

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO -PR

**ANÁLISE TÉCNICA DE UM CAVAQUEADOR E
CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DE CAVACOS DE
BIOMASSA DA COLHEITA DE MADEIRA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DIEGO ORO

**IRATI - PR
2015**

DIEGO ORO

**ANÁLISE TÉCNICA DE UM CAVAQUEADOR E CARACTERIZAÇÃO
ENERGÉTICA DE CAVACOS DE BIOMASSA DA COLHEITA DE MADEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável dos Recursos Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva – UFPR
Coorientador

Prof. Dr. Stefan Pelz – HFR
Coorientador

Prof. Dr. Everton Hillig – UNICENTRO
Coorientador

Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes – UNICENTRO
Orientador

Irati – PR

2015

Catálogo na Fonte
Biblioteca da UNICENTRO

O74a	<p>ORO, Diego. Análise técnica de um cavaqueador e caracterização energética de cavacos de biomassa da colheita de madeira / Diego Oro. – Irati, PR : [s.n], 2015. 77f.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes Coorientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva Coorientador: Prof. Dr. Stefan Pelz Coorientador: Prof. Dr. Everton Hillig Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. Área de Concentração em Manejo Sustentável dos Recursos Florestais. Universidade Estadual do Centro-Oeste, Paraná.</p> <p>1. Dissertação – Engenharia Florestal. 2. Picagem de resíduos. 3. Eficiência operacional. 4. Energia – caracterização. 5. <i>Pinus taeda</i>. I. Lopes, Eduardo da Silva. II. Silva, Dimas Agostinho da. III. Pelz, Stefan. IV. Hillig, Everton. V. UNICENTRO. VI. Título.</p>
------	---

CDD 20 ed. 634.98

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PARECER

Defesa Nº 84

A Banca Examinadora instituída pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Florestais, do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, Campus de Irati, após arguir o mestrando **Diego Oro** em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "**ANÁLISE TÉCNICA DE UM CAVAQUEADOR E CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DE CAVACOS DE BIOMASSA DA COLHEITA DE MADEIRA**", é de parecer favorável à APROVAÇÃO do estudante, habilitando-o ao título de **Mestre em Ciências Florestais**, Área de Concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais.

Irati-PR, 28 de agosto de 2015.



Dr. Dimas Agostinho Silva
Universidade Federal do Paraná
Primeiro Examinador



Dr. Renálo Cesar Gonçalves Robert
Universidade Federal do Paraná
Segundo Examinador



Dr. Eduardo da Silva Lopes
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que por sua benção dando-me forças para vencer mais esta batalha. Agradeço a minha família, Wilso, Genessi, Diana, Laíza e Marcelo pelo apoio e ajuda nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador Eduardo da Silva Lopes, pela orientação, amizade, auxílio e toda a ajuda durante este período, assim como ao Comitê de Orientação, com os professores Dimas Agostinho da Silva, Stefan Pelz e Everton Hillig, pelos auxílios e orientação prestados.

À Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná, por toda a estrutura e auxílio prestado e a CAPES.

Agradeço aos grandes amigos, Ricardo Murilo Malheiros e João Paulo de Lara, por toda convivência no antigo IAP. Agradeço aos amigos da pós-graduação durante o período de 2013 a 2015, e também ao pessoal do futebol brasino.

Agradeço a empresa, pela permissão e todo auxílio prestado durante a realização da pesquisa, assim como a amizade firmada durante a estadia e visitas.

Também agradeço a Hochschule für *Forstwirtschaft*, por toda ajuda e estrutura para desenvolvimento da pesquisa, assim como a Fundação Araucária pelo auxílio financeiro.

Agradeço ao meu tutor e coorientador Stefan Pelz e os amigos Jens Steinbrinks, Ulrich Schroeder Caldas, Antti Nuutinen, pela amizade e toda ajuda prestada durante minha estadia na Alemanha, assim como meus amigos de intercâmbio brasileiros e as amigades.

Quero agradecer a Universidade Federal do Paraná, principalmente na pessoa do professor Dimas Agostinho da Silva e aos amigos de laboratório, durante todas as análises e dias que passamos juntos.

Enfim, a todos que ajudaram nesta caminhada para que o trabalho fosse realizado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Importância do setor de florestas plantadas.....	4
3.2. Matriz energética nacional.....	5
3.2.1. Principais fontes energéticas.....	5
3.2.2. Importância das energias renováveis.....	6
3.2.3. Biomassa florestal para fins energéticos.....	7
3.3. Sistemas de colheita da madeira.....	8
3.4. Sistemas de cavaqueamento de biomassa florestal.....	10
3.4.1. Cavaqueamento de biomassa em sistema de colheita de toras curtas.....	11
3.4.2. Cavaqueamento de biomassa em sistema de colheita de árvores inteiras.....	13
3.5. Biomassa residual da colheita de madeira para produção de energia.....	13
3.6. Fatores de influência na produção de biomassa residual.....	15
3.6.1. Tipo de material.....	15
3.6.2. Formas de estocagem.....	16
3.6.3. Tempo de estocagem.....	17
3.6.4. Condições climáticas.....	17
3.6.5. Transporte e logística.....	18
3.7. Características físicas e químicas dos cavacos.....	18
3.7.1. Teor de umidade.....	18
3.7.2. Densidade.....	19
3.7.3. Poder calorífico.....	20
3.7.4. Composição química.....	21
3.8. Estudo de tempos e movimentos.....	23
4. MATERIAIS E MÉTODOS	24

4.1. Área de estudo	24
4.2. Sistema de colheita da madeira.....	25
4.3. Sistema de cavaqueamento	27
4.4. Procedimento amostral.....	28
4.5. Avaliação operacional do cavaqueador de resíduos	32
4.5.1. Determinação da disponibilidade mecânica.....	32
4.5.2. Determinação da disponibilidade técnica.....	33
4.5.3. Determinação da eficiência operacional	33
4.5.4. Determinação da produtividade	33
4.5.5. Rendimento e balanço energético	34
4.6. Avaliações físicas e químicas dos cavacos	35
4.6.1. Teor de umidade.....	35
4.6.2. Densidade aparente de cavaco.....	35
4.6.3. Poder calorífico	36
4.6.4. Composição química	36
4.7. Análise estatística	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1. Análise operacional do cavaqueador florestal	39
5.1.1. Estudo do ciclo operacional	39
5.1.2. Disponibilidade mecânica, disponibilidade técnica e eficiência operacional.	43
5.1.3. Produção e Produtividade do Cavaqueador de Resíduos.....	44
5.1.4. Rendimento e balanço energético	46
5.2. Avaliações químicas e físicas dos cavacos	47
5.2.1. Teor de umidade.....	47
5.2.2. Densidade aparente de cavacos	49
5.2.3. Poder calorífico	51
5.2.4. Composição química.....	56
6. CONCLUSÃO.....	62
7. RECOMENDAÇÕES.....	63
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
9. APÊNDICE	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Oferta Interna de Energia 2013.	5
Figura 2. Cavaqueamento de biomassa em sistema de colheita de toras curtas.	12
Figura 3. Cavaqueamento de biomassa em sistema de colheita de árvores inteiras.	13
Figura 4. Localização do município de Três Barras, SC.	24
Figura 5. Sortimentos e resíduos para energia da colheita de madeira de <i>Pinus</i>	27
Figura 6. a) Alocação das pilhas à campo no talhão; b) Pilha de biomassa residual da colheita de madeira estocada no campo.	29
Figura 7. Pilha de cavaco estocado na fábrica e sentido de obtenção da amostra.	30
Figura 8. Organograma da realização da pesquisa.	31
Figura 9. Distribuição percentual de tempos produtivos e improdutivo.	39
Figura 10. Distribuição percentual dos elementos de ciclo operacional efetivo do cavaqueador de resíduos.	40
Figura 11. Distribuição percentual das interrupções operacionais no tempo improdutivo.	41
Figura 12. Distribuição percentual de manutenções.	42
Figura 13. Relação dentre de produtividade efetiva e eficiência operacional.	46
Figura 14. Teor médio de umidade em base úmida dos cavacos processados a partir de biomassa residual estocada em campo e cavacos estocados na fábrica em diferentes períodos de tempo.	49
Figura 15. Densidade aparente dos cavacos processados a partir de biomassa residual estocada em campo e cavacos estocados na fábrica em diferentes períodos de tempo.	51
Figura 16. Poder calorífico superior dos cavacos processados a partir de biomassa residual estocada em campo e cavacos estocados na fábrica em diferentes períodos de tempo.	53
Figura 17. Poder calorífico líquido dos cavacos processados a partir de biomassa residual estocada em campo e cavacos estocados na fábrica em diferentes períodos de tempo.	55
Figura 18. Teor de materiais voláteis dos cavacos processados a partir de biomassa residual estocada em campo e cavacos estocados na fábrica em diferentes períodos de tempo.	57
Figura 19. Teor de carbono fixo dos cavacos processados a partir de biomassa residual estocada em campo e cavacos estocados na fábrica em diferentes períodos de tempo.	59
Figura 20. Teor de cinzas dos cavacos processados a partir de biomassa residual estocada em campo e cavacos estocados na fábrica em diferentes períodos de tempo.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Potencial produção de resíduos em florestas de pinus no estado de Santa Catarina.	15
Tabela 2. Dados meteorológicos mensais obtidos durante o período de coleta dos dados da região estudada.	25
Tabela 3. Características do povoamento estudado.	25
Tabela 4. Sistema de colheita da madeira utilizado pela empresa.	26
Tabela 5. Sistema de cavaqueamento da biomassa residual da colheita de madeira.	28
Tabela 6. Distribuição percentual de disponibilidade mecânica, disponibilidade técnica e eficiência operacional.	43
Tabela 7. Produção e produtividade média do cavaqueador de resíduos por turno de trabalho.	45
Tabela 8. Rendimento energético do cavaqueador de resíduos.	47
Tabela 9. Valores médios para teor de umidade da biomassa residual estocada a campo e cavacos estocados na fábrica.	48
Tabela 10. Valores médios de densidade aparente da biomassa residual estocada a campo e cavacos estocados na fábrica.	50
Tabela 11. Valores médios de poder calorífico superior da biomassa residual estocada a campo e cavacos estocados na fábrica.	52
Tabela 12. Valores médios de poder calorífico líquido da biomassa residual estocada a campo e cavacos estocados na fábrica.	54
Tabela 13. Valores médios de teor de materiais voláteis da biomassa residual estocada a campo e cavacos estocados na fábrica.	56
Tabela 14. Valores médios de teor de carbono fixo da biomassa residual estocada a campo e cavacos estocados na fábrica.	58
Tabela 15. Valores médios de teor de cinzas da biomassa residual estocada a campo e cavacos estocados na fábrica.	60
Tabela 16. Análise de normalidade dos dados de análise de tempos e movimentos, utilizando vários testes estatísticos.	70
Tabela 17. Análise de variância, anova da variável teor de umidade.	70
Tabela 18. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 1 (Forma do material e de Estocagem) a 5% de probabilidade.	70
Tabela 19. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 2 (Período de Estocagem) à 5% de probabilidade.	70
Tabela 20. Teste Tukey para diferenciação de médias de interação a 5% de probabilidade.	71
Tabela 21. Análise de variância, anova da variável densidade aparente.	71
Tabela 22. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 1 (Forma do material e de Estocagem) a 5% de probabilidade.	71
Tabela 23. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 2 (Período de Estocagem) à 5% de probabilidade.	71
Tabela 24. Teste Tukey para diferenciação de médias de interação a 5% de probabilidade.	72
Tabela 25. Análise de variância, anova da variável poder calorífico superior.	72
Tabela 26. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 1 (Forma do material e de Estocagem) a 5% de probabilidade.	72
Tabela 27. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 2 (Período de Estocagem) à 5% de probabilidade.	72
Tabela 28. Teste Tukey para diferenciação de médias de interação a 5% de probabilidade.	73
Tabela 29. Análise de variância, anova da variável poder calorífico líquido.	73

Tabela 30. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 1 (Forma do material e de Estocagem) a 5% de probabilidade.	73
Tabela 31. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 2 (Período de Estocagem) à 5% de probabilidade.	73
Tabela 32. Teste Tukey para diferenciação de médias de interação a 5% de probabilidade....	74
Tabela 33. Análise de variância, anova da variável teor de voláteis.	74
Tabela 34. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 1 (Forma do material e de Estocagem) a 5% de probabilidade.	74
Tabela 35. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 2 (Período de Estocagem) à 5% de probabilidade.	74
Tabela 36. Teste Tukey para diferenciação de médias de interação a 5% de probabilidade....	75
Tabela 37. Análise de variância, anova da variável teor de carbono fixo.	75
Tabela 38. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 1 (Forma do material e de Estocagem) a 5% de probabilidade.	75
Tabela 39. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 2 (Período de Estocagem) à 5% de probabilidade.	75
Tabela 40. Teste Tukey para diferenciação de médias de interação a 5% de probabilidade....	76
Tabela 41. Análise de variância, anova da variável teor de cinzas.	76
Tabela 42. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 1 (Forma do material e de Estocagem) a 5% de probabilidade.	76
Tabela 43. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 2 (Período de Estocagem) à 5% de probabilidade.	76
Tabela 44. Teste Tukey para diferenciação de médias de interação a 5% de probabilidade....	77

RESUMO

Diego Oro. Análise técnica de um cavaqueador e caracterização energética de cavacos de biomassa da colheita de madeira

Esta pesquisa objetivou realizar a análise técnica de um cavaqueador e a caracterização energética dos cavacos da biomassa. A pesquisa foi realizada em uma empresa florestal localizada na região Nordeste do estado de Santa Catarina, Brasil, contemplando as operações de processamento da biomassa residual da colheita de madeira de *Pinus taeda*. Inicialmente foi realizada uma análise operacional do cavaqueador da marca Vermeer, modelo HG 6000 TX na execução do processamento dos resíduos, por meio de um estudo de tempos e movimentos, sendo determinada a disponibilidade mecânica, a eficiência operacional, a produtividade e o rendimento energético. Em seguida, avaliou-se a qualidade da biomassa residual da colheita de madeira estocada em campo em condição normal e a partir de cavacos processados e estocados na fábrica sob cobertura, em diferentes períodos de tempo: 7 (testemunha), 30, 60, 90, 120, 150 e 180 dias. Foram avaliados os parâmetros físicos e químicos dos cavacos em relação ao teor de umidade, densidade aparente, poder calorífico e análise química imediata. Os valores referentes às análises operacionais e aos parâmetros físicos e químicos dos cavacos nos diferentes períodos de estocagem foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Os resultados mostraram que a eficiência operacional e a produtividade do cavaqueador de resíduos foram afetadas pelos tempos de deslocamentos e aguardando os veículos de transporte, com 31% e 29% do tempo total do ciclo operacional, respectivamente, indicando, portanto, a necessidade de ajustes no dimensionamento e planejamento logístico. Além disso, houve perdas de tempo com deslocamentos interno e externo aos talhões, que afetaram a produtividade do equipamento. A produtividade média do cavaqueador no processamento da biomassa residual da colheita de madeira foi de 27,3 ton.h⁻¹, com uma disponibilidade mecânica e eficiência operacional média de 86% e 46%, respectivamente. Em relação à caracterização dos cavacos, os menores teores de umidade foram obtidos para o tratamento na fábrica sob abrigo, sendo o tratamento de 60 dias o melhor período de estocagem dos cavacos. A densidade aparente apresentou um valor médio de 100 kg.m⁻³ aos 30 dias, enquanto a testemunha apresentou um valor médio de 184 kg.m⁻³. Em relação poder calorífico superior, o maior valor foi obtido aos 30 dias com os resíduos estocados no campo com valor médio de 4.792 Kcal.Kg⁻¹, porém, os tratamentos estocados na fábrica apresentaram igualdade estatística. Por fim, com relação aos teores de cinzas, o melhor resultado foi obtido no tratamento com armazenamento dos resíduos no campo aos 30 dias, com valor médio de 0,9%, e para os tratamentos ao abrigo na fábrica o melhor valor foi obtido aos 60 e 120 dias. O tratamento de cavacos produzidos a partir da biomassa residual da colheita de madeira e estocados na fábrica pelo período de 60 dias apresentou os melhores índices para teores de umidade, geração de energia e teores de cinzas. Contudo, ficou evidenciada a maior qualidade na estocagem ao abrigo na fábrica em relação aos cavacos produzidos da biomassa estocada no campo e exposta às condições climáticas.

Palavras-Chave: Picagem de resíduos, eficiência operacional, energia, caracterização.

ABSTRACT

Diego Oro. Technical analysis of chipper and energetic characterization of biomass chips from timber harvesting.

This research aimed to carry out the operational assessment of mechanized system of processing of residues and the quality of biomass chips for energy production. The research was realized in a forestry company located in the northeast region of state of Santa Catarina, Brazil, contemplating the processing operations of the residual biomass of timber *Pinus taeda* harvesting. Initially was realized an operational analysis of chipper of the Vermeer brand, HG 6000 TX model in the processing execution of residues, through of a study of times and movements, being determined the mechanical availability, the operational efficiency, the productivity and the energy yield. Then, the quality was evaluated of residual biomass of timber harvesting stored in field in normal condition and from of chips processed and stored in industry under cover, in different time periods: 7 (witness), 30, 60, 90, 120, 150 and 180 days. Were evaluated the physical and chemical parameters of the chips in relation to the moisture content, apparent bulk density, calorific value and immediate chemical analysis. The amounts related to operational analysis and physical and chemical parameters of the chips in different storage periods were subjected to analysis of variance and average compared by Tukey test at 5% probability. The results showed that the operational efficiency and productivity of chipper of residues were affected by the displacement times and waiting the transport vehicles, with 31% and 29% of the total operational cycle time, respectively, indicating, thus the necessity of adjustments in sizing and logistics planning. Besides, there was wasting time with internal and external movements of the plots, which affected the productivity of the equipment. The average productivity of chipper in the processing of residual biomass of timber harvesting was of 27.3 ton.h⁻¹ with a mechanical availability and efficiency operational of 86% and 46%, respectively. In relation the quality of the chips, the lower moisture contents were obtained for the treatment in the industry under shelter, being the 120 days the best period of storage of chips. The apparent density showed an average value of 100 kg.m⁻³ at 30 days, while the witness showed an average value of 184 kg.m⁻³. In relation at calorific power, the highest value was obtained at 30 days with the residues stored in the field with an average value of 4,792 Kcal.Kg⁻¹, however, the treatments with greater stability of calorific power were the stocked in the industry. Finally, with relation to the ash contents, the best result was obtained in the treatment of storage of residues in the field at 30 days, with an average value of 0.9%, however again, the stability was observed only in treatments stocked in the industry. The chips produced from the residual biomass of timber harvesting and stored in the industry in the period between 30 and 90 days showed the best indexes for moisture contents, energy generation and ash contents. However, emphasized the highest quality in storage under in the industry in relation to chips produced from biomass stored in the field and exposed to weather conditions.

