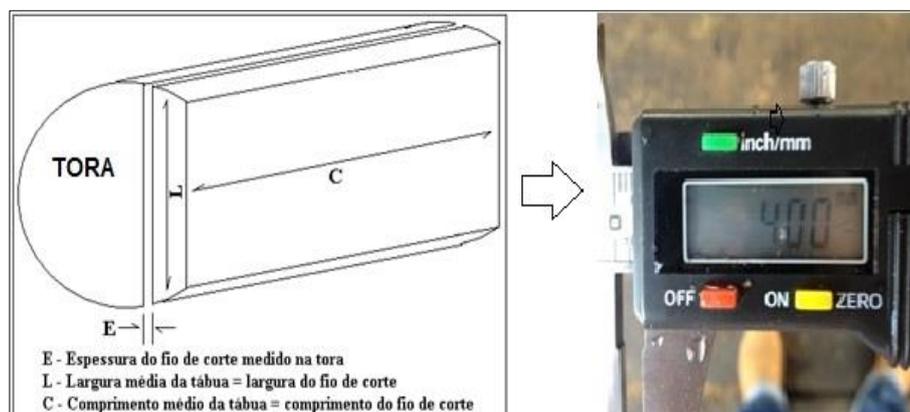


Figura 3.5. Esquema para determinação do volume de serragem em uma tora mostrando a espessura do fio-de-corte da serra-de-fita.

$$V_s = C \times E \times L \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: V_s = volume de serragem (m^3).

C = Comprimento da tora (m).

E = Espessura do fio de corte (mm).

L = largura da tábua (cm)

O volume de resíduos na forma de pedaços, proveniente do destopamento e do canteamento, foi determinado conforme Expressão 05.

$$V_p = V_t - (V_s + V_{pp}) \quad (\text{Equação 5})$$

Onde: V_p = Volume de resíduos na forma de pedaços (m^3).

V_t = Volume da tora (m^3).

V_s = Volume de serragem (m^3).

V_{pp} = Volume de peças produzidas (m^3).

A massa úmida da tora (M_{tu}), de peças produzidas (M_{ppu}) e de resíduos (M_{su} e M_{pu}) foi estimada na condição de umidade da madeira no pátio a partir do produto entre a densidade (ρ_{tu}) e os volumes da tora (V_{tu}), volume de peças produzidas (V_{ppu}), de serragem (V_{su}) e de pedaços (V_{pu}), conforme equações 6, 7, 8 e 9.

$$M_{tu} = \rho_{tu} \times V_{tu} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde: M_{tu} = Massa da tora úmida (kg)

ρ_{tu} = Densidade da tora condição pátio (kg/m^3)

V_{tu} = Volume úmido condição pátio da tora (m^3)

$$M_{ppu} = \rho_{tu} \times V_{ppu} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde: M_{ppu} = Massa de peças comerciais úmida (kg)

ρ_{tu} = Densidade da tora condição pátio (kg/m^3)

V_{ppu} = Volume condição pátio de peças produzidas (m^3)

$$M_{su} = \rho_{tu} \times V_{su} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde: M_{su} = Massa de serragem úmida (kg)

ρ_{tu} = Densidade da tora condição pátio (kg/m^3)

V_{su} = Volume condição pátio de serragem (m^3)

$$M_{pu} = \rho_{tu} \times V_{pu} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde: M_{pu} = Massa de pedaços de resíduos úmida (kg)

ρ_{tu} = Densidade da tora condição pátio (kg/m^3)

V_{pu} = Volume condição pátio de pedaços de resíduos (m^3)

A massa seca a 0% de umidade da tora (M_{ts}), de peças produzidas (M_{pps}) e de resíduos (M_{ss} e M_{ps}) foi obtida a partir do produto entre as massas úmidas na condição de pátio e o fator de massa seca (F_{ms}), conforme equações 10, 11, 12 e 13. O “ F_{ms} ” foi obtido a partir da relação entre a massa seca e a massa úmida de uma pequena amostra, em laboratório, de acordo com Campos e Leite (2013).

$$M_{ts} = M_{tu} \times F_{ms} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde: M_{ts} = Massa da tora seca (kg)

M_{tu} = Massa da tora úmida condição pátio (kg)

F_{ms} = Fator de massa seca

$$Mpps = Mppu \times Fms \quad (\text{Equação 11})$$

Onde: $Mpps$ = Massa de peças comerciais seca (kg)

Mtu = Massa de peças comerciais úmida condição pátio (kg)

Fms = Fator de massa seca

$$Mss = Msu \times Fms \quad (\text{Equação 12})$$

Onde: Mss = Massa de resíduos de serragem seca (kg)

Msu = Massa de serragem condição pátio (kg)

Fms = Fator de massa seca

$$Mps = Mpu \times Fms \quad (\text{Equação 13})$$

Onde: Mps = Massa de resíduos de pedaços seca (kg)

Mpu = Massa de pedaços úmida condição pátio (kg)

Fms = Fator de massa seca

Para a análise do potencial energético dos resíduos foi considerado um teor de umidade de 25% em base seca. Desta forma, a massa úmida a 25% de umidade da tora ($Mt\ 25\%$), de peças produzidas ($Mpp\ 25\%$) e de resíduos ($Ms\ 25\%$ e $MPp25\%$) foi obtida conforme equações 14, 15, 16 e 17.

$$Mt\ 25\% = Mts + (0,25 \times Mts) \quad (\text{Equação 14})$$

Onde: $Mt\ 25\%$ = Massa da tora à 25% de umidade (kg)

Mts = Massa da tora seca à 0% (kg)

$$Mpp\ 25\% = Mpps + (0,25 \times Mpps) \quad (\text{Equação 15})$$

Onde: $M_{pp\ 25\%}$ = Massa de peças comerciais à 25% de umidade (kg)

M_{ts} = Massa de peças comerciais à 0% (kg)

$$M_s\ 25\% = M_{ss} + (0,25 \times M_{ss}) \quad (\text{Equação 16})$$

Onde: $M_s\ 25\%$ = Massa de resíduos de serragem à 25% de umidade (kg)

M_{ts} = Massa de resíduos de serragem à 0% (kg)

$$M_P\ 25\% = M_{ps} + (0,25 \times M_{ps}) \quad (\text{Equação 17})$$

Onde: $M_T\ 25\%$ = Massa de resíduos de pedaços à 25% de umidade (kg)

M_{ps} = Massa de resíduos de pedaços 0% (kg)

3.2 Coleta de dados em laboratório

A densidade e o teor de umidade na condição de pátio das toras foram determinadas segundo a norma ABNT NBR 7190/1997, utilizando-se para tal, uma balança com sensibilidade de 10^{-2} g, um paquímetro digital Caliper 150 mm e precisão de 0,05 mm e uma estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até massa constante.

Após a determinação da densidade e do teor de umidade na condição de pátio, estas amostras foram divididas em duas partes, uma para determinação da densidade básica e da umidade máxima e a outra, após moagem e classificação, foi utilizada para determinação do poder calorífico superior e da análise imediata.

Para a determinação da densidade básica e umidade máxima, as amostras foram submersas em água até massa saturada constante e em seguida foram colocadas em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até massa seca constante a 0% de umidade, conforme Figura 3.6A, 3.6B e 3.6C.



Figura 3.6. Saturação das amostras para obter o teor de umidade máximo das amostras (A). Pesagem das amostras para controle (B). Secagem das amostras em estufa para obter a massa seca (C).

A densidade básica das amostras foi calculada pela fórmula proposta por Smith (1954), tendo como base o máximo teor de umidade (Equação 18).

$$\rho_b = \frac{1}{\frac{M_{sat} - M_{0\%}}{M_{0\%}} + 1,53} \quad (\text{Equação 18})$$

Onde: ρ_b = Densidade básica (g/cm^3)

M_{sat} = Massa saturada da amostra (g)

$M_{0\%}$ = Massa seca da amostra (g)

O teor de umidade (TU) no momento pátio foi determinado com base na Norma ABNT NBR 7190/1997 (Equação 19).

$$U = \frac{M_U - M_{0\%}}{M_{0\%}} * 100 \quad (\text{Equação 19})$$

Onde: U = Teor de umidade (%)

M_U = Massa úmida da amostra (g)

$M_{0\%}$ = Massa seca da amostra a 0% (g)

O poder calorífico foi determinado com amostras secas a 0% de umidade classificadas em fração abaixo de 60 mesh. A determinação do poder calorífico foi feita em calorímetro PARR modelo 1341, segundo a norma ABNT NBR 8633/84 e manual

de operações do calorímetro, conforme Figuras 8E e 8F. Os testes de calorimetria foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira - Unb e em triplicatas de acordo com a norma do Laboratório de Produtos Florestais – LPF do Serviço Florestal Brasileiro – SFB.

A densidade energética foi obtida pelo produto da massa seca de madeira com o seu respectivo poder calorífico superior.

Na análise imediata foram determinados teores de material volátil (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF), de acordo com a norma ABNT NBR 8112/86 e os testes foram realizados em triplicatas, de acordo com a norma do Laboratório de Produtos Florestais – LPF do Serviço Florestal Brasileiro – SFB, conforme Figuras 3.7A, 3.7B, 3.7C e 3.7D.



Figura 3.7. Pesagem dos cadinhos para determinação do teor de materiais voláteis (A); Cadinhos na mufla a temperatura de 700°C para determinação do teor de cinzas; Pesagem da amostra para ensaio de poder calorífico (C); Calorímetro PARR modelo 1341 (D).

3.3 Análise estatística

O modelo de delineamento do experimento foi do tipo inteiramente ao acaso com 5 espécies e número de repetições variável totalizando 73 repetições (toras). As

variáveis analisadas foram: diâmetro (cm); comprimento das toras (m); rendimento volumétrico de serragem (%); teor de umidade pátio (%); volume das toras (m³); massa seca de serragem (kg); massa seca de pedaços (kg); massa seca total de resíduos (kg); densidade básica da madeira (kg/m³); poder calorífico superior (kcal/kg); poder calorífico útil (kcal/kg); densidade energética (Gcal/m³); teor de cinzas (%); teor de material volátil (%) e teor de carbono fixo (%).

A análise de variância e o teste de Tukey foram realizados com auxílio do software gratuito Genes versão 2013.5.1 beta a 5% a probabilidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características do processamento

Na Tabela 4.1 estão apresentados os dados das características dimensionais das toras e do processamento das espécies cedro, tauari, castanharana, guariúba e garapa.

O comprimento das toras variou de 4 a 5 m e foi determinado de acordo com a demanda da serraria, ou seja, as toras foram serradas para atender a um depósito de madeiras local o que facilitou a padronização do comprimento das toras tendo em vista a produção de peças padrões.

O diâmetro médio encontrado para as quatro espécies foi de 65,18 cm sendo o maior encontrado para castanharana de 68,13cm que foi a espécie com maior rendimento volumétrico à saber 69,36%. O aumento de rendimento em madeira serrada em função do diâmetro foi encontrado também por VIANNA NETO (1984); VITAL (2008); MANHIÇA (2010) e ANJOS (2013).

O rendimento volumétrico médio para as cinco espécies foi de 59,58%, portanto 40,42% de resíduos. Garcia *et al.* (2012), encontraram rendimento médio de 46,30% para a espécie *Couratari guianensis* (tauari) e Biasi (2005) obteve rendimentos de 53,90% no processamento de *Mezilaurus itauba* (itauba) para a produção de vigas e 59,83% no processamento de *Erisma uncinatum* (cedrinho) para a produção de tábuas.

O rendimento volumétrico da serraria foi considerado alto para os padrões da região Amazônica, mas se explica pelo corte tangencial utilizado para atender ao mercado local com madeira classificada como de segunda, para a produção de régua, assoalho, lambri, caibro, longarina, pranchado, etc., o que possibilitou um maior aproveitamento das toras.

Tabela 4.1. Características dimensionais das toras, produção volumétrica e em massa no processamento das cinco espécies.

Características		Cedro	Tauari	Castanharana	Guariúba	Garapa
Diâmetro	(cm)	66,25 (15,73)	64,20 (15,73)	68,13 (11,65)	60,70 (12,90)	66,63 (14,18)
Comprimento	(m)	4,88 (24,90)	4,15 (26,18)	4,13 (19,75)	4,88 (26,30)	4,26 (24,62)
Rendimento	(%)	45,47 (31,71)	57,70 (20,24)	69,36 (16,60)	61,34 (19,80)	64,06 (28,46)
Teor de umidade – pátio	(%)	59,89 (10,90)	68,73 (10,96)	61,59 (15,91)	65,27 (8,30)	61,50 (5,39)
Volume das toras	(m ³ /tora)	1,72 (51,28)	1,35 (35,21)	1,55 (39,30)	1,47 (40,40)	1,49 (29,19)
Volume de peças comerciais produzidas	(m ³ /tora)	0,77 (54,96)	0,77 (42,66)	1,07 (39,89)	0,88 (44,40)	0,96 (46,41)
Volume de serragem	(m ³ /tora)	0,09 (44,71)	0,07 (42,50)	0,11 (37,52)	0,09 (42,90)	0,09 (35,70)
Volume de pedaços	(m ³ /tora)	0,86 (68,08)	0,49 (40,56)	0,36 (64,67)	0,48 (62,50)	0,43 (74,26)
Volume total de resíduos	(m ³ /tora)	0,95 (63,45)	0,56 (37,49)	0,48 (53,49)	0,58 (55,80)	0,52 (58,38)
Massa seca das toras	(kg/tora)	660,56 (48,06)	786,46 (41,27)	1546,58 (71,13)	847,75 (36,60)	1070,34 (27,42)
Massa seca de peças produzidas	(kg/tora)	297,65 (55,04)	437,99 (42,41)	1065 (68,45)	506,78 (36,50)	689,33 (44,05)
Massa seca de Serragem	(kg/tora)	35,88 (44,62)	40,05 (40,82)	114,92 (68,97)	56,33 (43,20)	68,41 (34,02)
Massa seca de pedaços	(kg/tora)	327,03 (61,62)	294,81 (52,59)	366,66 (96,59)	284,6 (65,30)	312,60 (75,36)
Massa seca total de resíduos	(kg/tora)	362,91 (57,42)	334,87 (49,29)	481,58 (86,39)	340,97 (58,40)	381,01 (59,56)

Observação.: Valores entre parênteses correspondentes ao coeficiente de variação.