Key words: chipping of residues, operational efficiency, energy, characterization.

1. INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro apresenta considerável importância pelas contribuições na economia nacional, na preservação ambiental e também na área social, com geração de empregos diretos e indiretos. Para tanto, atualmente, o mercado de florestas plantadas se baseia em dois principais gêneros de árvores que são o *Pinus* e o *Eucalyptus* para produção e beneficiamento de madeira serrada, produção de celulose e papel e demais fins.

Estes dois principais gêneros abastecem diversos mercados consumidores de madeira, sendo que um deles compreende a utilização desta biomassa florestal para geração de energia. A biomassa florestal já vem sendo utilizada como fonte energética, tornando-se ainda mais importante em função das variações climáticas. Portanto, a biomassa florestal está inserida na produção energética, com sua utilização em termoelétricas para geração de energia elétrica e outros cenários de relevante importância.

Em função dos aumentos constantes no consumo de energia, dos baixos índices de precipitação que afeta o abastecimento de energia hidrelétrica em nosso país, a pressão sobre o uso de combustíveis fósseis e a redução dos índices de gás carbônico e demais poluentes, a biomassa florestal é elevada a patamares importantes no setor de energias renováveis, com grande potencial de crescimento nos próximos anos. A utilização deste tipo de biomassa vem ganhando destaque por suas características renováveis, redução da dependência dos combustíveis fósseis, da dependência externa de energia, de emissão de poluentes, diversificação da matriz energética, geração de empregos, destinação dos resíduos florestais e redução da pressão sobre as florestas nativas.

Para tanto, diversos autores (BRAND, 2007 e 2010; PINCELLI, 2011; SOUZA *et al.* 2012; FURTADO *et al.* 2012) convergem para a utilização da biomassa e resíduos gerados durante os processos de beneficiamento, buscando uma destinação adequada aos diversos materiais, que são caracterizados de acordo com sua origem.

No setor florestal, a colheita de madeira é um importante processo de beneficiamento e gera vários produtos, sendo um deles a biomassa residual da colheita de madeira. Os resíduos estão entre as principais fontes de biomassa, sendo composto normalmente por toras com diâmetro abaixo de 8 cm, galhos, folhas, tocos e raízes, podendo ainda ser considerados os resíduos do processamento da madeira (serragem, aparas e cepilhos). Outras fontes de biomassa compreendem as florestas energéticas, que consistem em plantios adensados e de curta rotação com a finalidade exclusiva de produção de biomassa.

Os resíduos florestais são utilizados para diversas finalidades, com o destaque para a cogeração de vapor e eletricidade em termelétricas, fábricas de celulose e papel e fábricas de compensados; para a secagem de grãos, assim como a produção de vapor para atividades do ramo alimentício.

Atualmente, um dos maiores desafios para aumentar a utilização da biomassa florestal é a disponibilidade e o uso adequado das tecnologias de colheita de aproveitamento da biomassa, de forma a atender à crescente demanda por matéria-prima. Segundo Roser *et al.* (2012), existem diversas soluções de máquinas e equipamentos para a colheita de biomassa florestal, porém a maioria adaptada de outros países. Canto *et al.* (2006) afirmam que, apesar do grande potencial de aproveitamento como fonte energética, a biomassa ainda não é plenamente utilizada por algumas empresas florestais em função da realidade de suas atividades, com elevados custos operacionais e de logística, tornando a produção de energia pouco atrativa economicamente.

Além disso, deve ser considerado os elevados custos de implantação de um sistema de colheita e processamento da biomassa residual, bem como a necessidade de adaptação ao sistema de colheita da madeira, de modo a viabilizar a coleta e o melhor aproveitamento dos materiais.

Portanto, devido aos elevados custos operacionais do sistema de cavaqueamento, da busca pela diversificação da matriz energética, da redução da pressão sobre as florestas nativas, da grande oferta e potencial da biomassa residual da colheita de madeira como fonte energética; esta pesquisa permitirá determinar a melhor forma e tempo de estocagem dos resíduos da biomassa da colheita de madeira, visando a sua melhor utilização para a geração de energia.

2. OBJETIVOS

Esta pesquisa teve por objetivo geral, analisar tecnicamente o sistema mecanizado de cavaqueamento e caracterizar os cavacos de biomassa residual da colheita de madeira, sob influência da forma e período de estocagem para a geração de energia.

Especificamente, objetivou-se:

- a) Analisar os elementos do ciclo operacional do cavaqueador e determinar a disponibilidade mecânica, eficiência operacional, produtividade e rendimento energético do sistema de cavaqueamento de biomassa residual da colheita de madeira;
- b) Caracterizar as propriedades físicas, químicas e energéticas dos cavacos produzidos a partir da biomassa residual estocada a campo e de cavacos estocados na fábrica;
- e
- c) Determinar a melhor forma e período de estocagem da biomassa residual da colheita de madeira.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Importância do setor de florestas plantadas

O setor florestal brasileiro apresenta grande importância para a sociedade em termos econômicos, sociais e ambientais. Atualmente, possui uma área total em torno de 7,7 milhões de hectares de florestas plantadas, com plantios dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* da ordem de 7,04 milhões de hectares, distribuídos em 71,9% com eucalipto e 20,5% de pinus, segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBA, 2015). Trata-se de um setor estratégico no fornecimento de matéria-prima para o desenvolvimento da indústria de base florestal.

Em relação ao aspecto econômico, o setor de florestas plantadas atingiu em 2013, um PIB setorial de R\$ 56 bilhões (1,2% do PIB nacional), consolidando um crescimento de 6% quando comparado ao ano anterior, saldo na balança comercial de R\$ 6,4 bilhões e responsável por R\$ 8,8 bilhões em arrecadação de tributos (IBÁ, 2014).

Sob o ponto de vista social, as atividades da cadeia produtiva da madeira promovem a geração de empregos e de renda, fixação de populações no campo e auxílio para a melhoria na qualidade de vida nas áreas rurais. Segundo o relatório da IBA (2014), o setor de florestas plantadas foi responsável, em 2013, por 4,4 milhões de postos de empregos, sendo 630 mil empregos diretos, 1,33 milhões de empregos indiretos e 2,44 milhões de empregos resultante do efeito-renda.

Além disso, destaca-se a importância ambiental do setor, contribuindo para a conservação da natureza e para o equilíbrio do ambiente na promoção da biodiversidade, na recuperação e proteção de áreas degradadas, na manutenção dos regimes hídricos, edáficos e da qualidade do ar e fixação de carbono.

Por fim, é importante destacar a potencial contribuição do setor florestal como fonte de energia, tendo contribuído com 7% de toda a energia produzida no país em 2012, tornando-se a segunda maior fonte produtiva da matriz energética (ABRAF, 2013). E no balanço energético nacional de 2014, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014), a parte de mercado referente à energia de biomassa atingiu 7,6%. Em projeção realizada pelo Serviço Florestal Brasileiro (SFB, 2012), indicou que o setor pode atingir uma participação entre 12 e 14% da produção energética nacional em 2020, por meio dos resíduos da madeira.

Segundo IBA (2014), em torno de 51,9 milhões de metros cúbicos de lenha e cavacos foram produzidos no ano de 2013, enquanto ABRAF (2013) cita que entre o período de 2002

e 2012, a produção de lenha continha com um crescimento em média de 1,2% ao ano, onde as regiões Sul e Sudeste foram as maiores consumidoras deste produto.

3.2. Matriz energética nacional

3.2.1. Principais fontes energéticas

De acordo com Macedo (2003), as principais fontes geradoras da matriz energética mundial estão distribuídas em carvão, gás natural, óleo, energia nuclear e hidráulica. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014) em seu Balanço Energético Anual de 2014 (Figura 1) apresenta a oferta interna de energia, sendo os maiores representantes o petróleo e derivados (39,2 %), derivados de cana-de-açúcar (16,1 %), gás natural (12,8 %) e energia hidráulica (12,5 %).

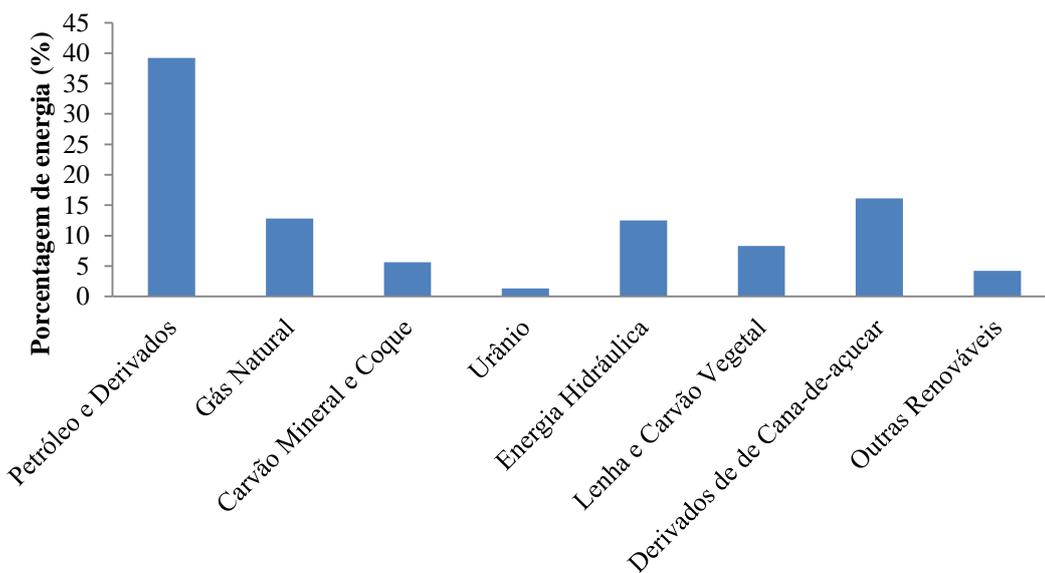


Figura 1. Oferta Interna de Energia 2013.

Fonte. EPE (2014).

Durante o passar dos anos, a globalização da economia e as fortes preocupações com o meio ambiente afetaram de forma decisiva as fontes energéticas. Com isso, as economias que melhor se posicionam no acesso aos recursos de baixo custo e baixo impacto ambiental possuem boas vantagens sobre as demais (TOLMASQUIM *et al.*, 2007).

Segundo Mussa (2003), a demanda energética mundial sinaliza um aumento de consumo da ordem de 1,7% até 2030, enquanto o Instituto *Energy Information Administration*

(EIA, 2014) em seu *outlook*, afirma que haverá um crescimento da energia renovável em torno de 1,9% ao ano até 2040, passando de 502 bilhões de KWh em 2012 para 851 bilhões de KWh em 2040, onde as energias renováveis não hidrelétricas apresentariam uma média de crescimento em torno de 3,2% ao ano e sendo responsáveis por quase a totalidade de crescimento do setor.

Além disso, com a diversificação das fontes energéticas renováveis que irá ocorrer neste período, a energia hidrelétrica perderá espaço para as outras fontes renováveis (EIA, 2014). Por isso, Vale *et al* (2002), definem o Brasil como sendo um país com grandes alternativas, inserindo importância de diversas fontes de energia renovável para suprir a demanda futura.

3.2.2. Importância das energias renováveis

Algumas das principais fontes de energia renováveis são: a biomassa, a energia eólica e solar; sendo que uma das vantagens da biomassa em comparação as demais refere-se às diferentes formas da fonte energética (sólido, líquido e gasoso), permitindo assim uma maleabilidade referente ao seu uso quando comparado com outras fontes (MÜLLER, 2005).

O Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2006) afirma que em curto prazo, a pressão ambiental para a redução do uso de combustíveis fósseis será um dos propulsores no aumento da demanda por energias renováveis, sendo mais visível após o aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera ocorrido nos últimos 250 anos, decorrente à utilização de combustíveis fósseis.

A energia renovável é de grande importância em resposta às preocupações com o meio ambiente juntamente com a segurança de abastecimento energético (BRIDGWATER, 2006). O Brasil por apresentar grandes extensões cultiváveis, solo e condições climáticas adequadas, apresenta-se como um dos maiores potenciais fornecedores de biomassa para a geração de energia, sendo que os resíduos florestais e agrícolas gerados durante o processo de produção podem ser utilizados com grande potencial na geração de energia (VIEIRA, 2012).

De acordo com Bridgwater (2006), a biomassa é a única fonte renovável no fornecimento de carbono fixo, que é um dos principais ingredientes dos combustíveis. Além disso, Williams (2001) cita que a utilização da biomassa na geração de energia não aumenta a quantia líquida de CO₂ emitida, pelo fato de que a geração deste gás durante a combustão é balanceada pela extração realizada pela fotossíntese. Já Müller (2005) diz que o uso de

biomassa como fonte de energia elétrica, além de reduzir a emissão de poluentes, tem uma grande importância na matriz energética por ser uma fonte renovável em substituição aos combustíveis fósseis, garantindo assim, a independência em relação aos países exportadores deste produto.

Segundo Brand (2010), as energias renováveis possuem dentre outras vantagens, a possibilidade de serem transformadas em energia mecânica e elétrica, sem a necessidade de primeiro obter uma energia térmica. E para tanto, Macedo (2003) indica que, a biomassa sendo usada para fins energéticos possui uma conotação interessante, em especial no uso com maior aporte tecnológico como na geração de eletricidade, vapor e demais combustíveis de transporte.

Para análise em curto e médio prazo, de acordo com o instituto EIA (2014), o principal fator de influência para o aumento do consumo de biomassa corresponde ao uso para queima energética, incentivando a competitividade com o carvão, enquanto a longo prazo, considera-se como maior influente o aumento da capacidade das centrais elétricas a base de biomassa.

3.2.3. Biomassa florestal para fins energéticos

O termo biomassa refere-se a todo material orgânico proveniente de espécies vegetais, que captam e armazenam energia solar, produzindo fotossíntese podendo esta ser convertida em formas úteis de energia, como calor, eletricidade e combustíveis líquidos (AKPINAR *et al.*, 2008; VIEIRA, 2012).

Dentre as diversas fontes renováveis de energia, insere-se o grupo dos materiais lignocelulósicos, havendo destaque para a biomassa florestal, que pode ser diferenciada em três grandes e principais grupos: material advindo da colheita florestal, resíduos gerados do processamento da madeira e madeira oriunda de florestas energéticas (SOUZA *et al.*, 2012).

Segundo Meyer e Kraleman (2012), a madeira é ecologicamente correta, pois é praticamente energia solar armazenada sendo caracterizada por uma combustão neutra de CO₂: Quando ocorre a queima da madeira, o CO₂ fixado pela planta é liberado novamente, encerrando assim o ciclo de dióxido de carbono. O desenvolvimento de tecnologia energética da madeira tem um grande potencial especialmente na região da Baixa Saxônia, onde em longo prazo, a biomassa pode substituir uma proporção significativa de combustíveis fósseis, gás natural e carvão.

Brito e Barrichelo (1979) já sinalizou que o uso da madeira e seus derivados para a produção energética é uma atividade muito interessante, inclusive com previsão de atividades florestais destinadas de forma exclusiva para esta atividade.

Müller (2005), por sua vez, diz que a biomassa florestal corresponde a um insumo de grande importância para a humanidade, sendo que seu maior valor está representado principalmente nos países subdesenvolvidos e em desenvolvimento. Já Bridgwater (2006) cita a madeira, as culturas anuais e os resíduos florestais e agrícolas como os principais recursos renováveis disponíveis para utilização como fonte energética.

Neste aspecto, as principais fontes de biomassa para a conversão energética correspondem aos resíduos agrícolas, florestais e de processamento industrial, além dos plantios florestais para fins energéticos (MACEDO, 2003; MULLER, 2005). As fontes derivadas da madeira normalmente são de resíduos industriais de base florestal, os resíduos da colheita da madeira, sendo que o potencial energético dos resíduos florestais provenientes da colheita de madeira tem reconhecimento no setor com grande amplitude (DESROCHERS *et al.*, 1993).

Brand (2010) diz que a biomassa florestal corresponde a diversos produtos, não se restringindo ao uso de madeira e carvão, sendo diversificados os produtos que podem ser utilizados para fins energéticos, podendo ser citado às folhas, galhos, serapilheiras, raízes, frutos e extrativos, assim como resíduos industriais de base florestal, tanto nas fases sólida quanto líquida.

Por fim, Brand (2010) explica que alguns pontos têm peculiaridades benéficas no uso da biomassa para a produção energética, podendo destacar: baixos teores de cinza e enxofre, ser um combustível renovável, contribui com a neutralização da emissão e fixação de gases poluentes, alta produtividade nas regiões tropicais e subtropicais, possibilidade de uso na forma sólida, líquida ou gasosa; e capacidade de geração de energia térmica, elétrica e mecânica, dentre outros.

3.3. Sistemas de colheita da madeira

A colheita de madeira, segundo Machado (2014) é definida como as operações realizadas no povoamento florestal, que visa preparar a madeira e levá-la ao ponto de transporte, usando técnicas e procedimentos previamente definidos, com qualidade, segurança

elevada produtividade, baixos custos e de forma ambientalmente correta, sendo composta pelas etapas de corte e extração.

Segundo Malinovski *et al.* (2014), a produtividade das operações de colheita da madeira sofre influência de diversos fatores, como: localização geográfica e extensão da área de trabalho; aspectos climáticos; capacidade de suporte do terreno; relevo; características do povoamento; capacitação do operador, dentre outros.

Sistema de colheita da madeira é definido por Machado (2014), como um conjunto de atividades integradas entre si, que proporcionam um fluxo constante e visando sua máxima utilização, e conseqüentemente, evitando os pontos de estrangulamento. Já Simões (2008) caracteriza como sendo um conjunto de atividades relacionadas que contribuem com único objetivo e que possui uma seqüência, lugar e objeto de trabalho.

Os sistemas de colheita da madeira são classificados, segundo FAO apud Malinovski *et al.* (2014) em cinco diferentes sistemas, conforme a madeira na fase de extração:

- a) Sistema de toras curtas (*cut-to-length*): Neste sistema, a árvore é derrubada e processada no interior do povoamento, e em seguida, a madeira é extraída para a margem do talhão ou pátio temporário na forma de toras com até seis metros de comprimento. As principais vantagens deste sistema correspondem ao menor grau de mecanização, menor impacto no solo, menor exportação de nutrientes devido a biomassa residual permanecer no talhão, facilidade na execução do desbaste e menor demanda de espaço para estocagem de madeira. Como desvantagens Leite *et al.* (2014) cita a menor produtividade e maior custo devido ao maior manuseio da madeira, além da dificuldade no aproveitamento da biomassa residual que fica espalhada no interior do talhão.