Em geral, com base nos coeficientes de variação para diâmetro, comprimento e teor de umidade pode-se afirmar que houve uma boa precisão no experimento. As outras variáveis (rendimento, massa e volume) são influenciadas pelo número de cortes executado em cada tora, de difícil controle, e por isso os valores de coeficientes de variação se elevam.

Em alguns casos como o volume de resíduos de serragem (pó) e de pedaços, a variação entre toras foi elevada, o que pode ser observado pelo alto coeficiente de variação. Observe que, o coeficiente de variação para diâmetro, comprimento, teor de umidade foram relativamente baixos e, portanto não explicariam o elevado coeficiente de variação do volume de serragem e de pedaço. Uma possível explicação seria a variação na quantidade de cada peça comercializada produzida por tora, ou seja, uma determinada tora produziu maior quantidade de peças de menores dimensões, gerando uma grande quantidade de resíduos, enquanto que em outra uma maior quantidade de peças de maiores dimensões foram produzidas gerando menor quantidade de resíduos.

O teor de umidade médio das toras foi de 63,39%. Monteiro (2011) encontrou um teor médio de 30,78% para a espécie de *Eucalyptus*, valor próximo ao ponto de saturação das fibras devido ao longo tempo em que as toras ficaram armazenadas no pátio da serraria. As toras recém-cortadas apresentaram um teor de umidade maior (65 a 75%) e conseqüentemente, conforme FERREIRA *et al.* (2009) e MONTEIRO (2011), ideal para o desdobro.

Nas Tabelas 4.2 e 4.3 estão os valores de “F” da análise de variância, ao nível de 5% de significância para as características dimensionais e do processamento das toras.

Tabela 4.2. Valores de “F” para rendimento volumétrico (Rv), diâmetro das toras (D), comprimento das toras (C) e teor de umidade (Tu).

FV	GL	Valores de “F”			
		Rv	D	C	Tu
Tratamentos	4				
Resíduos	68	6,6226**	0,713 ^{ns}	1,8107 ^{ns}	3,631**
Total	72				

Observação.: **significativo a 1%; *significativo a 5 %.

Observa-se pela análise de variância da Tabela 4.2 diferença significativa à 1% de probabilidade para o rendimento volumétrico e para o teor de umidade das toras. Os fatores diâmetro e comprimento das toras não apresentaram diferença significativa indicando que são estatisticamente iguais para as cinco espécies.

Tabela 4.3. Valores de “F” para volume da tora (Vt), volume de peças comerciais produzidas (Vpp), volume de serragem (Vs), volume de pedaços (resíduos) (Vped), e volume total de resíduos (Vtotal).

FV	GL	Valores de “F”				
		Vt	Vpp	Vs	Vped	Vtotal
Tratamentos	4					
Resíduos	68	0,8011 ^{ns}	1,6443 ^{ns}	2,9573*	4,5338**	4,1273**
Total	72					

Observação.: **significativo a 1%; *significativo a 5 %.

Para as variáveis volumétricas de acordo com a Tabela 4.3 houve diferença significativa à 1% de probabilidade para volume de resíduos de pedaços e volume total de resíduos e à 5% para volume de resíduos de serragem. Os fatores volume das toras e volume de peças produzidas não diferiram entre si.

Para massa das toras, massa seca de peças produzidas e massa seca de serragem (resíduos) houve diferença significativa ao nível de 1% probabilidade, ao contrário do que ocorreu para massa seca de pedaços (resíduo) e massa seca total de resíduos

indicando similaridade na produção total de resíduos das cinco espécies estudadas, como mostra Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Valores de “F” para massa seca das toras (Mst), massa seca de pedaços produzidos (Mspp), massa seca de serragem (Mss), massa seca de pedaços (Msped) e massa seca total de resíduos (Mstotal).

FV	GL	Valores de “F”				
		Mst	Mspp	Mss	Msped	Mstotal
Tratamentos	4					
Resíduos	68	5,6968**	8,9889**	9,9549**	0,2943 ^{ns}	0,8378 ^{ns}
Total	72					

Observação.: **significativo a 1%; *significativo a 5 %.

O resultado do teste de Tukey para as variáveis é apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Teste de Tukey para as variáveis rendimento volumétrico (Rv), teor de umidade (Tu), volume de serragem (Vs), volume de pedaços (Vped), volume total de resíduos (Vtotal), massa seca das toras (Mst), massa seca de peças produzidas (Mspp) e massa seca de serragem (Mss).

Propriedades	Valores				
	Cedro	Tauari	Castanharana	Guariúba	Garapa
Rv (%)	45,47b	57,70ab	69,36a	61,34a	64,06a
Tu (%)	59,89b	68,73a	61,59b	65,27ab	61,50b
Vs (m ³)	0,0932ab	0,0709b	0,1146a	0,097ab	0,0957ab
Vped (m ³)	0,8616a	0,4905b	0,3677b	0,488b	0,4324b
Vtotal (m ³)	0,9548a	0,5615b	0,4823b	0,585ab	0,5281b
Mst (kg)	660,56b	786,45b	1546,58a	847,75b	1070,33ab
Mspp (kg)	297,65b	437,98b	1065,00a	506,78b	664,54ab
Mss (kg)	35,88b	40,05b	114,91a	56,33b	68,41b

Observação.: Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de significância.

A castanharana apresentou o maior rendimento volumétrico (69,36%), e não diferiu das outras espécies, exceto o cedro, que apresentou o menor valor (45,47%). O cálculo do rendimento volumétrico foi feito pela relação entre o volume de peças produzidas e o volume de toras processadas, variáveis cujos valores médios não apresentaram diferença significativa entre as espécies.

Uma possível explicação para a diferença significativa entre os rendimentos volumétricos das cinco espécies pode ter sido a produção de quantidades diferentes de peças comercializáveis de dimensões variáveis, implicando em diferenças no número de cortes, o que está de acordo com Pounce (1992), que afirma em seu trabalho que, o número de cortes influencia no rendimento volumétrico. Por outro lado quando se analisa a produção de pedaços provenientes do destopamento e do canteamento das peças produzidas, verificou-se que a castanharana foi a espécie de menor produção ($0,3677 \text{ m}^3$) e isto pode explicar também a diferença significativa do rendimento volumétrico.

A castanharana apresentou um dos menores teor de umidade à saber 61,59% e conseqüentemente maior densidade básica de $773,00 \text{ kg/m}^3$. Esta relação negativa entre estas variáveis já é esperada (LOPES e GARCIA, 2002; OLIVEIRA *et al.*, 2003) e, segundo Oliveira *et al.* (2003), isto ocorre porque as madeiras com maior densidade possuem menor volume de vazios internos e, portanto, menor espaço para preenchimento com água livre ou de capilaridade.