- b) Sistemas de toras longas (*tree-length*): Neste sistema, as árvores são derrubadas, desgalhadas e destopadas no interior do talhão, e em seguida, a madeira na forma de fuste é arrastada para a margem do talhão ou pátio temporário para a execução do processamento final da madeira. As principais vantagens correspondem à maior eficiência operacional quando comparado ao sistema anterior, menor custo de produção e boa aplicação em terrenos acidentados. Já as desvantagens, apresentadas por Leite *et al.* (2014), são: necessidade de um planejamento e organização mais

detalhada das operações, necessidade de maior grau de mecanização e dificuldade no aproveitamento da biomassa residual.

- c) Sistema de árvores inteiras (*full-tree*): Neste sistema, as árvores são derrubadas no interior do talhão, sendo em seguida, extraída para a margem do talhão ou pátio intermediário, onde ocorrerá o processamento completo da árvore. Destaca-se como vantagens, a maior facilidade na execução das atividades em terrenos planos e acidentados, menor custo de produção e facilidade no aproveitamento da biomassa residual que permanecem concentrados na margem do talhão. Como desvantagens citam-se a necessidade de maior grau de mecanização e planejamento das operações e a ocorrência de maior impacto ao solo em termos de compactação e erosão.
- d) Sistema de árvores completas (*whole-tree*): Neste sistema, a árvore é arrancada com parte de suas raízes e extraída para a margem do talhão ou pátio intermediário onde ocorre o processamento final da árvore. Como vantagem pode ser citada o melhor aproveitamento da árvore como matéria-prima, enquanto como desvantagens cita-se a baixa viabilidade quando comparado aos demais sistemas, necessidade de equipamentos de grande potência e especializado nesta atividade.
- e) Sistema de cavaqueamento (*chipping*): Neste sistema, as árvores são derrubadas e arrastadas até o cavaqueador para serem processadas, sendo posteriormente transportadas na forma de cavacos para o pátio de estocagem temporário ou diretamente para a indústria.

3.4. Sistemas de cavaqueamento de biomassa florestal

O cavaqueamento corresponde à redução do material em partículas menores, configurando-se na transformação da biomassa em cavacos. A conversão deste material aleatório em cavacos permite solucionar problemas de manuseio, a sua redução e a homogeneização para utilização na geração de energia (CANTO, 2009).

Leinonen (2004) afirma que os cavaqueadores florestais podem ser descritos em dois grupos: disco e tambor. Os cavaqueadores de disco possuem lâminas de facas ou martelos

inseridos sobre os discos, enquanto os cavaqueadores de tambor possuem algumas aberturas no tambor e equipados por facas ou martelos para realização do cavaqueamento.

De acordo com Pottie e Guimier (1985) apud Canto (2009), existe outro grupo de máquinas florestais que possuem martelos para uso no processamento do material, denominados de trituradores, produzindo cavacos irregulares e não sofrendo tanta influência de impurezas como ocorre nos cavaqueadores. Já os cavaqueadores de tambor, assim como os de disco, são recomendados para utilização em cavaqueamento de árvores recém-colhidas, sendo que os cavaqueadores de tambor são recomendados também para o cavaqueamento de biomassa residual (LEINONEN, 2004; ALAKANGAS *et al.*, 1999 apud CANTO, 2009).

É importante ressaltar que a característica da máquina influencia no rendimento durante o processamento da biomassa, sendo que uma das características mais importantes é a capacidade de deslocamento que pode ser autopropulsora por meio de reboques, tratores florestais ou sobre o chassi de caminhões (LEINONEN, 2004).

Apesar da existência de um sistema de colheita da madeira somente para a produção de biomassa, Machado (2014), diz que o cavaqueamento da biomassa pode ser realizado em todos os sistemas de colheita da madeira, quando se trata dos resíduos. Já Canto (2009) indica que o cavaqueamento dos resíduos pode ser melhor utilizado nos sistemas de colheita da madeira de toras curtas e de árvores inteiras.

3.4.1. Cavaqueamento de biomassa em sistema de colheita de toras curtas

O sistema de colheita da madeira de toras curtas (*cut-to-length*) é caracterizado pelo uso do *harvester* realizando a derrubada e processamento da madeira no interior do talhão e posteriormente extraídas pelo *forwarder* para a margem do talhão ou pátios intermediários (CANTO, 2009; SANTIAGO, 2013). Quando se adiciona um cavaqueador para o aproveitamento dos resíduos gerados na colheita da madeira, Leinonen (2004) diz que o beneficiamento dos resíduos e o seu aproveitamento podem ser realizados ainda no campo. No entanto, necessita-se de uma máquina para a realização da extração dos resíduos ou dos cavacos para a margem do talhão, pátios intermediários ou diretamente para a indústria.

O sistema de colheita deve ser alterado em suas funções para que se permita a realização do cavaqueamento, sendo então os resíduos não deixados nas trilhas por onde passam as máquinas *harvester* e *forwarder*, mas colocados ao lado, próximos à madeira empilhada, favorecendo assim o posterior carregamento.

Em seguida, para a realização da extração dos resíduos torna-se necessário que alterações sejam feitas na capacidade carga do *forwarder*, pelo fato dos resíduos serem mais volumosos e de menor densidade, visando assim contribuir para a redução dos custos de extração (LEINONEN, 2004).

O mesmo autor descreve ainda o ciclo das operações de aproveitamento da biomassa residual no sistema de toras curtas (Figura 2). As atividades iniciam-se com a aglomeração dos resíduos em fardos pela enfardadeira e a posterior remoção dos fardos de resíduos ou somente dos resíduos para a margem da estrada com o auxílio do *forwarder* adaptado, onde ocorre então, o carregamento e transporte dos fardos para a indústria ou o cavaqueamento do material para posterior transporte dos cavacos para a indústria ou consumidor final.

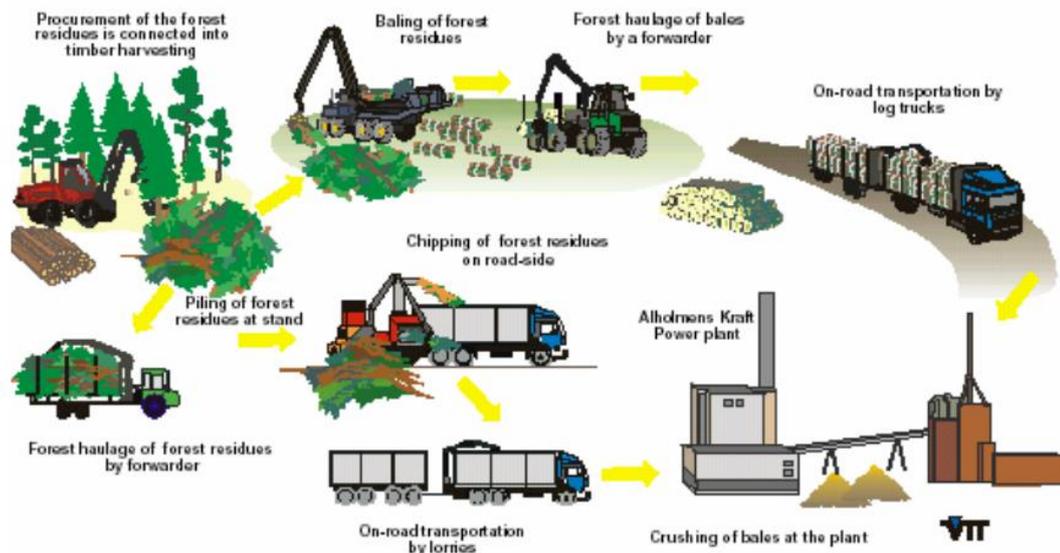


Figura 2. Cavaqueamento de biomassa em sistema de colheita de toras curtas.
Fonte. Leinonen (2004).

O cavaqueamento pode ser ainda realizado em pátios intermediários ou diretamente na indústria, sendo que quando realizado em pátios intermediários, os resíduos são levados pelos próprios *forwarders* ou veículos específicos de recolhimento dos resíduos visando transportá-lo para os pátios onde será então realizado o cavaqueamento. Outra forma é os resíduos serem levados até a margem do talhão pelo *forwarder* e posteriormente carregados nos veículos para serem transportados até a indústria, onde serão então processados e consumidos.

3.4.2. Cavaqueamento de biomassa em sistema de colheita de árvores inteiras

Para o cavaqueamento da biomassa residual no sistema de colheita da madeira de árvores inteiras (*full-tree*), as árvores são cortadas pelo *feller-buncher*, e em seguida arrastadas pelo *skidder* até a margem do talhão ou pátios intermediários, onde será realizado o processamento, ficando separados as toras e os resíduos (CANTO, 2009).

Como ilustrado na Figura 3, o cavaqueador normalmente é posicionado na margem do talhão ou em pátios intermediários para realização do processamento dos resíduos diretamente sobre os veículos de transporte e levados então para a unidade de consumo (LEINONEN, 2004; CANTO, 2009). Segundo Canto (2009), os trituradores (cavaqueadores que utilizam martelos) são os mais empregados neste sistema pelo fato de que o material, devido à forma de extração por meio de arraste pelo *skidder*, pode conter uma quantidade maior de impurezas.



Figura 3. Cavaqueamento de biomassa em sistema de colheita de árvores inteiras.
Fonte. Leinonen (2004).

3.5. Biomassa residual da colheita de madeira para produção de energia

Os resíduos florestais podem ser caracterizados como partes das árvores que são geradas e deixadas a campo na atividade de colheita da madeira, englobando os materiais como: casca, galhos, copas, árvores de menor diâmetro, árvores doentes, mortas e raízes (SOUZA, 2010).

Os resíduos são muito utilizados para gerar energia devido a sua capacidade calorífica, sendo que a geração de energia por resíduos florestais é bastante vantajosa, podendo contribuir na economia de outras fontes de energia (SILVA, 2001).

No Brasil, atualmente, é gerado aproximadamente 30 milhões de toneladas de resíduos de madeira, e deste total, a indústria madeireira contribui com 91% dos resíduos (TUOTO, 2009). No aproveitamento de povoamentos florestais, aproximadamente 20% de todo o volume da floresta compõem-se de resíduos que normalmente permanecem nas florestas (SILVA, 2001 e SFB, 2012).

Magossi (2007) diz que os resíduos gerados na floresta podem chegar a valores de 30 a 35% do volume de madeira produzido, sendo que em torno de 5% do volume é destinado para fins energéticos. De acordo com Tuoto (2009), em pesquisa com 84 indústrias madeireiras, definiu que pouco mais de um terço do volume de resíduos de madeira gerados são simplesmente queimados a “céu aberto” ou em incineradores industriais.

Brito *et al.* (1979) ao comparar os valores energéticos da madeira e dos resíduos da biomassa obtiveram que um hectare de floresta de *Eucalyptus saligna* com 8 anos de idade pode representar na casca, madeira fina e copa o equivalente entre 2,4 e 5,9 toneladas de óleo combustível. Por outro lado, Bauer (2001), em estudo realizado na colheita mecanizada de *Eucalyptus grandis* encontrou um volume de $16,17\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ de biomassa residual, enquanto Jacovine *et al.* (2001) apud Jacovine *et al.* (2005), constatou-se que em torno de $4,22\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ após a colheita da madeira permanecem no campo, somente em razão da atividade de desgalhamento.

O volume de resíduos florestais que são gerados após a colheita da madeira é afetada pela espécie florestal, idade de corte, intensidade de corte, classe de diâmetro da madeira definida para uso industrial, etc. (MAGOSSSI, 2007; SILVA *et al.* 2007).

Segundo Silva *et al.* (2007), o volume dos resíduos florestais variam em função dos parâmetros citados acima, sendo que para as plantações de *Pinus*, os resíduos podem representar de 5 a 15% do volume de toras.

Com base no estudo de Brand (2010), os resíduos de *Pinus* em florestas no estado de Santa Catarina podem atingir variados níveis como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Potencial produção de resíduos em florestas de pinus no estado de Santa Catarina.

Idade (anos)	Peso de galhos (ton/ha)	Peso de acículas (ton/ha)	Peso de copas (ton/ha)
12	27,0	10,0	8,0
16	46,0	14,0	10,0
24	58,0	28,0	4,0

Fonte. Brand (2010).

3.6. Fatores de influência na produção de biomassa residual

3.6.1. Tipo de material

De acordo com Brand (2007), os processos de oxidação acontecem durante a estocagem da madeira. Estas reações possuem influência de algumas condições devido a estocagem que ocorre de forma muito mais rápida nos cavacos.

Brand (2007) indica que o tipo da biomassa apresenta problemas na estocagem, como aumento da temperatura, menor eficiência na redução da umidade e perda de massa para a forma de cavacos, sendo que uma das saídas é a busca por outras técnicas de estocagem do material. A origem da biomassa possui grande importância sobre o poder calorífico do material, onde as costaneiras de pinus obtiveram melhores resultados de teor de umidade e poder calorífico quando comparado a resíduos de serraria.

Avaliando o tipo de material com base nas propriedades energéticas da biomassa de pinus, Furtado *et al.* (2012) afirma que os cavacos com casca possuem maior eficiência energética e apresentam baixo teores de umidade e de cinzas quando comparados somente à serragem e casca.

Em estudo realizado por Jirjis (2005) em relação ao potencial energético, o autor constatou que houve pequena variação durante dois a três meses de estocagem, sendo o potencial energético dependente do tempo de estocagem e independente do tamanho das partículas da biomassa e das características das pilhas.

Portanto, percebe-se a necessidade de controle sobre o tipo de material a ser estocado, de modo que a eficiência e o rendimento na conversão da biomassa em energia sejam aumentados. Para isso, o período de realização da colheita, o tempo de estocagem da biomassa e a origem do material podem apresentar influência na qualidade dos cavacos e na eficiência energética (BRAND *et al.*, 2011; BRAND *et al.*, 2012).

3.6.2. Formas de estocagem

As empresas consumidoras de cavacos operam de forma ininterrupta, necessitando de um abastecimento contínuo de biomassa cavaqueada como fonte energética, sendo os resíduos normalmente estocados a céu aberto, ou seja, expostos às condições climáticas e em grande pilhas até seu processamento final para utilização na geração de energia (LEINONEN, 2004).

Martí (2006) comenta que um aspecto de grande importância no aproveitamento da biomassa florestal diz respeito à sua concentração em grandes volumes, pois desta forma, o processamento e o transporte poderá ser economicamente viabilizado, favorecendo as operações de enleiramento e processamento do material.

Por outro lado, Savolainen e Bergren (2000) apud Leinonen (2004) citam que a forma de estocagem também pode afetar na contaminação do material, indicando que os resíduos devem ser estocados sem contato com o solo, evitando a sua contaminação. Por isso, o melhor local para a secagem da biomassa residual é um ambiente aberto, e quanto possível, com ventilação, porém sem contato com o solo. Além disso, as pilhas de resíduos não devem ser colocadas muito próximas uma das outras, evitando afetar o processo de secagem do material (LEINONEN *et al.* 2000, apud LEINONEN, 2004).

Já GARSTANG *et al.* (2002) mencionam que qualquer redução significativa na atividade biológica da biomassa durante a estocagem, por meio da respiração ou fermentação resultará no aumento da porcentagem de cinzas, sendo este processo irreversível e afetando a eficiência energética do material.

Ao analisar a forma de estocagem da biomassa, Brand (2007) constatou que algumas variações ocorrem no teor de umidade e no poder calorífico superior do material, evidenciando a influência da forma de estocagem sobre tais parâmetros.

Segundo Neuhof *et al.* (2014), os cavacos de madeira devem ser estocados para que ocorra uma rápida secagem, a fim de aumentar a vida útil, evitar a redução do poder energético e garantindo a qualidade dos cavacos em relação ao seu poder calorífico. Além disso, constatou uma perda de 2 a 4% na qualidade do material ao mês quando não é realizada a correta estocagem. No entanto, quanto à estocagem a campo, os autores citam que a melhor forma é não realizar o processamento do material e deixá-lo "in natura", evitando a provável perda de 2 a 4% de seu potencial energético. Já Scholz (2005) diz que a estocagem do material ao abrigo da chuva pode gerar uma redução do teor de umidade em torno de 10%.

3.6.3. Tempo de estocagem

De acordo com Brand (2007), quando se trata de poder calorífico, o rendimento de energia pela biomassa sofre alteração no tempo, sendo que o rendimento segue uma tendência de aumento, atingindo seu ápice, e em determinado momento, ocorre a redução do rendimento energético com a degradação do material. Neste mesmo estudo, Brand (2007) analisou as alterações energéticas dos resíduos de biomassa de pinus e eucalipto, concluindo que o período de estocagem pode afetar o potencial energético do material, assim como a variação de metabólitos e componentes dos cavacos.

Souza *et al.* (2012) afirmam que os resíduos da floresta de pinus apresenta altos teores de umidade, e por consequência, baixo índices de poder calorífico, não sendo indicado para o uso como fonte energética “in natura”. Além disso, Leinonen (2004) diz que os teores de umidade são reduzidos durante o período de tempo e que os materiais devem permanecer por certos períodos estocados.

Apesar de condições particulares da biomassa florestal, outros fatores podem ainda influenciar no período de estocagem do material, como a lei de oferta e demanda desta matéria-prima, bem como como o preço momentâneo podem acarretar em um aumento ou redução durante o período de estocagem (Brand, 2007).

3.6.4. Condições climáticas

As condições climáticas, principalmente em relação à temperatura e precipitação, afetam diretamente na velocidade e intensidade das propriedades da biomassa residual estocada no campo (BRAND, 2007).

Leinonen (2004) afirma que a biomassa deve ser consumida o mais breve possível, evitando assim a incidência de chuvas sobre o material quando armazenados a campo, lembrando que em períodos de condições climáticas favoráveis, como no verão, a biomassa pode permanecer no campo por um maior período para melhorar os índices do teor de umidade.

Em estudo realizado por Brand (2007), as variações climáticas influenciaram nas alterações do material em relação à umidade, sendo que as maiores perdas de umidade ocorreram durante o verão e os menores no inverno. Além disso, mesmo concretizando-se

esta perda de umidade durante o período de estocagem mais favorável, o mesmo material retornou a absorver umidade, aumentando seus teores no período menos favorável.