A espécie com maior produção de resíduos de serragem foi a castanharana totalizando $0,1146 \text{ m}^3$, o que está associado ao um maior número de cortes em função do maior volume de peças produzidas. O cedro foi a espécie que produziu quase o dobro do volume de resíduo na forma de pedaços à saber $0,8616 \text{ m}^3$ em relação à segunda colocada, a guariúba levando-o a se destacar na produção volumétrica total de resíduo ($0,9547 \text{ m}^3$), ou seja 39% maior que a segunda colocada guariúba.

Segundo Monteiro (2011), a variação da massa das toras deve-se à variação dos parâmetros umidade, densidade básica e volume das toras. Verificou-se pela Tabela 4.5 que, assim como ocorreu para o volume, o destaque na produção de massa seca total de

resíduos foi da castanharana com 481,58 kg/tora, seguida de guariúba, garapa, tauari e cedro.

4.2 Características energéticas das espécies

Na Tabela 4.6 estão apresentados os valores médios das características energéticas das espécies: cedro, tauari, castanharana, guariúba e garapa.

A média para a densidade básica encontrada para as cinco espécies foi de 632,00 kg/m³, sendo a maior densidade da espécie castanharana de 773,00 kg/m³. De acordo com Silveira *et al.* (2013) essa madeira pode ser classificada como madeira pesada, por apresentar densidade no intervalo de 720,00 a 1110,00 kg/m³. Araujo (2007), encontrou densidades básicas para as espécies também tropicais *Couratari guianensis* (tauari) e *Euxylophora paraensis* Huber (pau-amarelo) de 520,00 kg/m³ e 690,00 kg/m³ respectivamente.

A média para o poder calorífico superior foi de 4.723,00 kcal/kg, sendo que o maior poder calorífico encontrado foi para cedro)correspondente a 4.811,00 kcal/kg. Valores semelhantes de outras folhosas da floresta Amazônica foram encontrados, como 4.735 kcal/kg para a espécie *Couratari stellata* (tauari), segundo Quirino *et al.* (2005). Vidaurre *et al.* (2012), encontraram para a madeira de *Schizolobium amazonicum* conhecida como paricá uma densidade básica média de 280 kg/m³ e um poder calorífico superior de 4.519,00 kcal/kg.

Para a análise imediata, a média do teor de voláteis para as cinco espécies foi de 80,83%, teor de cinzas de 1,51% e teor de carbono fixo de 17,66%. Para o teor de material volátil houve diferença significativa, onde a espécie cedro com o maior teor de 83,86% sendo esperado que as madeiras com altos teores de voláteis queimem mais rapidamente (PEREIRA *et al.*, 2000). De acordo com Oliveira *et al.* (2010), normalmente o teor de materiais voláteis é inversamente proporcional ao teor de carbono fixo, sendo a espécie guariúba com menor teor de material volátil (76,80%) e consequentemente maior teor de carbono fixo (21,37%).

Tabela 4.6. Características energéticas das cinco espécies.

Características	Unidade	Cedro	Tauari	Castanharana	Guariúba	Garapa
Densidade básica da madeira	kg/m ³	460 (12,03)	630 (7,36)	773 (6,35)	647 (7,60)	650 (4,67)
Poder calorífico superior	Kcal/kg	4811 (0,89)	4.757 (0,82)	4685 (0,57)	4.639 (0,90)	4726 (1,27)
Poder calorífico útil	Kcal/kg	3158 (0,94)	3118 (1,01)	3064 (0,66)	3029 (1,00)	3152 (1,41)
Densidade energética	Gcal/m ³	2,21 (12,29)	2,99 (7,32)	3,63 (6,14)	3,00 (7,30)	3,09 (4,59)
Teor de cinzas	%	0,53 (43,05)	1,26 (26,16)	2,40 (29,78)	1,82 (27,50)	2,12 (25,14)
Teor de material volátil	%	83,86 (2,93)	81,63 (1,25)	80,82 (4,02)	76,80 (4,20)	80,97 (2,68)
Teor de carbono fixo	%	15,60 (12,81)	16,89 (6,83)	16,78 (18,64)	21,37 (15,10)	16,91 (11,04)

Observação.: Valores entre parênteses correspondem aos coeficientes de variação.

Nas Tabelas 4.7 e 4.8 estão os valores de “F” ao nível de 1% e 5% de probabilidade para as características energéticas das cinco espécies.

Tabela 4.7. Valores de “F” para densidade básica (Db), poder calorífico superior (PCS), poder calorífico útil (PCU) e densidade energética (De).

FV	GL	Valores de “F”			
		Db	PCS	PCU	De
Tratamentos	4				
Resíduos	68	86,5976**	32,8256**	39,2922**	79,1432**
Total	72				

Observação.: **significativo a 1%; *significativo a 5 %.

Observa-se, pela Tabela 4.7, diferença significativa à 1% de probabilidade para a densidade básica, o poder calorífico superior, poder calorífico útil e densidade energética.

Os valores de “F” para a análise imediata estão na Tabela 4.8, onde pode ser observado diferença significativa à 1% entre as espécies para material volátil, cinzas e carbono fixo.

Tabela 4.8. Valores de “F” para material volátil (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF).

FV	GL	Valores de “F”		
		MV	CZ	CF
Tratamentos	4			
Resíduos	68	12,8264**	30,9409**	9,9951**
Total	72			

Observação.: **significativo a 1%; *significativo a 5 %.

O resultado do teste de Tukey para as variáveis energéticas significativas é apresentado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Teste de Tukey para as médias densidade básica (Db), densidade energética (De), poder calorífico superior (PCS), poder calorífico útil (PCU), teor de material volátil (MV), teor de cinzas (CZ) e carbono fixo (CF).

Propriedades	Valores				
	Cedro	Tauari	Castanharana	Guariúba	Garapa
Db (kg/m ³)	460,32c	630,22b	773,38a	647,46b	652,50b
De (Gcal/m ³)	2,21c	2,99b	3,62a	3,00b	3,08b
PCS (kcal/kg)	4811a	4757b	4685cd	4639d	4726bc
PCU (kcal/kg)	3158a	3117b	3063c	3029c	3152a
MV (%)	83,86a	81,83ab	80,82b	76,80c	80,97b
CZ (%)	0,53c	1,26b	2,39a	1,82ab	2,12a
CF (%)	15,60b	16,89b	16,77b	21,37a	16,91b

Observação: Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade.

Para o teor de cinzas a espécie com maior teor foi a castanharana com 2,39%, em contrapartida o cedro teve menor teor de cinzas de 0,53% e maior poder calorífico superior de 4811,00 kcal/kg. Brand (2010) afirmou que, alto teores de cinzas contribuem para a redução do poder calorífico superior, tendo em vista que os materiais minerais (cinzas) não participam do processo de combustão, mas são contabilizados na massa do combustível submetido ao processo de queima.