3.6.5. Transporte e logística

De acordo com Silva *et al.* (2007), a madeira é um insumo de baixo rendimento financeiro, sendo então o custo de transporte relativamente elevado e dependente diretamente da distância. Segundo Machado (2000), como fatores de influência no transporte da biomassa, cita-se: tipos de veículos, distância de transporte, condição das rotas, equipamentos, tempos de carregamento e descarregamento e capacidade do veículo.

Canto *et al.* (2011), indica que o dimensionamento da frota para a realização do transporte de cavacos da biomassa, acarreta na falta de veículos e culmina na ociosidade do sistema, podendo inviabilizar a atividade de cavaqueamento.

3.7. Características físicas e químicas dos cavacos

Segundo Souza *et al.* (2012), para a utilização da biomassa é importante o conhecimento das características físicas e químicas do material, podendo influenciar no processo de produção dos cavacos e no rendimento energético.

3.7.1. Teor de umidade

O teor de umidade é a principal propriedade que afeta a eficiência e rendimento energético da biomassa como combustível, devendo ser um fator a ser considerado (HEDING, 1984; THÖRNQVIST, 1986; NURMI, 1992 e 1995; GARSTANG *et al.*, 2002 e SOUZA, 2010).

Além de ser uma característica que não possui dificuldades para ser mensurado, o teor de umidade é sempre um importante parâmetro a ser avaliado nos resíduos que serão destinados para uso energético (SOUZA, 2010). É um dos fatores de maior influência na capacidade de geração de energia produzida pela madeira refere-se à presença de água, que pode causar um efeito negativo na produção energética (CANTO, 2009).

Segundo Souza *et al.* (2012), o teor de umidade tem grande importância quando se trata da utilização de materiais lignocelulósicos para a geração de energia, devendo ser

considerado o poder calorífico dos materiais, apresentando a tendência de proporção inversa ao conteúdo de água presente no material.

Souza *et al.* (2012) explica que o teor de umidade dos resíduos e as condições de campo após a colheita da madeira é elevado, enquanto Brand (2007) define que a umidade é reduzida até o quarto mês. Os teores de umidade observados em árvores de diferentes espécies recém-colhidas podem variar de 40 a 70% (BRITO e BARRICHELO, 1982, NURMI, 1995), sendo que, em alguns casos, estando próximos ou ultrapassando o teor de umidade crítico para o uso da biomassa na geração de energia, devendo possuir um limite em torno de 60%.

Segundo Brand (2007), independente do tipo de biomassa, é necessário obter os menores teores de umidade, maior perda de massa e ganho energético em menor tempo, reduzindo com isso, os custos de operação. Neste aspecto, apresenta-se que a melhor eficiência do material é atingida quando o teor de umidade está abaixo de 45% em base úmida e deixa de ser um combustível quando atinge teores acima de 65% (ELETROBRÁS, 1993).

3.7.2. Densidade

A densidade representa a quantidade de massa que está presente em um determinado volume de material, enquanto a densidade aparente indica a quantidade de massa em determinada unidade de volume, considerando o teor de umidade presente na amostra (BRAND, 2010). A densidade aparente além de ser influenciada pelo teor de umidade é susceptível à influência da granulometria das partículas, quando realizado por meio da metodologia de determinação a granel. Sendo assim, a densidade aparente a granel será maior quanto menor for o tamanho dos cavacos acomodados no recipiente.

Vale *et al.* (2002), apresenta que as madeiras de baixa densidade tem queima rápida e menor produção direta de energia por unidade de volume, sendo que quando se trata de altas densidades ocorre o inverso, porém com dificuldade no início da queima do material.

Segundo Souza *et al.* (2012), densidade da biomassa residual da colheita de madeira difere dos demais materiais, como os resíduos de costaneiras, pó de serra, refilo e cepilhos, possivelmente pela presença de árvores mortas e os tocos presentes.

Em estudo realizado por Brand (2010), foi constatado que a densidade aparente apresentada por cavacos de *Pinus taeda* com casca compreenderam uma média de 319 kg.m^{-3} (teor de umidade de 58% na base úmida), e para serragem um valor de 323 kg.m^{-3} (teor de umidade de 56% na base úmida). Já Pincelli (2011) encontrou uma média para resíduo de

eucalipto de $193,5 \text{ kg.m}^{-3}$ e para resíduo de pinus um valor médio de $207,3 \text{ kg.m}^{-3}$ (teor médio de umidade de 15% na base úmida).

3.7.3. Poder calorífico

O poder calorífico corresponde à quantidade de energia térmica total que é liberada na combustão de determinada quantidade de massa ou determinado volume de combustível. Portanto, a determinação deste valor é teórico pelo fato de que sua determinação ocorre em um recipiente hermeticamente fechado em que a amostra possui 0% de teor de umidade, sendo que neste processo, a energia perdida na formação de água pelo hidrogênio que está no combustível não é perdida por ser um recipiente fechado (BRAND,2010).

Souza *et al.* (2012) diz que a energia obtida com o material sofre influência da qualidade deste material, sendo um dos fatores de maior influência no rendimento energético. Segundo Brand (2007), nas épocas de primavera e verão a produção de calor aumenta, por estar relacionada aos menores teores de umidade, tornando-se maior o poder calorífico e teor de extrativos.

Além disso, o poder calorífico é dependente de algumas variáveis que condicionam a geração de calor da biomassa, como a composição química e o tipo de biomassa, bem como o teor de umidade presente e o teor de cinzas gerado posteriormente à queima (BRAND, 2010). Em estudo realizado por Brand (2007), os valores de poder calorífico superior para *Pinus taeda* com casca variou entre $4.565 \text{ kcal.kg}^{-1}$ à $4.766 \text{ kcal.kg}^{-1}$, enquanto para *Ecalyptus dunnii* com casca variou entre $4.759 \text{ kcal.kg}^{-1}$ e $4.633 \text{ kcal.kg}^{-1}$.

Brito e Barrichelo (1979) indicam que uma das principais características dos combustíveis corresponde ao seu poder calorífico, sendo que no caso da madeira pode variar de $3.000 \text{ kcal.kg}^{-1}$ a $5.400 \text{ kcal.kg}^{-1}$. A resina que está presente nas espécies florestais tem poder calorífico de $9.460 \text{ kcal.kg}^{-1}$ e, portanto, favorecer na obtenção de um poder calorífico maior para espécies que possuem um maior teor de resina (coníferas).

Vale *et al.* (2002), estudando diversos materiais como fonte de energia, afirmam que os melhores resultados de poder calorífico foram obtidos pelo resíduo da colheita, obtido na medição do poder calorífico superior. Para biomassa recém-colhida foram observados valores médios de poder calorífico superior de $4.839 \text{ kcal.kg}^{-1}$ para madeira; $5.008 \text{ kcal.kg}^{-1}$ para acículas e $4.925 \text{ kcal.kg}^{-1}$ para casca (THÖRNQVIST e GUSTAFSSON, 1983; THÖRNQVIST, 1985 apud SOUZA *et al.* 2012; NURMI, 1995 e QUIRINO *et al.*, 2004).

3.7.4. Composição química

3.7.4.1. Teor de voláteis

Os voláteis compreendem a parte do combustível que se evapora quando aquecido a 900° C. e tendo importância na combustão. Após a evaporação, misturam-se com o oxigênio do ar e entram em combustão (PEREIRA, *et al.* 2000). De acordo com Pereira *et al.* (2000) e Smith (1976) apud Brito e Barrichelo (1978), aqueles combustíveis que apresentam altos teores de substâncias voláteis são mais fáceis e rapidamente queimados.

A proporção entre os componentes voláteis e carbono fixo influencia as características de queima do combustível pelo fato dos componentes voláteis, quando aquecidos, saírem do material e se queimarem rapidamente na forma gasosa (Brito e Barrichelo 1978). Os mesmos autores citam que a escolha de madeiras para carvões de melhor qualidade e maior rendimento está ligada aos teores de carbono fixo, substâncias voláteis e cinzas que o compõem, sendo que o teor de voláteis e cinzas, devem ser baixos.

Em estudo realizado por Souza (2010), os valores dos materiais voláteis de resíduos de colheita, pó de serra, refilos e cepilhos diferiram de resíduos de costaneiras, sendo que as maiores médias encontradas para estes resíduos podem ser influenciadas mais uma vez pela presença de cascas. Já Vale *et al.* (2002) estudando diversas espécies florestais, verificou que as mesmas apresentam valores de materiais voláteis que variaram entre 74,6% e 81,2%, enquanto para a casca, os teores foram reduzidos, com variação de 65,2% a 76,9%.

Brito e Barrichelo (1977) estudando espécies de eucaliptos encontraram valores no teor de voláteis que variou entre 73,5% e 78,2%, onde os maiores teores de voláteis foram encontrados na madeira quando comparado à casca.

Por fim, em trabalho desenvolvido por Souza *et al.* (2012), analisando diferentes tipos de biomassa de pinus, indica que os maiores teores foram encontrados para pó de serra (em serraria) com valor de 86,24% e na sequência os teores de voláteis para resíduos de colheita de pinus e cepilho com valor de 85,09%.

3.7.4.2. Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo refere-se à quantidade de carvão gerado pelo material que queima no estado sólido. Alguns combustíveis com teor mais elevado são preferíveis, porque queimam mais lentamente (PERREIRA *et al.*, 2000).

Em trabalho realizado com *Picea abies*, Nurmi (1999) apud BRAND (2007), averiguou que, na estocagem de resíduos florestais durante um período de nove meses, houve um aumento significativo no conteúdo de carbono, sendo isso atribuído à perda de voláteis durante a estocagem do material.

De acordo com Brito e Barrichelo (1977), os maiores teores de carbono fixo produzidos em carvões são decorrência da influência da lignina que possui em torno de 65% de carbono elementar (C) presente nas árvores, gerando uma correlação e dependência do teor de carbono fixo em função da quantidade de lignina.

Em trabalho realizado por Souza *et al.* (2012), o autor constatou que teor de carbono fixo apresentado é de 14,06% para resíduos de colheita florestal de pinus. Já Vale *et al.* (2002) obteve valor médio para as várias espécies de 20,7% de carbono fixo, com uma variação entre 17,93 e 25,2%, enquanto para a casca os valores variaram dentre 33,7% e 20,3% de teor de carbono fixo, estando os valores próximos aos indicados por Brito e Barrichelo (1977), que em estudo com cinco espécies de eucaliptos, encontraram valores dentre 21,6% e 25,6%.

3.7.4.3. Teor de cinzas

De acordo com Brand (2010), o conteúdo de cinzas existente na biomassa corresponde ao teor de materiais inorgânicos que não reagem com a combustão do material, apresentando-se em forma de cinzas no final da combustão e possuindo variações conforme a posição na árvore, idade, espécie e local de crescimento.

Todos os materiais, como costaneiras, pó de serra, cepilhos, resíduos da colheita e refilos são estatisticamente iguais para o teor de cinzas, podendo ser ressaltado como uma característica positiva para o uso destes em caldeiras (SOUZA, 2010). Os valores variaram entre 0,23% em material com quatro meses de estocagem até 1,98% em material com seis meses de estocagem analisando (Brand, 2007).

Brand (2007) indica ainda que os valores médios encontrados de teor de cinzas para *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii* com casca foi de 0,42% e 0,85% respectivamente, citando ainda a possibilidade de aumento nestes teores quando existe a contaminação com outros materiais.

A variação do teor de cinzas nas partes das plantas foi estudado por Brand *et al.* (2009) que obtiveram valores médios de teor de cinzas de 0,75%, 3,13%, 0,90%, 0,85% para

copa, acículas, galhos e casca, respectivamente. Esta variação pode ocorrer devido às acículas que realizam a fotossíntese transformando nutriente em componente vegetal (BRAND, 2010).

Em outro estudo, Brand (2010) apresenta valores de 15,17% no teor de cinzas para a casca de pinus, 1,87% para o cavaco verde, 0,57% para cavaco seco e 3,33% para os resíduos da colheita e de desbaste.

3.8. Estudo de tempos e movimentos

Segundo Barnes (1977), o estudo de tempos e movimentos objetiva realizar um trabalho a fim de cumprir as metas de organização e melhorando desta forma, a eficiência humana. Machado (1984) comenta o estudo de tempos e movimentos na colheita de madeira como aquele que procura encontrar a melhor técnica de se executar uma operação, determinando o tempo padrão dentro dos aspectos técnicos e econômicos.

O estudo de tempos e movimentos tem influência fundamental na intenção de melhorar os métodos operacionais e as condições de trabalho, permitindo análises do processo produtivo, das atividades, da relação homem-máquina e das operações de modo geral. Além disso, o controle da produção e dos custos operacionais é essencial na organização de um empreendimento, influenciando sobre os rendimentos, as condições de trabalho e o aproveitamento da mão-de-obra e máquina (MACHADO,1984).

Barnes (1977) cita os três métodos de estudo de tempos e movimentos:

- Tempo Contínuo: os tempos de cada elemento do ciclo operacional são obtidos por subtração, pois durante a cronometragem não se para o cronômetro. Este método é útil para pesquisas nas quais se deseja identificar as diferentes atividades parciais e sua sequência de ocorrência.
- Tempo Individual: os tempos de cada elemento do ciclo são obtidos diretamente, pois o cronômetro é zerado ao final do ponto de medição. Neste caso, é possível reconstituir a sequência cronológica dos ciclos.
- Multimomento: neste caso não se medem os tempos do ciclo, mas sim sua frequência em intervalos de tempos fixos, sendo neste método possível de observar vários trabalhadores simultaneamente e mensurar atividades parciais de pequena duração.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

A pesquisa foi realizada no município de Porto União, nas áreas operacionais de uma empresa do planalto norte do estado de Santa Catarina, com uma altitude média de 795 m (Figura 4).

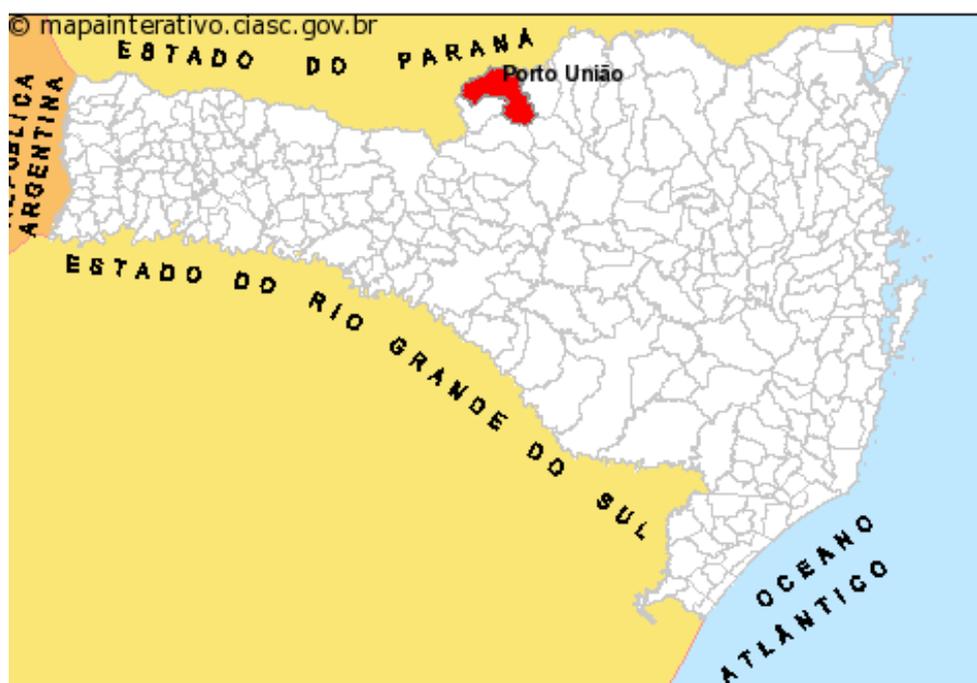


Figura 4. Localização do município de Porto União, SC.

Fonte: Centro de Informação e Automação do Estado de Santa Catarina (2015).

O clima predominante da região de estudo, de acordo com o sistema de classificação de Köppen é do tipo Cfb, subtropical mesotérmico úmido sem estação seca definida, temperatura média anual de 17,9°C, precipitação média anual de 1.523,9 mm e umidade relativa do ar média de 74,9% (SAWINSKY, 2000).

Os dados meteorológicos obtidos durante o período de coleta dos dados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados meteorológicos mensais obtidos durante o período de coleta dos dados da região estudada.

Período	Data (mês/ano)	Precipitação (mm)	Temperatura Média (°C)	Umidade Média (%)
1	Setembro/2014	96,4	20,8	78,5
2	Outubro/2014	96,4	20,8	78,5
3	Novembro/2014	157,8	21,4	78,9
4	Dezembro/2014	292,6	22,3	81,5
5	Janeiro/2015	121,8	23,3	82,6
6	Fevereiro/2015	184,4	22,2	85,7
7	Março/2015	189,4	21,3	83,0

Fonte: EPAGRI (2015).

O solo predominante na região de estudo é o Latossolo vermelho escuro, considerado muito profundo e em sua maioria acima de 200 cm, com ocorrência ainda de solos Glei Húmico e Glei pouco Húmico, Cambissolo Bruno Húmico, Cambissolo Bruni, Cambissolo e Cambissolo Húmico (CROCE, 2002). O relevo é caracterizado com ondulado e fortemente ondulado, como declividade média variando de 15 a 25 graus.

Os dados desta pesquisa foram coletados em povoamentos florestais da empresa com as características apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Características do povoamento estudado.

Características do Povoamento	Valor
Espécie	<i>Pinus taeda</i>
Idade (anos)	14 – 15
Regime de corte	Corte raso
Espaçamento (m)	2,5 x 2,5
Produtividade (m ³ .ha ⁻¹)	650
Volume médio individual por árvore (m ³)	0,50
Volume médio de biomassa residual (ton.ha ⁻¹)	50

4.2. Sistema de colheita da madeira

O sistema de colheita da madeira utilizado pela empresa, que possibilita o aproveitamento da biomassa residual é o de árvores inteiras (*full tree*), composto pelos tratores florestais *feller buncher*, *skidder* e *harvester* (Tabela 4).

O *feller-buncher* realizava as operações de derrubada e empilhamento das árvores em feixes no interior do talhão, sendo em seguida estas árvores arrastadas para a margem do talhão (estaleiro) pelo *skidder*. Em seguida, o *harvester* realizava o processamento final da madeira (desgalhamento, destopamento, traçamento e empilhamento) das toras com diferentes

sortimentos, sendo posteriormente realizado o carregamento e transporte final da madeira para o mercado consumidor e própria indústria.

Tabela 4. Sistema de colheita da madeira utilizado pela empresa.