Houve diferença significativa entre as variáveis de densidade básica onde a castanharana apresentou maior densidade (773,38 kg/m³) e conseqüentemente um dos menores teor de umidade, essa correlação negativa também foi encontrada por Oliveira *et al.* (2005).

Para o poder calorífico superior e conseqüentemente poder calorífico útil verificou-se diferença significativa sendo que o cedro, se destacou das demais espécies com 4811,00 kcal/kg de PCS e conseqüentemente menor teor de cinzas 0,53%. Essa correlação negativa entre poder calorífico superior e cinzas também foi encontrada para as espécies pau-rainha, guariúba e cardeiro (TRUGILHO *et al.*, 1991).

Neste estudo a média para a densidade energética encontrada para as cinco espécies foi de 2,98 Gcal/m³, sendo a maior densidade encontrada para castanharana de 3,63 Gcal/m³. Utilizando a mesma metodologia (produto entre poder calorífico superior e densidade básica) Protásio *et al.* (2014) encontraram para dois clones da espécie *Eucalyptus* de diferentes idades 49 e 61 meses 2,26 Gcal/m³ e 1,96 Gcal/m³ de respectivamente de densidade energética. Moutinho *et al.* (2011), encontraram valores de densidade energética para as espécies florestais *Eschweilera ovata* e *E. amazônica* conhecidas como mata-matá 4,19 Gcal/m³ e 4,30 Gcal/m³. Santos e Oliveira (2014) em trabalho realizado com a espécie amazônica *Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke à saber paricá obtiveram 1,86 Gcal/m³ de densidade energética. Nesse trabalho, a diferença a favor da castanharana ocorre devido a maior densidade básica e o maior poder calorífico.

4.3 Potencial energético da serraria

Na Tabela 4.10 estão apresentados o potencial energético médio dos resíduos gerados no processamento das toras das cinco espécies.

Tabela 4.10. Potencial energético da serraria com a produção de resíduos do processamento das 5 espécies.

Produção Massa e Energia	Cedro		Tauari		Castanharana		Guariúba		Garapa		Serraria
	S	P	S	P	S	P	S	P	S	P	Média
Massa seca à 0% (kg/hora)	47,84	436,04	57,21	421,16	215,46	687,48	140,83	711,60	68,41	312,60	619,72
Massa à 25% de umidade (kg/hora)	59,80	545,05	71,52	526,45	269,33	859,36	176,04	889,50	85,52	390,75	774,66
Energia seca à 0% (Gcal/hora)	0,22	2,09	0,27	8,36	1,01	3,21	0,65	3,29	0,32	1,48	4,18
Energia à 25% de umidade (Gcal/hora)	0,18	1,71	0,22	1,63	0,82	2,62	0,53	2,69	0,26	1,23	2,38

Observação.: S – resíduos de serragem; P – resíduos de pedaços e T – total soma de resíduos de serragem e pedaços.

O sistema de corte utilizado neste trabalho mostrou que 17,95% da massa seca do resíduo produzido sai na forma de serragem e 82,05% na forma de pedaços, proveniente do destopamento e do canteamento das peças. No processamento das 73 toras a produção de resíduos para as cinco espécies foi de 3873,32 kg/hora.

Considerando um teor de umidade para queima em caldeira de 25%, em base seca, a estimativa de produção de resíduos do processamento de cedro foi de 59,80 kg/hora na forma de serragem e 545,05 kg/hora na forma de pedaços, que queimados podem gerar um total de 1,89 Gcal/hora. A estimativa para tauari foi de 71,52 kg/hora na forma de serragem e de 526,45 kg/hora na forma de pedaços, que queimados, podem gerar um total de 1,85 Gcal/hora de energia na forma de calor.

Para a espécie guariúba foi encontrada uma produção média de 176,04 kg/hora na forma de serragem e 889,50 kg/hora na forma de pedaços o que equivalem a um total de 3,22 Gcal/hora de energia e para garapa um total de 476,27 kg/hora de resíduos que equivalem a 1,49 Gca/hora de energia.

O destaque quanto ao potencial energético foi para a espécie castanharana, que equivalem a um total de 3,44 Gcal/hora de energia. Essa vantagem pode ser explicada pela maior produção total de resíduos na forma de pedaços totalizando 1128,69 kg/hora.

A estimativa de produção mensal de biomassa residual na forma de pedaços e serragem foi de 123.945,60 kg/h, a 25% de umidade. Em um estudo de caso de uma termelétrica no município de Itacoatiara no Amazonas, Silva (2011) afirma que, considerando um teor de umidade médio de 28,95% são necessários 2000 kg de resíduos queimados em caldeira para geração de 1MWh. Nestas condições e considerando um regime de trabalho na serraria, de 8h/dia e 20dias/mês, a queima em caldeira de 123.945,60 kg/h de resíduos geraria 61,97MW/h de energia elétrica durante um mês.

5 CONCLUSÕES

Os resíduos gerados pela serraria têm qualificação para serem utilizados na produção de energia elétrica com possibilidades de atender a demanda da própria.

Na forma de pedaços os resíduos podem ser queimados ou transformados em carvão vegetal e, triturados, em briquetes ou pellets.

Na produção de resíduos e no potencial energético a castanharana foi a espécie que se destacou, com produção de 1.128 kg/hora de resíduos à 25% de umidade e 3,44 Gcal /hora.

A alternativa de combustão dos resíduos, em um regime de 160h/mês poderia gerar 61,97 MWh de energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANJOS, R. A. M. dos. **Estudo da qualidade da madeira serrada de três espécies de Eucalipto**. Curitiba, 2013, 153p. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal – 2013.

ARAUJO, H. J. B. de. **Aproveitamento de resíduos das indústrias de serrarias do Acre para fins energéticos**. Rio Branco: Embrapa Acre, 38p. 2003. (Embrapa Acre, Documentos 82), 2003. CD-ROM.

ARAUJO, H. J. B. de. Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 37, n. 3, p. 399 – 416, set./dez. 2007.

AROLA, R. A. **Wood fuels – How do they stack up?** Forest Products Research Society, November 15-17, Atlanta, Georgia, 12 p. 1976.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633: Carvão vegetal: **Determinação do poder calorífico**, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112. Carvão vegetal: **Análise Imediata**, Outubro 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190. **Projeto de estruturas de madeira**. 105p, 1997.

AÇMA, H. H. Combustion characteristics of different biomass materials. **Energy Conversion e Management**, v. 44, p. 155-162, 2003.

BARROS, S. V. S. dos; NASCIMENTO, C. C. do; AZEVEDO, C. P. de. Caracterização tecnológica da madeira de três espécies florestais cultivadas no amazonas: alternativa para produção de lenha. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 42, n. 4, p. 725 - 732, out./dez. 2012.

BATISTA, D. C.; SILVA, J. G. M. da.; CORTELETTI, R. B. Desempenho de uma serraria com base na eficiência e na amostragem do trabalho. **Revista Floresta e Ambiente**. 2013, 20(2): p. 271-280

BEN – BALANÇO ENERGETICO NACIONAL 2013: **Ano base 2012**. Empresa de pesquisa energética – EPEN. Rio de Janeiro: EPE, 2013.