Etapa	Máquina	Especificação Técnica
Corte (<i>Feller Buncher</i>)		Tigercat 870C (esteira) Comprimento: 5,75 m. Largura: 3,43m. Peso: 31,3 ton. Potência: 300 hp. Cabeçote: Cabeçote ST5702 340°
Arraste (<i>Skidder</i>)		Tigercat 635D 6x6 (Pneus) Comprimento:9,35m. Largura:3,33m. Peso: 21,43 ton. Potência: 260 hp. Area da Gara: 1,95m ² . Abertura da Garra: 3,81m.
Processamento (<i>Harvester</i>)		Caterpillar 320D FM (esteira) Comprimento: 4,48m. Largura: 3,08m. Peso: 26,43 ton. Potência: 147 hp. Cabeçote: Logmax 7000C

Após a realização das operações de colheita da madeira, a biomassa residual (galhos, acículas, cascas e toras quebradas que não possuíam os padrões de qualidade para comercialização ou consumo) ficava distribuída ao longo das margens dos talhões, aguardando as operações de enleiramento e cavaqueamento dos resíduos para posterior transporte e uso como fonte de energia na caldeira da fábrica.

Na Figura 5 pode ser observado as diferentes partes da secção de uma árvore, mostrando os sortimentos para uso na indústria (papel e celulose), comercialização no mercado (serraria e laminação) e a parte da biomassa residual aproveitada para energia.

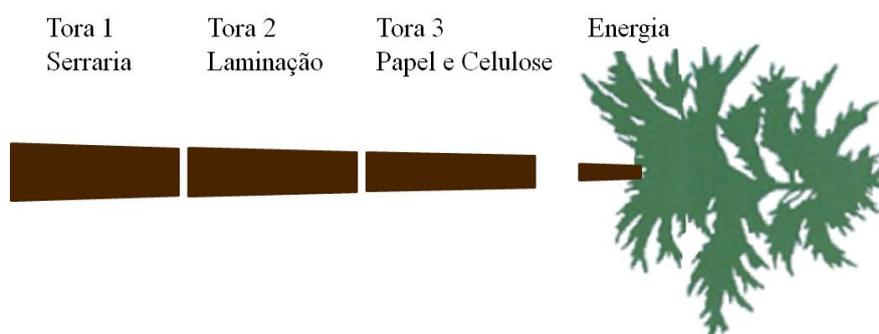


Figura 5. Sortimentos e resíduos para energia da colheita de madeira de *Pinus*.

4.3. Sistema de cavaqueamento

O sistema de cavaqueamento da biomassa residual da colheita de madeira estudado tinha composição de uma carregadora de rodas, uma escavadora hidráulica e um cavaqueador de resíduos (Tabela 5).

A carregadora de rodas equipada com garfo frontal era responsável pela catação e remonte dos resíduos distribuídos ao longo das margens do talhão, sendo empilhados em montes espaçados em média 100 m entre si. Em seguida, a escavadora hidráulica equipada com garra realizava o carregamento e abastecimento da mesa do cavaqueador com os resíduos, que na sequência, eram processados pelo cavaqueador e depositados diretamente sobre o veículo de transporte.

O cavaqueador estudado era da marca Vermeer, modelo HG 6000 TX, equipado com motor Caterpillar C18 ATAAC de 6 cilindros, potência nominal de 630 HP, capacidade do tanque de combustível de 1.135 litros de diesel e consumo médio de 131 litros por hora de trabalho.

O cavaqueador de resíduos era operado por meio de controle remoto, em uma distância média de segurança de 90 m. O sistema de picagem do cavaqueador possuía um tambor responsável pelo processamento do material com diâmetro de 94 cm e velocidade de rotação média de 1.050 rpm, com sistema de 10 martelos para processamento da biomassa, sendo utilizado martelos devido as impurezas existentes no material durante a realização do cavaqueamento.

Tabela 5. Sistema de cavaqueamento da biomassa residual da colheita de madeira.

Etapa	Máquina	Especificações Técnicas
Catação e remonte (<i>Carregadeira de rodas</i>)		Carregadeira 924 K Comprimento: 7,37 m. Largura: 2,54 m. Peso: 11,55 ton. Potência: 135 hp. Tanque: 195 l.
Abastecimento do cavaqueador (<i>Escavadeira hidráulica</i>)		Escavadeira R210LC Comprimento: 3,65 m. Largura: 3,39 m. Peso: 23,16 ton. Potência: 150 hp. Tanque: 340 l.
Cavaqueamento dos resíduos (<i>Cavaqueador</i>)		Veermer HG 6000 TX. Comprimento: 14,1m. Peso: 30390,0 kg. Potencia: 630 hp. Tanque: 1165 l. Consumo: 131 l/h.

4.4. Procedimento amostral

Para a avaliação operacional do cavaqueador na execução do processamento da biomassa residual foi realizado um estudo de tempos e movimentos. Inicialmente foi realizado um estudo piloto para definição do número mínimo de observações do ciclo operacional da máquina. Foram analisados 54 ciclos operacionais em oito turnos de trabalho atendendo a amostragem mínima necessária estabelecida pela metodologia proposta por Barnes (1977) com uma probabilidade de erro de 5%, por meio da expressão 1:

$$n_{\text{ideal}} = \frac{s_x^2 * t_{0,05}^2}{E^2} \quad (1)$$

Em que: n = número de observações; s_x^2 = variância dos dados x; $t_{0,05}^2$ = valor tabelado da distribuição de student a 5% de probabilidade; e E^2 = erro admitido.

A avaliação da qualidade da biomassa residual da colheita de madeira foi realizada a partir de dois fatores experimentais: tempo de estocagem (contendo os tratamentos de 7, 30,

60, 90, 120, 150 e 180 dias) e forma de estocagem da biomassa residual (com os tratamentos de biomassa residual estocada a campo e cavacos estocados em abrigo na fábrica).

Os tratamentos inseridos no fator tempo de estocagem corresponderam aos períodos em que o material permaneceu estocado. A testemunha foi obtida aos sete dias de estocagem, pelo motivo de que a realidade da logística de colheita não permite a utilização deste material em um período mais curto, devido à necessidade da retirada da madeira pelo transporte para que posteriormente seja feito o beneficiamento da biomassa residual. Os demais tratamentos corresponderam ao período em que permitiu a caracterização da biomassa em um horizonte condizente com a situação prática que ocorria na empresa.

Para a formação das pilhas de biomassa foi utilizado material residual homogêneo obtido dentro de um mesmo talhão e na mesma data. A primeira forma de estocagem foi a biomassa residual da colheita de madeira (tocos, copas de árvores, galhos, acículas) armazenada a campo, cujo material não processado, permaneceu empilhado em sete diferentes pilhas distribuídas ao longo da margem do talhão, com volume médio de 13,7 m³ e expostos às condições ambientais (Figura 6 b). No momento do cavaqueamento, os resíduos foram então transportados até o local do cavaqueador para processamento do material, que ocorreu aos sete dias (testemunha), 30, 60, 90, 120, 150 e 180 dias após finalizado as operações de colheita da madeira.

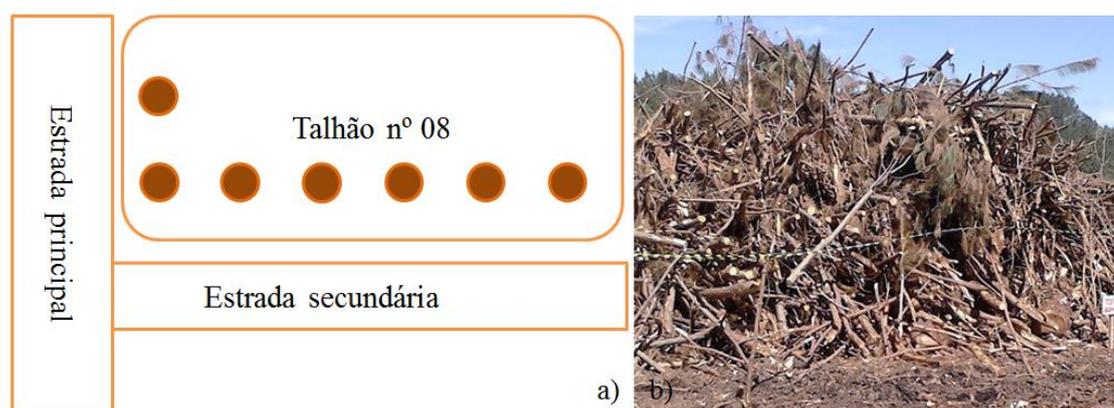


Figura 6. a) Alocação das pilhas a campo no talhão; b) Pilha de biomassa residual da colheita de madeira estocada no campo.

As amostras de cavacos foram retiradas após o processamento da biomassa estocada a campo atendendo as necessidades de segurança da empresa. Destes cavacos gerados foram coletados cinco quilogramas, sendo cada quilograma, uma repetição dos tratamentos. As

amostras foram acondicionadas em sacolas plásticas de polietileno para manter suas características para transporte até laboratório onde realizou-se as análises físicas.

A segunda forma de estocagem foi o armazenamento dos cavacos processados na fábrica, a partir da biomassa residual da colheita de madeira (tocos, copas de árvores, árvores mortas, galhos e acículas) aos sete dias, cujo material foi processado e transportado para a fábrica, ficando estocado em local coberto e protegido da chuva em uma pilha de cavacos com volume médio de 8,5 m³ (Figura 7).

Nesta pilha foram então retiradas as amostras dos cavacos aos sete dias (testemunha), 30, 60, 90, 120, 150 e 180 dias de estocagem para realização das análises laboratoriais. Para cada tratamento realizado foram coletados cinco quilogramas, correspondendo cada quilograma à uma repetição. As amostras foram acondicionadas em sacolas de polietileno para posterior transporte e análise em laboratório.



Figura 7. Pilha de cavaco estocado na fábrica e sentido de obtenção da amostra.

O delineamento do estudo, as variáveis e demais parâmetros utilizados neste trabalho foram definidas em parceria com a *Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg am Neckar* (HFR, Alemanha), com base em conhecimentos e estudos realizados nesta instituição. Os cavacos obtidos a partir da biomassa residual da colheita de madeira estocada em campo e estocada na fábrica foram levados ao Laboratório de Energia da Biomassa da Universidade Federal do Paraná (UFPR) para a realização das análises físicas e químicas.

O organograma das atividades realizadas é apresentado na Figura 8.

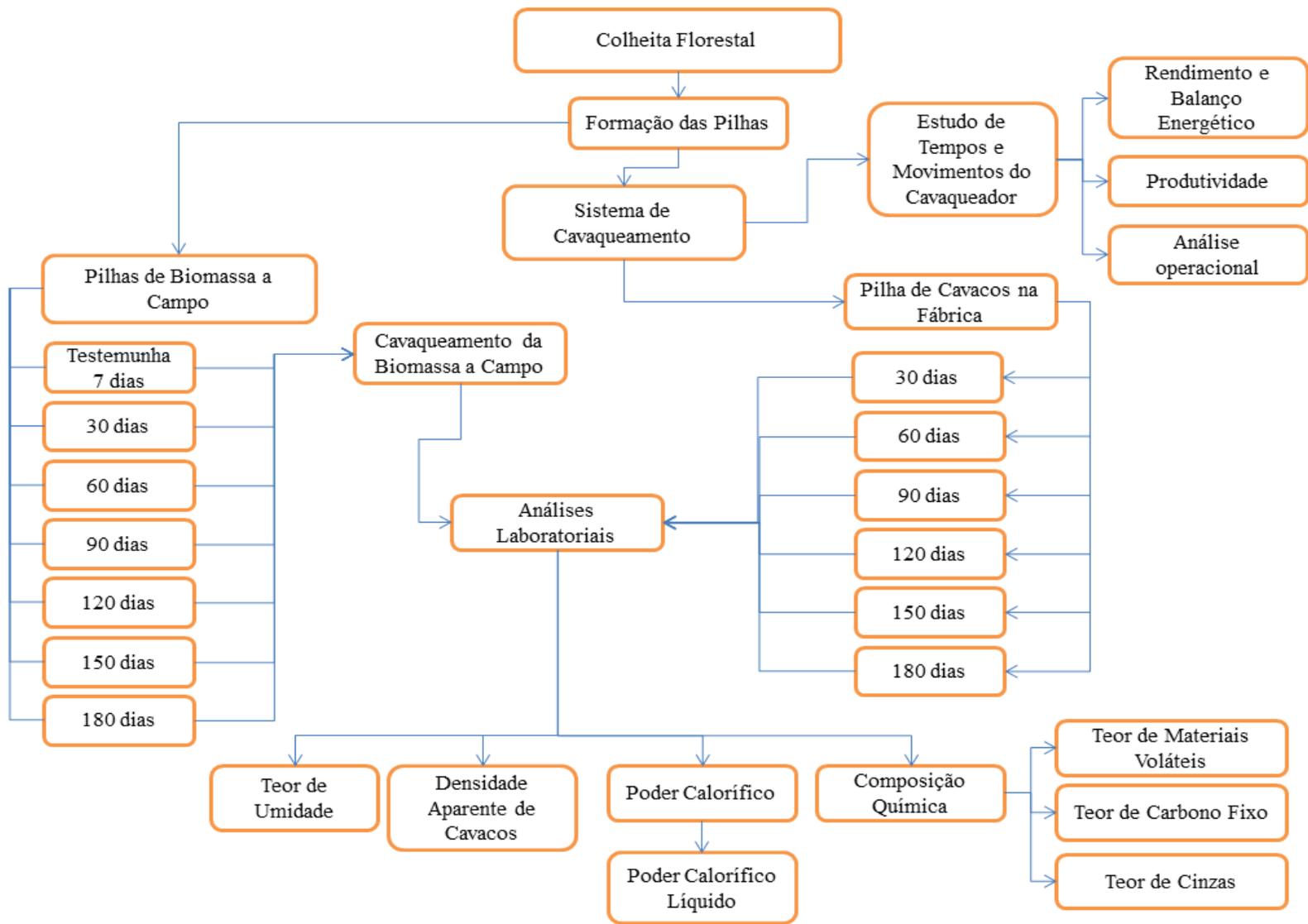


Figura 8. Organograma da realização da pesquisa.

4.5. Avaliação operacional do cavaqueador de resíduos

A avaliação operacional do cavaqueador de resíduos foi realizada por meio de um estudo de tempos e movimentos, pelo método de tempos contínuos e com uso de um cronômetro sexagesimal, prancheta e formulário específico desenvolvido para este estudo.

O ciclo operacional do cavaqueador foi subdividido nas seguintes etapas:

- Aguardando abastecimento da mesa (AA): Correspondeu ao tempo em que o cavaqueador aguardava o abastecimento da mesa de entrada de resíduos pelo carregador.
- Processamento dos resíduos (PR): Correspondeu ao tempo em que o cavaqueador estava realizando o processamento os resíduos de forma efetiva.
- Movimentação do cavaqueador (MC): correspondeu ao tempo referente aos pequenos ajustes realizados para a movimentação da máquina base do cavaqueador, visando melhorias da posição em relação aos veículos de transporte dos cavacos e em relação às pilhas de resíduos, etc.

Foram ainda obtidos os tempos das interrupções operacionais e não operacionais ocorridas durante a realização do estudo.

De posse dos resultados do estudo de tempos e movimentos, foi determinado a disponibilidade mecânica, a disponibilidade técnica, a eficiência operacional, a produtividade e o rendimento e balanço energético do cavaqueador na execução do processamento da biomassa residual da colheita de madeira.

4.5.1. Determinação da disponibilidade mecânica

A disponibilidade mecânica é a porcentagem do tempo de trabalho programado em que o cavaqueador estava mecanicamente apto a realizar o trabalho produtivo, desconsiderando os tempos em manutenção corretiva e/ou preventiva, sendo obtida pela expressão 2:

$$DM = \frac{TP - TM}{TP} \times 100 \quad (2)$$

Em que: DM = Disponibilidade mecânica (%); TP = tempo programado para o trabalho (hora); e TM = tempo de manutenção mecânica preventiva e corretiva (hora).

4.5.2. Determinação da disponibilidade técnica

A disponibilidade técnica foi determinada em percentagem, como a relação entre o tempo em que a máquina estava disponível tecnicamente para a operação, descontados os tempos de interrupções mecânicas, operacionais e não operacionais, sendo obtido pelo uso da expressão 3:

$$DT = \frac{(TP - TM) - TT}{TP - TM} \times 100 \quad (3)$$

Em que, DT = Disponibilidade técnica (%); TP = tempo programado para o trabalho (hora); TM = Tempo de manutenções mecânicas (hora) e; TT = tempo em paradas técnicas (hora).

4.5.3. Determinação da eficiência operacional

A eficiência operacional refere-se à percentagem do tempo efetivamente trabalhado em relação ao tempo total programado para o trabalho, sendo determinada pela expressão 4:

$$EO = \frac{TE}{TP} \times 100 \quad (4)$$

Em que: EO = eficiência operacional (%); TE = tempo de trabalho efetivo (hora); e TP = tempo programado para o trabalho (hora).

4.5.4. Determinação da produtividade

A produtividade foi obtida pela relação entre a quantidade de cavacos produzidos em cada ciclo operacional, em toneladas, medido no momento da entrada do veículo de transporte na balança da fábrica e o tempo efetivo consumido pelo cavaqueador no processamento da biomassa naquele veículo de transporte. A carga líquida de cavacos transportada foi obtida pela subtração entre o Peso Bruto Total Combinado do veículo no momento de entrada na fábrica e a tara do veículo no momento de saída da fábrica. A produtividade foi determinada pela expressão 5:

$$Prod. = \frac{\sum PD}{\sum HE} \quad (5)$$

Em que: Prod. = Produtividade média do cavaqueador (ton.h^{-1}); PD = volume processado (toneladas); HE = Horas efetivas (horas).

4.5.5. Rendimento e balanço energético

O rendimento energético indica a massa de combustível necessária em uma unidade de potência para a produção de uma unidade de volume, sendo utilizada no cálculo do rendimento energético a expressão 6 (Lopes, 2007 citado por SIMÕES *et al.*, 2010):

$$RE = \frac{CE}{PE} \quad (6)$$

Em que: RE = rendimento energético ($g \text{ kW}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$); CE = consumo específico de combustível ($g \text{ kW}^{-1} \cdot \text{he}^{-1}$); e PE = produtividade efetiva ($\text{m}^3 \cdot \text{he}^{-1}$).