BOWYER, J. L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J. G. **Forest products and wood science. An Introduction**. New York: Blackwell Publishing, p. 554, 2003.

BIASI, C. P. **Rendimento e Eficiência no Desdobro de Três espécies tropicais**. Curitiba, 2005. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Centro de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Paraná, 2005.

BIASI, C. P.; ROCHA, M. P. Rendimento em madeira serrada e quantificação de resíduos para três espécies tropicais. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 1, 14p. 2007.

BRAND, M. A.; SILVA, D. A. da.; MUNIZ, G. I. de; KLOCK, U. Balanço e rendimento energéticos de uma indústria integrada de base florestal. **Revista Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 45-53, jan./dez. 2002.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência. 131p, 2010.

BRITO, O. J.; FERREIRA, M.; BARRICHELO, L.E.G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: Densidade Básica da madeira x Densidade Aparente do carvão - Perspectivas de melhoramento. **Boletim Informativo**, ESALQ/USP: Piracicaba, 6(16): p.1-9, jul. 1978.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; SEIXAS, F.; MIGLIORINI, A. J.; MURAMOTO, M. C. Análise da Produção Energética e de Carvão Vegetal de Espécies de Eucalipto. **IPEF**, n.23, p.53-56, abr.1983.

CAMPOS, J. C. C; LEITE, H. G. **Mensuração florestal**. 4ed. Viçosa-MG. Ed. UFV. 605p, 2013.

CAVALLET, J.; OLIVEIRA, A. L. A.; ARRUDA, T.P.M.; ACOSTA, F. C. Rendimento em madeira de Jatobá (*Hymenaea courbaril*). II Simpósio de Iniciação Científica das Ciências Agrárias - II SICCA. **Anais...** Alta Floresta – MT, p. 20-23, 2010.

CORDER, S. E. **Wood and bark as fuel**. Corvallis: School of Forestry, 28p., 1973.

CORTEZ, L. A.B; LORA, E. E. S.; GOMEZ, E. O. **Revista Biomassa para energia**. Campinas, SP: Unicamp, 732 p., 2008.

CUNHA, M. P. S. C.; PONTES, C. L. F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; CUNHA NETO, Z. B.; BARBOSA, A. P. R. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: 3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: **Anais...**, v.2, São Carlos, 1989, p. 93-121.

DOWAKI, K.; MORI, S. Biomass energy used in a sawmill. **Applied Energy**, Singapore, n.80, p. 327-339, 2005.

DÜNISCH, O., MONTÓIA, R.V. & BAUCH, J. **Dendroecological investigations on Switenia macrophylla King and Cedrela odorata L. (Meliaceae) in the central Amazon.** *Trees* 17:244, p. 250, 2003.

ESE-ETAME, R. **Impact of Ellipticality on Lumber Grade and Volume Recovery For Red Oak Logs.** 2006, 107p. Dissertation - Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg – Virginia, 2006.

FERREIRA, J. C.; FURTADO, T. S.; NEVES, M. D.; BRAND, M. A. Influência do teor de umidade no poder calorífico em diferentes idades e componentes de árvores de Pinus taeda. In: 1 CONGRESSO BRASILEIRO DE FLORESTAS ENERGÉTICAS, Belo Horizonte, 2009. **Anais...** Belo Horizonte: 2009. 10p.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, n.2/3, p.65-74. 1971.

FOELKEL, C. E.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6. Campos do Jordão, 1990. **Anais...** Campos do Jordão: 1990. p.719- 728.

FONTES, P. J. P. **Auto-Suficiência Energética em Serraria de Pinus e Aproveitamento dos Resíduos.** Curitiba, 1994, 153p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, 1994.

GARCÍA, C. B. **Anatomia, composição e propriedade de cinco madeiras paraguaias.** Viçosa, 1995, 126f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 1995.

GARCIA, F. M.; MANFIO, R. D.; SANSÍGOLO, C. A.; MAGALHÃES, P. A. D. Rendimento no desdobro de toras de Itaúba (*Mezilaurus itauba*) e Tauari (*Couratari guianensis*) segundo a classificação da qualidade da tora. **Revista Floresta e Ambiente.** vol.19 n.4 Seropédica Oct./Dec. 2012.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Caracterização energética de pellets de madeira. In: 7 Congresso Internacional de Bioenergia, São Paulo, 2012. **Anais...** São Paulo: 2012, 6p.

GARCIA, F. M. **Rendimento operacional de uma serraria com a espécie cambará (Qualea Albiflora Warm.) na região amazônica.** São Paulo, 2013, 83p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2013.

GATTO, D. A. **Avaliação quantitativa e qualitativa da utilização madeireira na região da quarta colônia de imigração italiana do rio grande do sul**. Santa Maria, 2002. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal/Tecnologia de Produtos Florestais), Universidade Federal de Santa Maria, 2002.

GENOVESE, A. L.; UDAETA, M. E. M.; GALVAO, L. C. R. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo. Ano 06. In: Encontro de Energia no Meio Rural – AGRENER. **Anais...** Itajubá – MG, 2006.

GOMILDE, J.L. **Serraria**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 1977. 119p.

HUMMEL, A.C.; ALVES, M.V.S. ; PEREIRA, D.; VERISSIMO, A.; SANTOS, D. A atividade madeireira na Amazônia Brasileira: **produção, receita e mercado**. Serviço Florestal Brasileiro (SBF), Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAZON). 20p. 2010.

JANKOWSKY, I. P.; CHIMELO, J. P.; CAVALCANTE, A. A. de; GALINA, I. C. M.; NAGAMURA, J. C. S. **Madeiras Brasileiras**. Caxias do Sul: Spectrum, V.1 – 172 p. 1990.

JUNIOR, M. I. M.; ROCHA, M. P. da.; TIMOFEICZYK JUNIOR, R. Rendimento em madeira serrada de Pinus Taeda para duas metodologias de desdobro. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 35, n. 3, set./dez. 2005.

JUNIOR, M. D.; HIGA, A. R.; ROCHA, M. P. da. Rendimento em serraria de toras de Pinus taeda: sortimentos de grandes dimensões. **Revista Floresta e Ambiente**, 19 (3): 385-392 2012.

KLAUTAU, J. P von. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente para secagem de grãos**. Curitiba, 2008, 192p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, 2008.

LATORRACA, J. V. F. **Processamento mecânico da madeira**. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 116p. 2004.

LACERDA, J. S.; COUTO, H. T. Z.; HIROTA, M. M.; PASISHNYK, N.; POLIZEL, J. L. Estimativa da biomassa e carbono em áreas restauradas com plantio de essências nativas. **METRVM**. 23p. Esalq, Universidade de São Paulo, 2009. Acesso em 23/09/2014. Disponível em:

<<http://cmq.esalq.usp.br/wiki/doku.php?id=publico:metrvm:start>>.

LIMA, E. A. Alternativa para estimar o preço da madeira para energia. **Comunicado Técnico**. Embrapa Florestas, Colombo - PR, dezembro, 20p, 2010.

LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; LAVORANTI, O., J. Caracterização dendro energética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. **Revista Pesquisa Florestal Brasileira**, v.31, p.09-17, 2011.

LOGSDON, N. B.; JUNIOR, C. C. Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, n. 18, p. 77-107, 2002.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras. Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Editora Plantarum Ltda., Nova Odessa, v.2, 1998.

LOUREIRO, A.A. & SILVA, M.F. **Catálogo das madeiras da Amazônia**. Ministério do Interior Superintendência do desenvolvimento da Amazônia, Belém. 1968.

MAINIERI, C.; CHIMELO, J. P. **Fichas de características das madeiras brasileiras**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo. 1989.

MANHIÇA, A. A. **Rendimento e eficiência no desdobro de Pinus sp. utilizando modelos de corte numa serraria de pequeno porte**. Curitiba, 2010, 97p. (Mestrado em Ciências Florestais) Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2010.

MARCHESAN, R.. **Rendimento e qualidade de madeira serrada de três espécies tropicais**. Curitiba, 2012, 94p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, 2012.

MONTEIRO, C. T. **Balanco energético do processamento mecânico de toras de Eucalyptus**. Lavras, 2011. 67p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da madeira) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

MOERS, E. M.; VIEIRA, A. C.; FERNANDES, D. M.; SOUZA, S. N. M.; BARICCATTI, R. A. Caracterização da biomassa residual proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia. I COLASSA – Congresso Latino Americano de Suinocultura e Sustentabilidade Ambiental, **Anais...** Foz do Iguaçu, 2011.

MOUTINHO, V. H. P.; COUTO, A. M.; LIMA, J. T.; AGUIAR, O. J. R. de.; NOGUEIRA, M. de O. G. Caracterização Energética de madeiras de espécies conhecidas na Amazônia brasileira como Matá-Matá (*Eschweilera Mart Ex Dc*). **Revista Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 92, p. 457-461, dez. 2011.

MOURA, M. J.; FIGUEIREDO, M. M. Estudos de variabilidade numa árvore de *Eucalyptus globulus*. **O Papel**, v. 63, n. 6, p.71-79, 2002.

NÉRI, A. C.; FURTADO, F. C.; POLESE, R. C. Avaliação do rendimento de madeira serrada de *Pinus*. **Revista da Madeira**, n.88, p.9, 2005.

OGUNBODE, E.B; FABUNMI, F.O; IBRAHIM, S.M; JIMOH, I.O; IDOWU, O.O. Management of Sawmill Wastes in Nigeria: Case Study of Minna, Niger State. **Greener Journal of Science, Engineering and Technology Research**. Nigéria, vol. 3 (2), pp. 034-041, February 2013.

OLIVEIRA, A. D.; MARTINS, E. P.; SCOLFORO, J. R. S.; REZENDE, J. L. P.; SOUZA, A. N. Viabilidade econômica de serrarias que processam madeira de florestas nativas – o caso do município de Jarú, estado de Rondônia. **Revista Cerne**, Lavras, v. 9, n. 1, p. 001-015, 2003.

OLIVEIRA, J. T. S. da.; HELLMEISTER, J. C.; FILHO, M. T. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de Eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.1, p.115-127, 2005.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. de C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Revista Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p 431-439, set. 2010.

OMER, A. M. The environmental and economical advantages of agricultural wastes for sustainability development in Sudan. **Journal of Brewing and Distilling**, vol. 1(1), pp. 001-010, March 2010.

PEREIRA, J. C.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2000. 113p. (Embrapa Florestas Documentos, 38).

PINHEIRO, G. F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J. T. Densidade energética de resíduos vegetais. **Revista Biomassa e Energia**, v. 2, n. 2, p. 113-123, 2005.

PIOVESAN, P. R. R.; REIS, A. R. S.; SOUZA, D. V. Rendimento na produção de madeira serrada de ipê (*Handroanthus* Sp.) **Revista Enciclopédia Biosfera**, Centro científico conhecer - Goiânia, v.9, n.17; p 2316. 2013.

POUNCE, R. H. Tecnologia de desdobro de pinus e eucaliptos a busca da competitividade. In: Simpósio florestal do Rio Grande do Sul – Tecnologia da madeira, 2., 1992, Esteio. **Anais...** Santa Maria: UFSM/AGEFLOR/CEPEF/FATEC, 1992. p. 154-162.

PROTÁSIO, T. P. de.; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.; RIBEIRO, M. X.; TRUGILHO, P. F.; LEITE, E. R. da S. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 11, p 1252 – 1258, 2012.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F. Seleção de clones de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Revista Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 97, p. 15-28, 2013.

PROTÁSIO, T. P. de.; GOULART, S. L. ; NEVES, T. A.; ASSIS, M. R. de.; TRUGILHO, P. F. Clones comerciais de Eucalyptus de diferentes idades para o uso bioenergético da madeira. **Revista Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 113-127, mar. 2014.

QUEIROZ, S. C. S.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. de. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden x Eucalyptus urophylla S. T. Blake. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n.6, p.901-909, 2004.

QUIRINO, F. W.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira**. Curitiba, n. 89, abril 2005. p 100-106, 2005.

RIBEIRO, S. C.; JACOVINE, I. A.; SOARES, C. P.; MARTINS, S.V.; SOUZA, a. I.; NARDELLI, A.M.B. Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma floresta madura no município de Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.33, n.5, p.917-926, 2009.

ROCHA, M. P **Desdobro primário da madeira**. Série Didática nº 02/99, Curitiba: Fupef, 61p. 1999.

ROCHA, M. P. **Eucalyptus grandis Hill ex Maiden e Eucalyptus dunnii Maiden como fontes de matéria prima para serrarias**. Curitiba, 2000. 186 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Paraná, 2000.

ROCHA, M. P. **Técnicas e planejamento em serrarias**. Curitiba: FUPEF, 2002. 121 p.

ROCHA, M. P.; TOMASELLI, I. Efeito do modelo de desdobro na qualidade da madeira serrada de Eucalyptus grandis e Eucalyptus dunnii. **Revista Cerne**, Lavras, MG, v. 8, n. 2, p. 70-83, 2002.

SANTOS, G. R. V. dos.; JANKOWSKY, I. P.; ANDRADE, A. de. Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Scientia Forestalis**, n. 63, p. 214-220, jun. 2003.

SANTOS, J. M. C. F. **Avaliação da biomassa de plantas bioenergéticas**. 2009, 79p. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

SANTOS, E. C. S. dos.; OLIVEIRA, F. M. Densidade energética de espécies lenhosas para uso energético. In: 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. **Anais...** Bento Gonçalves – RS, Brasil, 23 a 25 de Abril de 2014.

SETUNGE, S.; WONG, K. K.; JOLLANDS, M. Economic and environmental benefits of using hardwood sawmill waste as raw material for particleboard production. **Earth and Environmental Science**, Edinburgh, v. 9, n. 5-6, p. 485-494, 2009.