O consumo específico de combustível expressa o consumo de combustível por unidade de potência nominal da máquina, sendo obtido pela multiplicação da densidade do combustível ($g \cdot L^{-1}$) pelo consumo de combustível da máquina por hora efetiva ($L \cdot \text{he}^{-1}$) e dividido pela potência nominal da máquina (kW), conforme a expressão 7:

$$CE = \frac{D \times C}{PT} \quad (7)$$

Em que: CE = consumo específico de combustível ($g \text{ kW}^{-1} \cdot \text{he}^{-1}$); D = densidade do combustível ($g \cdot L^{-1}$), sendo considerado $0,85 \text{ g} \cdot L^{-1}$ para diesel; C = consumo de combustível por hora efetiva ($L \cdot \text{he}^{-1}$) e; PT = potência nominal do cavaqueador (kW).

O balanço energético do cavaqueador no processamento da biomassa residual foi obtido pela razão da produtividade energética, obtida a partir da utilização da biomassa combustível para energia, em relação ao consumo de combustível para a produção de determinada quantia de cavacos, em $\text{Kcal} \cdot \text{ton}^{-1}$. Foi ainda considerado o poder calorífico superior do óleo diesel de $10.676,4 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$, e segundo a Petrobras (2014), a densidade do óleo diesel está entre $0,82 \text{ Kg} \cdot l^{-1}$ e $0,865 \text{ Kg} \cdot l^{-1}$, sendo adotado o valor de $0,85 \text{ kg} \cdot l^{-1}$ nos cálculos. Para a obtenção do balanço energético foi utilizada a expressão 8:

$$BA = \frac{PE}{CE} \quad (8)$$

Em que: BA = Balanço energético (unidades); PE = produtividade energética ($\text{Kcal} \cdot \text{ton}^{-1}$); CE = consumo energético ($\text{Kcal} \cdot \text{ton}^{-1}$).

4.6. Avaliações físicas e químicas dos cavacos

As características físicas e químicas dos cavacos produzidos a partir das diferentes formas e tempo de estocagem foram avaliadas a partir das seguintes variáveis: teor de umidade, densidade aparente, poder calorífico e análise química imediata.

4.6.1. Teor de umidade

Para determinação do teor de umidade, as amostras de cavacos foram inicialmente pesadas em balança analítica de precisão de 0,1 mg para determinação do peso úmido. Em seguida, foram levadas para secagem em estufa a 105°C até obtenção de peso constante, e em seguida, levadas ao dessecador para obtenção do peso seco atendendo as exigências das normas NBR 14929 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e ASTM E871.

O teor de umidade foi determinado pela expressão 9:

$$TU(\%) = \frac{PU - PS}{PU} \times 100 \quad (9)$$

Em que: TU (%) = Teor de umidade na base úmida (%); PS = Massa da amostra úmida (g); PU = massa da amostra seca (g) em estufa a 105°C.

4.6.2. Densidade aparente de cavaco

A determinação da densidade aparente das amostras de cavacos, que corresponde ao peso que os cavacos exercem em função do seu volume, foi definida de acordo com as exigências das normas NBR 14984 da ABNT e ASTM E873. Para isso, foi utilizado um recipiente com volume conhecido para obtenção do volume do material com umidade original, determinado seu volume, e em seguida, com base em seu peso medido com auxílio de balança analítica, obteve-se a densidade aparente do material por meio da expressão 10.

$$D_a = \frac{10 \times W \times (100 - Y)}{H \times A} \quad (10)$$

Em que: D_a = Densidade aparente; W = massa da amostra de cavacos; Y = corresponde ao teor de umidade dos cavacos, em porcentagem; H = altura média dos cavacos no tubo, em centímetros; e A = área da seção transversal do tubo.

4.6.3. Poder calorífico

O poder calorífico superior foi realizado com uso de uma bomba calorimétrica da marca IKA-WERNE C5000, atendendo às Normas ASTM E 711 e DIN 15104. As amostras foram secas, trituradas e então, foi obtido uma sub-amostra de 2 gramas, que foi então inserida na bomba calorimétrica para obtenção do poder calorífico superior do material.

O poder calorífico líquido corresponde ao poder calorífico gerado pela madeira em condições reais de umidade. Para tanto, descontou-se do poder calorífico inferior a quantidade de energia consumida para realizar a evaporação da umidade presente nos cavacos.

O Poder calorífico líquido foi obtido com a expressão 11 (DOAT, 1977, apud BRITO E BARRICHELO, 1982):

$$PCLu = \left\{ \frac{PCI - (6 \times W)}{100 + W} \right\} \times 100 \quad (11)$$

Em que: PCLu = Poder calorífico líquido; PCI = Poder calorífico inferior; W = umidade da madeira em base seca.

Para obtenção do poder calorífico líquido, foi obtido o poder calorífico inferior que correspondeu a energia gerada, sendo descontada a quantidade de água de umidade e a quantidade de água formada durante a combustão do hidrogênio de constituição da madeira, que foi então medida em função da quantidade gerada de água durante a determinação do poder calorífico superior.

O poder calorífico inferior foi obtido com base na expressão 12:

$$PCI = PCS - \left(600 \times 9 \times \frac{\%H}{100} \right) \quad (12)$$

Em que: PCI = Poder calorífico inferior; PCS = Poder calorífico superior; %H = teor de hidrogênio.

4.6.4. Composição química

A composição química dos materiais foram obtidos pela determinação dos seguintes parâmetros: materiais voláteis, teores de cinzas e de carbono fixo, conforme especificado pelas normas ASTM E872 e ASTM E1534.

4.6.4.1 Teor de materiais voláteis

O teor de materiais voláteis é quantificado a partir da fração de massa do material que volatilizou durante o aquecimento de uma amostra padronizada e seca a 0% de teor de umidade, até temperaturas de aproximadamente 900 °C por 10 minutos em um forno mufla.

O teor de materiais voláteis foi determinado pela expressão 13:

$$TV = \frac{M_2 - M_3}{M_2} \times 100 \quad (13)$$

Em que: TV = Teor de voláteis; m_2 = massa da amostra antes de ser aquecida; m_3 = massa da amostra após aquecimento.

4.6.4.2 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi obtido por diferença após a obtenção da massa resultante do teor de voláteis, sendo descontada a massa do teor de cinzas, com a submissão da amostra a 900 °C em mufla, por meio da expressão 14:

$$TC = \frac{(M_2 - M_4)}{(M_1 - M_3)} \times 100 \quad (14)$$

Em que: CF = Carbono fixo; m_1 = massa de amostra seca + cadinho (g); m_2 = massa de amostra após mufla a 900 °C + cadinho (g), sem materiais voláteis; m_3 = massa do cadinho sem material (g); e m_4 = massa de cinzas + cadinho após 6 horas na mufla (g).

4.6.4.3 Teor de cinzas

O teor de cinzas foi obtido a partir da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos em um forno tipo “mufla”, sob rígido controle de massa, temperatura e tempo. As amostras de cavacos, sem os materiais voláteis, foram colocadas em cadinhos e levados ao interior da mufla a uma temperatura de 700°C por seis horas. Ao final do procedimento, foram então obtidas as cinzas, sendo determinado pela expressão 15:

$$CZ = \frac{(M_4 - M_3)}{(M_1 - M_3)} \times 100 \quad (15)$$

Em que: CZ = Teor de cinzas (%); m_1 = massa de amostra seca + cadinho (g); m_3 = massa do cadinho sem material (g); e m_4 = massa de cinzas + cadinho após 6 horas na mufla (g).

4.7. Análise estatística

Os dados de tempos e movimentos do sistema de cavaqueamento dos resíduos da colheita de madeira foram submetidos a análises de normalidade pelo teste Shapiro-Wilk empregando o *software* estatístico Assistat 7.7 beta, a nível de 5% de probabilidade de erro.

O experimento foi realizado com o uso de dois fatores definindo um experimento Bifatorial, com delineamento de inteiramente casualizado. Para o fator forma de estocagem houve dois tratamentos, enquanto para o fator tempo de estocagem houve seis tratamentos com testemunha, sendo que para cada um dos tratamentos houve cinco repetições.

Os valores referentes aos parâmetros físicos e químicos dos cavacos foram submetidos à análise estatística empregando a ANOVA ao nível de 5% de probabilidade. Posteriormente, os valores médios foram comparados em relação aos diferentes períodos de armazenagem dos cavacos em ambas as situações, ou seja, cavacos obtidos a partir da biomassa em campo e cavacos obtidos na estocagem em fábrica, por meio do Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, com uso do *software* Assistat 7.7 beta.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análise operacional do cavaqueador florestal

Na análise operacional do cavaqueador durante o processamento dos cavacos foram obtidos em oito turnos de trabalho, 54 ciclos operacionais ou veículos de transporte carregados, atendendo à amostragem mínima necessária de 46 ciclos, ao nível de 95% de probabilidade, assim como a normalidade dos dados à 5% de probabilidade (APÊNDICE A).

5.1.1. Estudo do ciclo operacional

Os tempos do ciclo operacional do cavaqueador de resíduos são apresentados na Figura 9, sendo determinada a percentagem de tempos produtivos e improdutivo. Como pode ser observado, o tempo produtivo correspondeu a 46% do tempo total disponível da máquina para a operação, caracterizando baixa percentagem de execução do efetivo trabalho, estando o cavaqueador no tempo restante analisado, como improdutivo.

O valor observado é inferior ao encontrado por Remler *et al.* (1999), que analisou vários sistemas de cavaqueamento de biomassa florestal e obteve um tempo produtivo de 60%, explicado neste caso, pelo alto tempo de paradas apresentado pelo sistema. Segundo Spinelli e Visser (2009), tanto no processamento de resíduos, quanto em outras atividades florestais, boa parte das paradas ocorre por atrasos organizacionais, que indicam um papel importante da gestão da operação, fato este também identificado neste estudo.

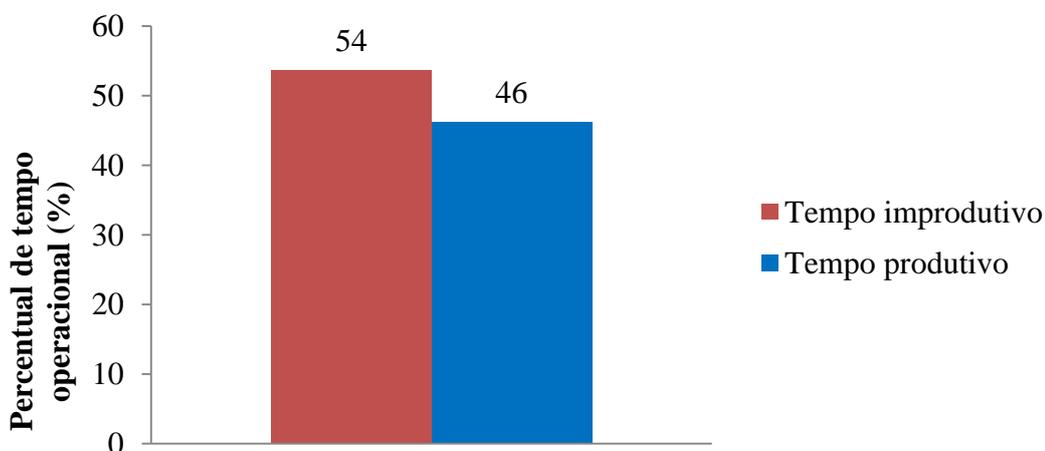


Figura 9. Distribuição percentual de tempos produtivos e improdutivo.

Na Figura 10 é apresentada a distribuição percentual do ciclo efetivo operacional do cavaqueador durante a operação de processamento de resíduos. Como pode ser visto a etapa que consumiu maior tempo na execução da operação foi o processamento da biomassa, com 93% do tempo total, indicando que na maior parte do tempo de ciclo operacional efetivo, o cavaqueador esteve realizando o processamento dos resíduos em cavacos.

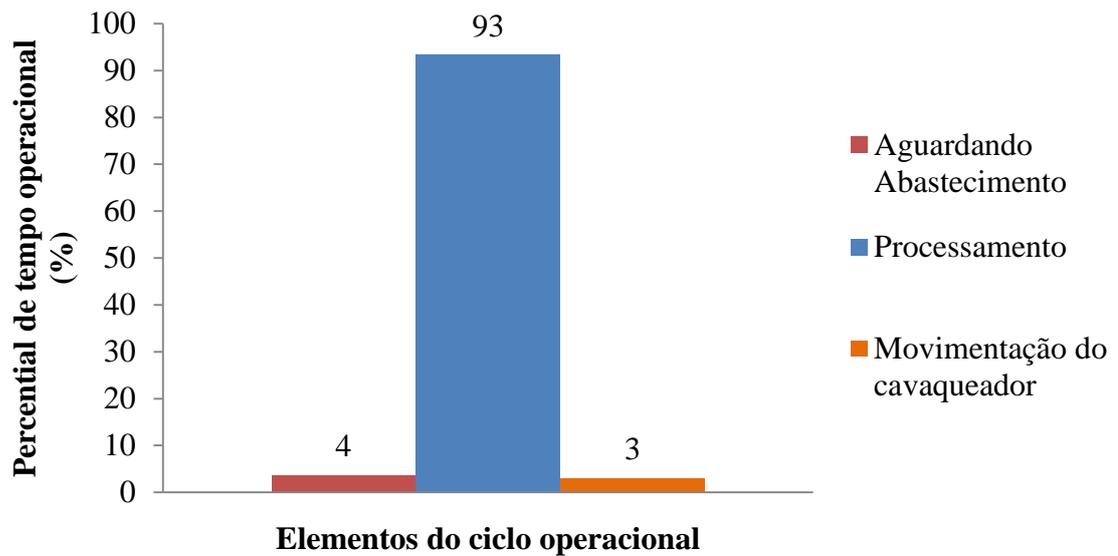


Figura 10. Distribuição percentual dos elementos de ciclo operacional efetivo do cavaqueador de resíduos.

As demais etapas corresponderam às atividades aguardando o abastecimento (4%), onde o cavaqueador esteve apto a realizar a atividade de processamento dos resíduos, porém, não era abastecido para iniciar o processamento e a movimentação do cavaqueador ocupando 3% do tempo total produtivo, demonstrando agilidade no ajuste do posicionamento do cavaqueador em relação à pilha de resíduos.

As causas dos tempos improdutivos (54%) são apresentadas na Figura 11, referindo-se a interrupções operacionais e não operacionais no cavaqueamento dos resíduos, contemplando as manutenções, aguardo de veículos de transporte, deslocamentos do cavaqueador e tempo para refeições.

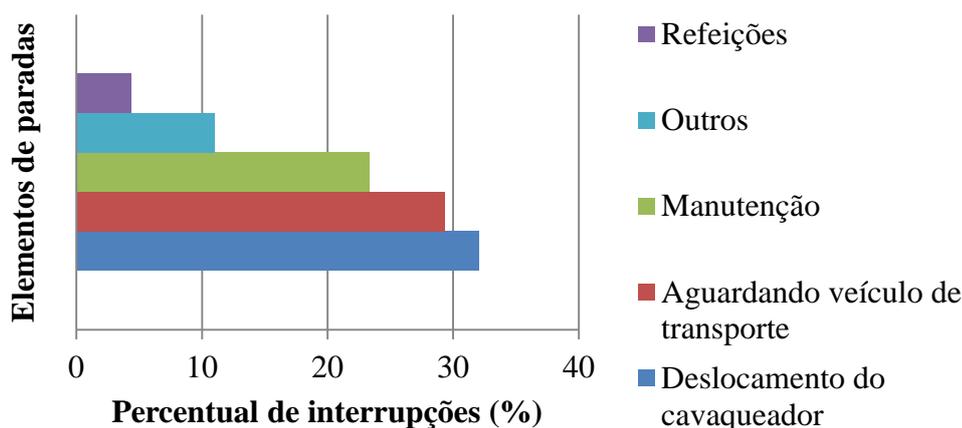


Figura 11. Distribuição percentual das interrupções operacionais no tempo improdutivo.

Como pode ser verificado, dentre o tempo de interrupções, 34% ocorreu devido ao deslocamento interno e externo do cavaqueador, onde 23% deste tempo refere-se ao deslocamento interno no talhão e 11% ao deslocamento externo entre talhões. Apesar de Spinelli e Hartsough (2001) indicarem que, máquinas auto propelidas possuem maior mobilidade, como é o caso deste cavaqueador, tal percentagem de tempo pode ser considerada elevada pela frequência destas atividades, bem como em função do baixo volume e localização das pilhas que acarretou na necessidade de maior movimentação do cavaqueador, e por consequência, aumento do tempo de deslocamentos e redução da produtividade.

É importante ressaltar que os deslocamentos não podem ser extintos neste sistema, porém, podem ser reduzidos a níveis inferiores caso sejam alterados os volumes das pilhas e a sua melhor localização estratégica na margem dos talhões.

Em seguida, destaca-se o tempo em que o cavaqueador permaneceu aguardando veículos de transporte, com 29% do tempo de interrupções operacionais. O tempo médio de carregamento foi de 30 minutos, sendo que depois de finalizada a operação de cavaqueamento e carregamento, o próximo veículo de transporte chegava para ser carregado em média 25 minutos após a saída do veículo anterior, demonstrando claramente o problema de logística. Este tempo corresponde a aproximadamente 83% do tempo necessário para realizar o carregamento de um veículo de transporte

Desroches *et al.* (1993) observaram 40% do tempo como pausas, sendo que a maior influência foi devido ao tempo de aguardo de veículos pelas grandes distâncias de transporte até o local de consumo, esta influência foi constatada neste sistema também, ocorrendo um sub dimensionamento do número de veículos de transporte. De acordo com Spinelli e Visser

(2009), cavaqueadores que descarregam diretamente em veículos de transporte criam determinada dependência, resultando na principal condição para a ocorrência de atrasos organizacionais e contribuindo para o aumento do tempo de interrupções.

Com isso, evidencia-se a existências de problemas na logística de transporte, onde a quantidade de veículos não está dimensionada corretamente para atender a produção do cavaqueador de resíduos e a distância de transporte.

A etapa de manutenção também contribui com as interrupções, afetando 23% do tempo total do ciclo operacional. Para tanto, considerou-se as manutenções tanto do cavaqueador quanto do carregador que realizava o abastecimento, sendo que a manutenção de uma destas máquinas ocasionava a parada de todo o sistema e interferiu consequentemente na produtividade.

Dentre as manutenções no sistema, a manutenção corretiva do cavaqueador (Figura 12) acarretou em 51% do tempo total de manutenções, enquanto a manutenção preventiva do cavaqueador obteve 21% do tempo de manutenções. As principais causas de paradas para manutenção do cavaqueador foram as trocas de peneiras e de filtros de óleo. Já para o carregador, 21% de todo o tempo de manutenções foram constatados na manutenção corretiva e em torno de 7% para a preventiva, afetados pela substituição da garra e adição de óleo hidráulico.

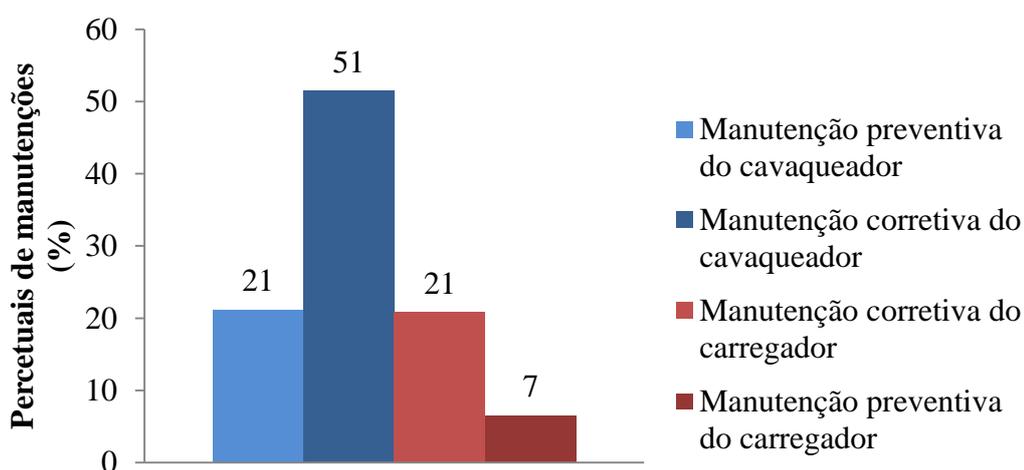


Figura 12. Distribuição percentual de manutenções.

Com base em um estudo com diversos sistemas de cavaqueamento da biomassa florestal, Remler *et al.* (1999) constataram que as paradas do cavaqueador atingiram 19% em

espera, 14% de ociosidade e 7% de movimentação para troca de local de trabalho, indicando menores tempos de paradas em relação ao sistema avaliado neste trabalho.

Os elementos do ciclo operacional compreendido como “outros” correspondeu as seguintes interrupções: preparação de início de atividade (PIA); interrupções pessoais (INP); verificação do cavaqueador (VEF); abastecimento do cavaqueador (ABP); abastecimento do carregador (ABC); e transporte do sistema de cavaqueamento (TR), que somados corresponderam a 7% do ciclo operacional total.

Apesar de pouco afetar a produtividade do sistema de cavaqueamento, algumas das paradas poderiam ser evitadas ou reduzidas, como é o caso do transporte do sistema de cavaqueamento e interrupções pessoais, possibilitando assim, o aumentando da produtividade.

5.1.2. Disponibilidade mecânica, disponibilidade técnica e eficiência operacional.

Na Tabela 6 são apresentados os tempos efetivos em que o cavaqueador permaneceu disponível para a operação e o tempo em manutenção preventiva e corretiva. Como pode ser observado, dentre o tempo total programado para a operação, o cavaqueador permaneceu 86% disponível para o trabalho, representando portanto, a disponibilidade mecânica durante a realização do estudo.

Tabela 6. Distribuição percentual de disponibilidade mecânica, disponibilidade técnica e eficiência operacional.

Turno	NV (veic./dia)	HP (h)	HE (h)	DM (%)	DT (%)	EO (%)
1	8,0	8,0	4,88	92	62	57
2	9,0	8,0	4,17	99	53	52
3	6,0	8,0	3,65	84	55	46
4	6,0	7,9	3,42	100	43	43
5	5,0	8,0	2,90	82	44	36
6	8,0	8,0	3,53	76	55	41
7	8,0	8,2	4,35	100	53	53
8	7,0	8,0	2,87	67	54	36
Média	7,1	8,0	3,72	86	52	46
Desvio Padrão	1,4	0,1	0,7	12	6	8

Em que: NV = número de veículos carregados; HP = Horas programadas; HE = Horas efetivas de trabalho; DM = disponibilidade mecânica; DT = Disponibilidade técnica; EO = Eficiência operacional.

A maior causa da indisponibilidade mecânica observada correspondeu à manutenção corretiva do cavaqueador. No entanto, apesar da elevada percentagem de tempo improdutivo, pouco fora perdido com manutenção mecânica, indicado pelo bom índice de disponibilidade mecânica (86%) para o cavaqueador, acordando com o obtido por Barreta *et al.* (2005).

Com maiores percentagens de manutenção, Canto *et al.* (2011) obtiveram em seu estudo 28% do tempo com manutenções mecânicas e uma disponibilidade de 72%, sendo estes valores menores aos obtidos neste trabalho. Porém, mesmo estando próximo aos valores indicados por Barreta *et al.* (2005), verificou-se um sombreamento do tempo de manutenções mecânicas pelo tempo de aguardo de veículo de transporte, onde parte das manutenções mecânicas foram realizadas nos períodos de aguardo de veículo de transporte.

A disponibilidade técnica do sistema de cavaqueamento da biomassa residual foi de 52% do tempo total do ciclo operacional, onde a máquina estava apta para o trabalho. Este índice foi afetado negativamente pelos tempos de aguardo dos veículos de transporte e deslocamento do cavaqueador.

Ao analisar a eficiência operacional do sistema de cavaqueamento de resíduos foi possível perceber a necessidade de melhorias no planejamento da operação, pois obteve-se uma eficiência operacional de apenas 46% em relação ao tempo total disponível da máquina para a operação, enquanto no restante do tempo (54%), a máquina permaneceu inoperante, onde do tempo total, apenas 14% representou o período de manutenção mecânica.

Remler *et al.* (1999) relata os resultados de diversos sistemas estudados na Alemanha, onde obteve-se valores entre 60% e 63% de eficiência operacional, enquanto Canto *et al.* (2011) observou em seu estudo no estado do Pará uma eficiência operacional de 51%, com valores próximos aos obtidos neste estudo.

Dentre os principais fatores que influenciaram negativamente a ocorrência das interrupções destaca-se o tempo de aguardo dos veículos de transporte, como apresentado por Cremmer (2008) com até 40% e Canto *et al.* (2011) com 24%. Além disso, Canto *et al.* (2011) apresentam que, os deslocamentos que ocorrem durante a movimentação entre as pilhas de resíduos compreenderam um tempo significativo de inoperância da máquina.

5.1.3. Produção e produtividade do cavaqueador de resíduos

A produção do cavaqueador de resíduos por turno de trabalho foi de 218,6 toneladas, perfazendo uma quantidade média de 7,1 veículos carregados por turno de trabalho. A

produtividade média do cavaqueador de resíduos por hora de trabalho foi de 27,3 toneladas em um turno de 8 horas, sendo que a produtividade efetiva, desconsiderando as interrupções operacionais e não operacionais, obteve uma média de 59,2 toneladas por hora efetiva.

Na Tabela 7 é apresentada a produção por turno e produtividade média do cavaqueador, onde é possível verificar um tempo efetivo de trabalho de 3,7 horas, ou seja, mostrando que o equipamento opera menos que a metade do tempo disponível para o turno de 8 horas, o que evidencia a necessidade de melhorias no planejamento operacional.

Tabela 7. Produção e produtividade média do cavaqueador de resíduos por turno de trabalho.

Turno	PT (t/dia)	NV	HP (h)	HE (h)	PR (t/h)	PE (t/h.efetiva)	EO (%)
1	257,1	8,0	8,0	4,9	32,3	52,7	61
2	255,3	9,0	8,0	4,2	31,9	61,2	52
3	185,1	6,0	8,0	3,6	23,2	50,7	46
4	204,7	6,0	7,9	3,4	25,8	59,9	43
5	172,8	5,0	8,0	2,9	21,5	59,6	36
6	222,1	8,0	8,0	3,5	27,8	62,9	44
7	261,0	8,0	8,1	4,3	31,8	60,0	53
8	191,0	7,0	8,0	2,9	23,9	66,5	36
Média	218,6	7,1	8,0	3,7	27,3	59,2	46
Desv Padrão	35,5	1,4	0,1	0,7	4,3	5,2	8
Total	1749,1	57,0	64,1	29,7	218,2	473,5	

Onde: PT = produção do turno; NV = número de veículos carregados; HP = Horas programadas do turno; HE = Horas efetivas trabalhadas; PR = Produtividade por hora; PE = Produtividade Efetiva; EO = Eficiência Operacional.

Com a produção média de 27,3 toneladas de cavacos por hora de trabalho, temos a produção de uma tonelada no intervalo de 2 minutos de tempo decorrido e uma produção efetiva de uma tonelada de cavaco por minuto de efetivo trabalho. Estes resultados de produtividade deste sistema foram superiores aos observados por Spinelli e Hartsough (2001), onde estudando diversos sistemas de cavaqueamento na Europa obtiveram um tempo médio de 10 minutos para a produção de uma tonelada de cavacos.

Quando se analisa os dados de produtividade efetiva e eficiência operacional em conjunto, observa-se que estas variáveis não possuem boa correlação (Figura 13). Isso indica que outros fatores estão influenciando o sistema, podendo ser destacado as condições climáticas, a qualidade do material e a experiência dos operadores.

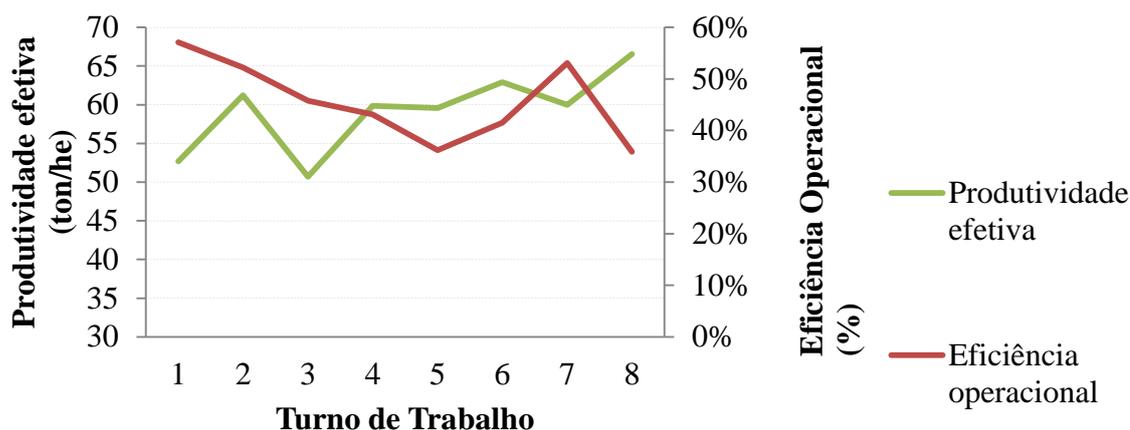


Figura 13. Relação dentre de produtividade efetiva e eficiência operacional.

Conforme Röser *et al.* (2012), Pajouja (2011, apud RÖSER *et al.*, 2012), Van Belle (2006) e Spinelli e Hartsough, (2001), dentre muitos fatores influentes na produtividade dos cavaqueadores florestais, pode existir uma grande variação em função do tipo de matéria-prima utilizada no processo. E Röser *et al.* (2012) citam ainda a qualidade do material processado e o tamanho da peneira utilizada na máquina como fatores de grande importância e influentes na produtividade do cavaqueador.

5.1.4. Rendimento e balanço energético

Considerado uma produção média do cavaqueador de 218,6 toneladas de resíduos e um consumo médio de combustível de 465,9 litros por turno de trabalho, obteve-se então um consumo de 2,2 litros de diesel por tonelada produzida. Já em relação ao consumo horário de combustível, o valor médio foi de 58,1 litros/hora de trabalho e 128,3 litros/hora efetiva de trabalho, valor aproximado ao descrito pelo fabricante 131 litros/hora.

O consumo energético por hora efetiva de trabalho do cavaqueador de resíduos é indicado na Tabela 8, com um valor médio de 65,9 g.Kw.he⁻¹, e o maior valor obtido foi de 103,2 g.Kw.he⁻¹ em 2,9 horas de trabalho.

Com uma média de 1,1 g.Kw.ton⁻¹, o rendimento energético variou de 0,7 g.Kw.ton⁻¹ a 1,5 g.Kw.ton⁻¹, com amplitude de 0,8 g.Kw.ton⁻¹. Os dados mostraram que existe uma grande variação no rendimento energético, justificado pela inconstância da produtividade da máquina. Portanto, ficou evidente a influência de algumas variáveis, como a logística de

transporte, as paradas para manutenção mecânica e os deslocamentos das máquinas do sistema no consumo e rendimento energético.

Tabela 8. Rendimento energético do cavaqueador de resíduos.

Turno de trabalho	NV	HP (h)	HE (h)	CT (l/ton)	CH (l/h)	CE (g.Kw.he⁻¹)	RE (g.Kw.ton⁻¹)
1	8	8,0	4,88	1,8	57,6	34,9	0,7
2	9	8,0	4,17	1,9	61,6	51,2	0,8
3	6	8,0	3,65	2,6	60,7	65,7	1,3
4	6	7,9	3,42	1,7	43,6	53,3	0,9
5	5	8,0	2,90	2,8	59,7	103,2	1,7
6	8	8,0	3,53	1,9	52,6	61,1	1,0
7	8	8,2	4,35	2,2	70,6	55,3	0,9
8	7	8,0	2,87	2,4	58,3	102,5	1,5
Média	7,1	8,0	3,72	2,2	58,1	65,9	1,1
Desv Padrão	1,4	0,1	0,7	0,4	7,7	24,5	0,4

NV = Número de veículos carregados; H.P. = Horas Programadas; HE = Horas Efetivas trabalhadas; CT = Consumo por Tonelada; CH = Consumo por Hora; CE = Consumo específico; RE = Rendimento Energético.

O consumo médio de energia do cavaqueador florestal para a produção de uma tonelada de cavacos foi de 19.776 kcal.ton⁻¹, enquanto a geração de energia obtida dos cavacos atingiu com o poder calorífico líquido médio de 2.304 kcal.kg⁻¹, perfazendo então uma produção energética média dos cavacos de 2.304.630 kcal.ton⁻¹.

Portanto, o balanço energético define que a produção energética de uma tonelada de cavacos é superior 116 vezes ao valor consumido de energia pelo cavaqueador florestal, indicando considerável viabilidade de uso do sistema de processamento da biomassa residual para a produção energética.

5.2. Avaliações químicas e físicas dos cavacos

5.2.1. Teor de umidade

A partir da análise realizada pelo teste Dunnett, ao comparar o valor da testemunha em relação aos tratamentos dos resíduos estocados a campo, pôde-se verificar que este não diferiu significativamente apenas os tratamentos de 30, 90 e 120 dias. Quando se trata da testemunha com relação aos tratamentos estocados na fábrica, houve diferença significativa em todas as comparações.

Os tratamentos referentes aos cavacos estocados na fábrica apresentaram uma redução no teor de umidade, estando abaixo de 40% aos 60 dias, comprovando uma redução nesta característica, considerando que o valor apresentado pela testemunha foi de 53% (Tabela 9).

Portanto, pelos resultados obtidos é possível comprovar uma estabilização dos valores de umidade no cenário de estocagem dos cavacos na fábrica a partir de 60 dias com o tratamento 2, até o tratamento 6, com 180 dias (Tabela 9), atingindo um teor próximo a 30% e diferenciando-se da testemunha em aproximadamente 20%. Enquanto o teor de umidade para os cavacos estocados na fábrica reduziram, na estocagem a campo, os teores tenderam a aumentar o valor de umidade presente nos resíduos.

Tabela 9. Valores médios para teor de umidade da biomassa residual estocada a campo e cavacos estocados na fábrica.

Tratamento	Tempo de Estocagem (dias)	Procedimentos de Estocagem					
		Biomassa a campo			Cavacos na fábrica		
		Média (%)	Teste Tukey	Teste Dunnett	Média (%)	Teste Tukey	Teste Dunnett
Testemunha	7	53,03			53,03		
T1	30	50,14	aB		45,02	bA	*
T2	60	47,09	aB	*	35,77	bB	*
T3	90	57,49	aA		32,61	bB	*
T4	120	58,32	aA		30,04	bB	*
T5	150	60,69	aA	*	31,14	bB	*
T6	180	60,39	aA	*	31,02	bB	*

Em que: Teste de Tukey: letras iguais não diferem estatisticamente; letras minúsculas para comparação na linha (forma de estocagem); letras maiúsculas para comparação na coluna (tempo de estocagem). Teste Dunnett: médias com “*” diferem estatisticamente da testemunha.

Em relação ao procedimento de estocagem, a variação dos resultados indicou um aumento ocorrido na estocagem a campo, sendo que após ser reduzido o teor de umidade para 50% e 47% aos 30 e 60 dias, respectivamente, aos 90 dias, o teor de umidade atingiu valores próximos a 60%, sendo que a partir deste momento, ocorrem algumas variações dos valores de teor de umidade, porém sem causar diferenças significativas na curva durante o período estudado, como mostrado na Figura 14.

É importante ainda ressaltar que, o teor de umidade apresentou uma variação e tendência inversa na comparação entre os cenários. No cenário referente ao resíduo estocado no campo, houve aumento do teor de umidade com o decorrer do tempo e posterior

estabilização, enquanto os cavacos estocados na fábrica tenderam a reduzir até determinado período de tempo, com posterior estabilização dos valores. Esta diferença no teor de umidade pode ser explicada quando observada também os dados de precipitação, que ajudou a manter e aumentar o teor de umidade dos resíduos a campo.

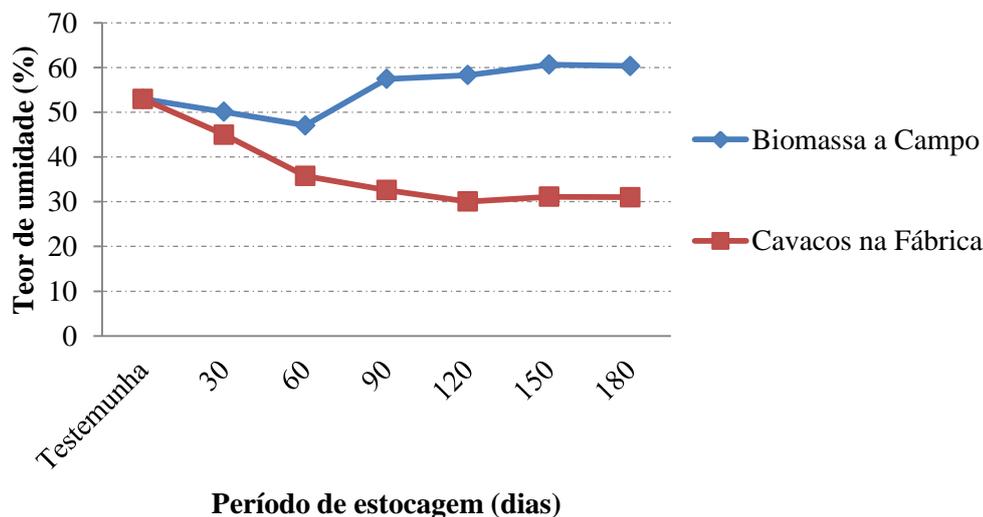


Figura 14. Teor médio de umidade em base úmida dos cavacos processados a partir de biomassa residual estocada em campo e cavacos estocados na fábrica em diferentes períodos de tempo.