SILVA, J. G. M. **Desempenho e amostragem do trabalho de uma serraria no município de Alegre, Espírito Santo**. Espírito Santo, 2010, 62 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireiro), Universidade Federal do Espírito Santo, 2010.

SILVA, J. L. P. da. Aproveitamento de resíduos da indústria madeireira para geração de energia elétrica: **O caso da empresa B. K. energia Itacoatiara Ltda. no estado do Amazonas**. Curitiba, 33p. Trabalho apresentado para o Departamento de Ciências florestais da Universidade Federal do Paraná, 2011.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 38, n. 1, jan./mar. 2008.

SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. do. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. **Revista Acta Amazônia**. vol.43 n 2, 8p, Manaus. Junho, 2013.

SOUZA, M. H. de; MAGLIANO, M. M.; CAMARGOS, J. A. A. **Madeiras tropicais brasileiras**. Brasília; Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis Laboratório de Produtos Florestais, 1997. 152p.

SMITH, D.M. 1954. Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples. **USDA Forest Product Laboratory** N° 2014. 8p.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA - SBS. **Fatos e números do Brasil florestal**. São Paulo. 110 p., 2007.

TOLMASQUIM, M T. Perspectiva e planejamento do setor energético no Brasil. **Estudos avançados**, v.26 n(74), São Paulo, 2012.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. da.; FRAZÃO, F. J. L.; REGAZZI, A. J. Caracterização de espécies nativas e exóticas amazônicas e do carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa n.2, p p. 144-152, 1991.

VALE, A. T. do; BRASIL, M. A. A.; LEÃO, A. L. Qualificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n.1, p. 71-80, 2002.

VALE, A. T. do; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-145, jan.-mar, 2010.

VALE, A. T. do; DANTAS, V. F. de S.; ZAMBRZYCKI, G. C. Potencial energético dos resíduos da cultura do milho (*Zea Mays*). **Revista Evidência**, Joaçaba v. 13 n. 2, p. 153-164, jul./dez. 2013.

VIANNA NETO, J. A. A. Considerações básicas sobre o desdobro de *Pinus* spp. **Revista Silvicultura**. Curitiba, v. 9, n. 34, p.15-23, 1984.

WERTHER J.; SAENGER, M.; HARTGE, E. U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of agricultural residues. **Progress in energy and combustion science**. Alemanha: Pergamon, v.26, p. 1-27, 2000.

WIANDY, J. E.; ROWELL, R. M. **The Chemistry of Wood Strength**. In: *The Chemistry of Solid Wood*. Washington, D.C. American Chemical Society, 1984.

VIDAURRE, G. B.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, R. C.; VALLE, M. L. A. Propriedades energéticas da madeira e do carvão de paricá (*Shizolobium amzonicum*). **Revista Árvore**, vol.36 no.2 Viçosa Mar./Apr. 2012.

VITAL, B. R. **Planejamento e operação de serrarias**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2008. 211 p.

YOKOYAMA, S.; MATSUMURA, Y. (eds). **The Asian Biomass Handbook – A guide for biomass production and utilization**. The Japan Institute of Energy, 326 p., 2008.

APÊNDICES

A - ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A.1. ANOVA – DIÂMETRO DAS TORAS (cm)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	391,2945	97,8236	0,713 ^{ns}
Resíduos	68	9329,59	137,1999	
Total	72			

A.2. ANOVA – COMPRIMENTO DAS TORAS (m)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	8,6075	2,1518	1,8107 ^{ns}
Resíduos	68	80,8131	1,1884	
Total	72			

A.3. ANOVA – VOLUME DAS TORAS (m³)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	1,2551	0,3137	0,8011 ^{ns}
Resíduos	68	26,6338	0,3916	
Total	72			

A.4. ANOVA – VOLUME DE PEÇAS COMERCIAIS PRODUZIDAS (m³)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	1,0581	0,2645	1,6443 ^{ns}
Resíduos	68	10,9400	0,16088	
Total	72			

A.5. ANOVA – VOLUME DE SERRAGEM (m³)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,0169	0,0042	2,9573 [*]
Resíduos	68	0,9754	0,0014	
Total	72			

A.6. ANOVA – VOLUME DE PEDAÇOS (m³)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	2,3139	0,5784	4,5338**
Resíduos	68	8,6764	0,1275	
Total	72			

A.7. ANOVA – VOLUME TOTAL DE RESÍDUOS (m³)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	2,2537	0,5634	4,1273**
Resíduos	68	9,2830	0,1365	
Total	72			

A.8. ANOVA – RENDIMENTO VOLUMÉTRICO (%)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	8279,29	2069,82	3,631**
Resíduos	68	38762,96	570,04	
Total	72			

A.9. ANOVA – TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA (%)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	886,6467	221,661	5,4047**
Resíduos	68	2788,84	41,0124	
Total	72			

A.10. ANOVA – MASSA SECA DAS TORAS (kg)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	7462741,24	1865685,31	5,6968**
Resíduos	68	22269786,43	327496,85	
Total	72			

A.11. ANOVA – MASSA SECA DE PEÇAS COMERCIAIS PRODUZIDAS (kg)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	53,4617764	1336544,41	8,9889**
Resíduos	68	10110776,51	148687,88	
Total	72			

A.12. ANOVA – MASSA SECA DE SERRAGEM (kg)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	63340,23	15835,05	9,9549**
Resíduos	68	108166,38	1590,68	
Total	72			

A.13. ANOVA – MASSA SECA DE PEDAÇOS (kg)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	66240,00	16560,00	0,2943 ^{ns}
Resíduos	68	3826837,10	56277,019	
Total	72			

A.14. ANOVA – MASSA SECA TOTAL DE RESÍDUOS (kg)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	228356,17	57089,04	0,8378 ^{ns}
Resíduos	68	4633581,10	68140,89	
Total	72			

A.15. ANOVA – DENSIDADE BÁSICA (kg/m³)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	777937,17	86,597	86,597**
Resíduos	68	152716,99	2245,83	
Total	72			

A.16. ANOVA – PODER CALORÍFICO SUPERIOR (kcal/kg)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	232326,79	58081,69	32,8256**
Resíduos	68	120319,20	1769,40	
Total	72			

A.17. ANOVA – PODER CALORÍFICO ÚTIL (kcal/kg)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	157229,62	39307,40	39,2922**
Resíduos	68	68026,31	1000,3870	
Total	72			

A.18. ANOVA – DENSIDADE ENERGÉTICA (Gcal/m³)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	15,7308	3,9327	79,1432**
Resíduos	68	3,379	0,0496	
Total	72			

A.19. ANOVA – TEOR DE CINZAS (%)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	33,5882	8,3970	30,9409**
Resíduos	68	18,4545	0,27139	
Total	72			

A.20. ANOVA – TEOR DE MATERIAL VOLÁTIL (%)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	317,6021	79,400	12,8624**
Resíduos	68	420,9484	6,1904	
Total	72			

A.21. ANOVA – TEOR DE CARBONO FIXO (%)

ANOVA				
FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	320,4732	55,1183	9,9951**
Resíduos	68	374,9885	5,5145	
Total	72			