Brand (2007), estudando toras de pinus, verificou que os teores de umidade foram maiores em função do tamanho do material durante o período de estocagem. Para a biomassa estocada a campo, o aumento do teor de umidade ocorreu em menor tempo do que constatado pela autora para toras e costaneiras de pinus.

Tal aumento no teor de umidade a campo obtido neste trabalho pode ser resultado da decomposição de alguns componentes dos resíduos que somados às precipitações ocorridas durante o período do verão, e em maior volume a partir do período de 90 dias de permanência dos cavacos a campo. Tal resultado também pôde ser evidenciado por Santiago (2013) e Brand (2007).

5.2.2. Densidade aparente de cavacos

Em todos os tratamentos estudados, a densidade aparente apresentou diferença em relação à densidade do material verde (testemunha, 184 Kg.m⁻³). Neste ponto, todos os

tratamentos apresentaram densidade aparente inferior à testemunha, diferindo estatisticamente quando comparados à testemunha (Tabela 10).

O valor observado neste estudo para a testemunha se aproxima aos demais trabalhos relatados por Silva *et al.* (2007) para três espécies florestais e Pincelli (2011) para pinus.

Tabela 10. Valores médios de densidade aparente da biomassa residual estocada a campo e cavacos estocados na fábrica.

Tratamento	Tempo de Estocagem (dias)	Procedimentos de Estocagem					
		Biomassa a campo			Cavacos na fábrica		
		Média (Kg.m ⁻³)	Teste Tukey	Teste Dunnett	Média (Kg.m ⁻³)	Teste Tukey	Teste Dunnett
Testemunha	7	184,24			184,24		
T1	30	118,28	aD	*	100,73	bB	*
T2	60	158,98	aA	*	112,98	bA	*
T3	90	116,91	aD	*	110,16	aAB	*
T4	120	143,27	aB	*	110,46	bAB	*
T5	150	130,10	aC	*	108,58	bAB	*
T6	180	155,08	aA	*	102,62	bAB	*

Em que: Teste de Tukey: letras iguais não diferem estatisticamente; letras minúsculas para comparação na linha (forma de estocagem); letras maiúsculas para comparação na coluna (tempo de estocagem). Teste Dunnett: médias com “*” diferem estatisticamente da testemunha.

As médias comparadas pelo Teste de Tukey (Tabela 10) apresentaram diferença significativa dentro da forma de estocagem no campo, onde a densidade aparente apresentou uma variação com aumentos e decréscimos durante o período de tempo. Tal resultado constata que a densidade do tratamento T1, 118 Kg.m⁻³ aos 30 dias não diferiu do tratamento T3 com 116 Kg.m⁻³ aos 90 dias, porém diferiu do T2 (158 Kg.m⁻³ aos 60 dias), sendo que o este apresentou a pior média e não diferindo do T6 (155 Kg.m⁻³ aos 180 dias).

Esta variação não foi constatada quando os cavacos estavam estocados na fábrica, onde mantiveram uma baixa variabilidade, apesar das médias apresentadas para o T1 (30 dias, melhor média) e T2 (60 dias, pior média) diferirem estatisticamente entre si, porém não diferindo em relação aos demais tratamentos.

Pincelli (2011) observou um decréscimo na densidade dos cavacos, sendo que este reduzia em função do aquecimento (perda de umidade e demais componentes). Assim, houve uma redução da densidade dos cavacos em função do teor de umidade quando contrasta-se as formas de estocagem, conforme visto na Tabela 10 e Figura 15. Apenas aos 90 dias, houve

proximidade nos tratamentos com diferentes formas de estocagem em mesmo período de tempo, não existindo variação estatística dentre as médias. Esta variação dos resultados de densidade aparente para os cavacos a campo está ligada ao teor de umidade e ainda à precipitação que influenciou as duas características.

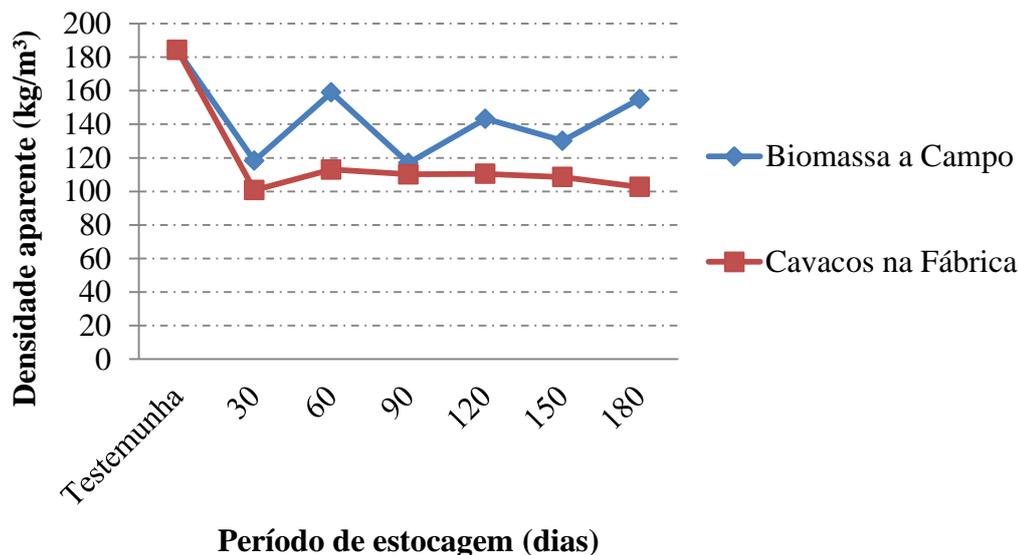


Figura 15. Densidade aparente dos cavacos processados a partir de biomassa residual estocada em campo e cavacos estocados na fábrica em diferentes períodos de tempo.

Partindo destes pressupostos, com menor quantia de água, teor de umidade e por consequência menor densidade, o peso do material transportado é reduzido, o que pela redução da quantidade de água presente, permite o transporte de maior quantidade de cavacos. Para tanto, a estocagem a campo reduz parcialmente a densidade, apesar da variação no teor de umidade e as condições climáticas que existem nestas condições de estocagem do material.

5.2.3. Poder calorífico

Quando comparado à testemunha (4.359 Kcal.Kg⁻¹), a maioria dos tratamentos diferiram estatisticamente entre si na situação de estocagem na fábrica, enquanto que apenas os tratamentos T2 (60 dias), T4 (120 dias) e T5 (150 dias) estocadas a campo não diferiram da testemunha (Tabela 11).

Souza *et al.* (2012) e Pincelli (2011) estudando resíduos de pinus obtiveram poder calorífico superior de 4.902 Kcal.Kg⁻¹ e 4.834 Kcal.Kg⁻¹ respectivamente, sendo maior em

relação à testemunha, porém o valor da testemunha estava semelhante ao apresentado por Kollmann e Cotê (1968, apud Souza *et al.* 2012) que cita um valor médio de poder calorífico para a madeira de 4.500 Kcal.Kg⁻¹, bem como Brito e Barrichelo (1978) que indicaram valores entre 4.300 a 4.850 Kcal.Kg⁻¹ para casca, e entre 4.400 e 5.400 Kcal.Kg⁻¹ para madeira.

A diferença de valores encontrados por Souza *et al.* (2012) e Pincelli (2011) pode ser explicado pela quantia de acículas e impurezas presente durante o manejo dos resíduos, que se tratam de resíduos obtidos da mesma forma em que são obtidos para consumo na fábrica.

Tabela 11. Valores médios de poder calorífico superior da biomassa residual estocada a campo e cavacos estocados na fábrica.

Tratamento	Tempo de Estocagem (dias)	Procedimentos de Estocagem					
		Biomassa a campo			Cavacos na fábrica		
		Média (kcal.kg ⁻¹)	Teste Tukey	Teste Dunnett	Média (kcal.kg ⁻¹)	Teste Tukey	Teste Dunnett
Testemunha	7	4359			4359		
T1	30	4792	aA	*	4758	aA	*
T2	60	4372	bCD		4706	aA	*
T3	90	4665	aAB	*	4717	aA	*
T4	120	4505	bBC		4736	aA	*
T5	150	4268	bDE		4813	aA	*
T6	180	4130	bE	*	4781	aA	*

Em que: Teste de Tukey: letras iguais não diferem estatisticamente; letras minúsculas para comparação na linha (forma de estocagem); letras maiúsculas para comparação na coluna (tempo de estocagem). Teste Dunnett: médias com “*” diferem estatisticamente da testemunha.

Os dados apresentados pelos tratamentos de estocagem a campo tendem a uma redução da produção energética, sendo que apenas os tratamentos de 30, 90 e 180 dias possuem diferença estatística quando comparados à testemunha, sendo os tratamentos com 30 e 180 dias o melhor e o pior tratamento respectivamente, dentre todos os analisados. As médias de poder calorífico superior para a os tratamentos de cavacos estocados na fábrica, não diferiram estatisticamente em todos os tratamentos. Quando se analisa os tratamentos em função da forma em que o material foi estocado, somente os tratamentos de 30 e 90 dias possuem igualdade estatística, sejam resíduos estocados à campo ou cavacos em fábrica.

Os tratamentos com estocagem a campo seguiram uma redução da geração de calor, sendo que o tratamento T6 (4.130 Kcal.Kg⁻¹, 180 dias) apresentou a pior média, mas não diferiu do tratamento T5 (4.268 Kcal.Kg⁻¹, 150 dias).

Apenas o tratamento T1 (4.792 Kcal.Kg⁻¹ com 30 dias) e o tratamento T3 (4.665 Kcal.Kg⁻¹ com 90 dias) na estocagem à campo, não possuem diferença estatística entre si e também quando comparados aos tratamentos de mesmo período estocados na fábrica (T1 com 4.758 Kcal.Kg⁻¹, T3 com 4.771 Kcal.Kg⁻¹), sendo que todos os demais apresentam reduções significativas no poder calorífico superior.

A Figura 16 ilustra de forma mais clara a variação dos tratamentos com estocagem a campo em comparação ao abrigo das intempéries. Como pode ser observado, fica comprovada a estabilidade do poder calorífico dentre os tratamentos estocados em fábrica, assim como o declínio dos níveis de poder calorífico superior da biomassa residual estocadas a campo. A partir dos 150 dias de estocagem estes valores tornam-se inferiores ao poder calorífico apresentado pela testemunha.

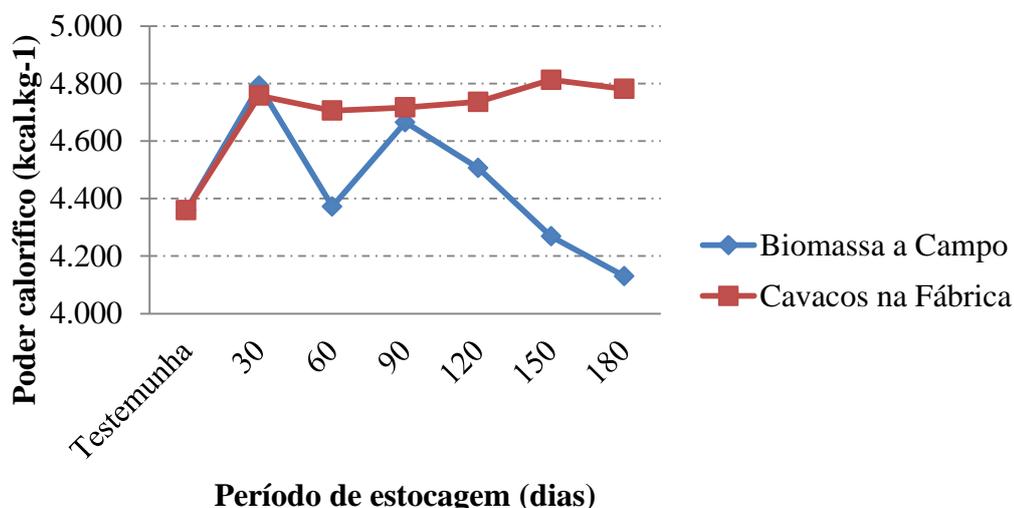


Figura 16. Poder calorífico superior dos cavacos processados a partir de biomassa residual estocada em campo e cavacos estocados na fábrica em diferentes períodos de tempo.

Contudo, Furtado *et al.* (2012), indica que a constituição química do material, quantidade presente de lignina, celulose e extrativos, assim como a composição da biomassa em função da quantidade de madeira e casca na amostra podem influenciar em grande proporção no poder calorífico do material.

Para o poder calorífico líquido, a testemunha não diferiu apenas dos tratamentos de 60, 90 e 120 dias a campo, sendo melhor que os tratamentos de 150 e 180 dias e pior quando comparados aos demais tratamentos (Tabela 12).

Tabela 12. Valores médios de poder calorífico líquido da biomassa residual estocada a campo e cavacos estocados na fábrica.

Tratamento	Tempo de Estocagem (dias)	Procedimentos de Estocagem					
		Biomassa a campo			Cavacos na fábrica		
		Média (kcal.kg ⁻¹)	Teste Tukey	Teste Dunnett	Média (kcal.kg ⁻¹)	Teste Tukey	Teste Dunnett
Testemunha	7	1893			1893		
T1	30	2233	bA	*	2447	aC	*
T2	60	2143	bA		2809	aB	*
T3	90	1833	bB		2962	aAB	*
T4	120	1746	bBC		3099	aA	*
T5	150	1544	bC	*	3070	aAB	*
T6	180	1509	bC	*	3083	aAB	*

Em que: Teste de Tukey: letras iguais não diferem estatisticamente; letras minúsculas para comparação na linha (forma de estocagem); letras maiúsculas para comparação na coluna (tempo de estocagem). Teste Dunnett: médias com “*” diferem estatisticamente da testemunha.

O poder calorífico líquido (1.893,02 kcal.kg⁻¹) esteve abaixo do apresentado por Souza *et al.* (2012) para resíduos de colheita de pinus, onde este autor encontrou poder calorífico líquido de 2.570 kcal.kg⁻¹.

No entanto, os valores obtidos neste estudo condizem com os encontrados por Brand *et al.* (2012), onde indica valores de 1.201 a 1.719 kcal.kg⁻¹ para cavacos de *Pinus taeda*, sendo que a variação na curva energética correspondeu ao teor de umidade e ao período de estocagem deste material. Para tanto, Thörnqvist (1986) diz que a variação do potencial energético depende das espécies de plantas e do conteúdo de água presente durante a confecção das pilhas.

Na comparação dos tratamentos a campo, os melhores corresponderam aos 30 e 60 dias, diferindo de todos os demais. O pior tratamento correspondeu ao período de 180 dias, que não diferiu dos tratamentos de 150 e 120 dias, porém diferiu do tratamento de 90 dias. Já quando se trata dos cavacos estocados na fábrica, o melhor tratamento foi aos 120 dias, porém não diferiu dos tratamentos de 90, 150 e 180 dias. O pior tratamento correspondeu ao período de 30 dias, sendo que este diferiu de todos os demais.

A maior influência no poder calorífico líquido corresponde ao teor de umidade, onde se desconta o consumo de energia para evaporação da umidade e o vapor de água gerado durante a combustão. Portanto, analisando a forma de estocagem dos materiais, existe grande diferença definida pelo poder calorífico líquido, indicando que o cavaco ao abrigo na fábrica é a melhor forma de estocagem da biomassa residual da colheita de madeira (Figura 17).

Com base na Figura 17, verifica-se que a melhor forma de estocagem do material é o cavaco ao abrigo na fábrica, sendo que este aumentou seu poder calorífico líquido em função da redução do teor de umidade com o passar do tempo. E o processo inverso ocorreu com o material estocado a campo, que, com o aumento do teor de umidade fez com que fosse reduzido o poder calorífico líquido ao decorrer do tempo de estocagem.

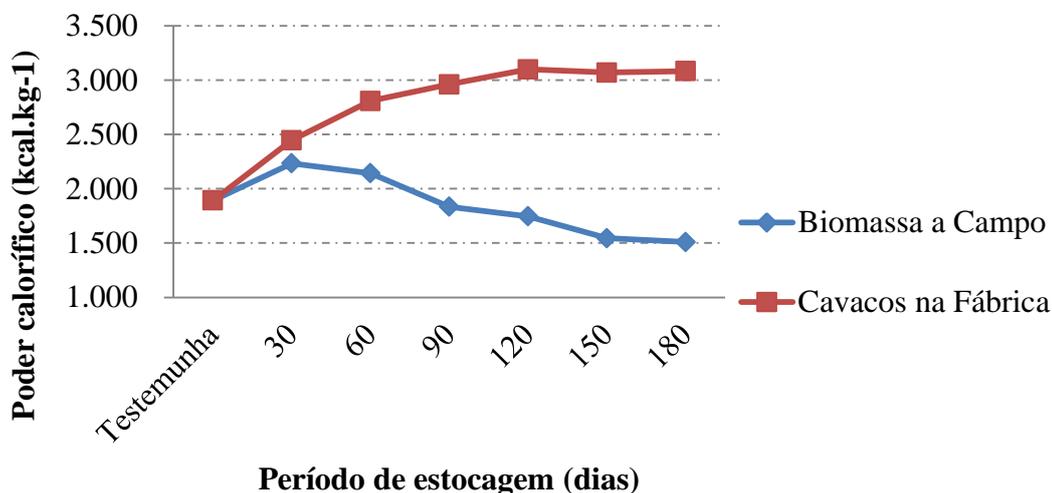


Figura 17. Poder calorífico líquido dos cavacos processados a partir de biomassa residual estocada em campo e cavacos estocados na fábrica em diferentes períodos de tempo.

Para os cavacos estocados a campo, o melhor momento de consumo do material é aos 30 dias e quando se trata dos cavacos estocados na fábrica, o melhor momento é aos 120 dias, sendo que a partir destes períodos não ocorre ganho expressivo de energia, e somente a estabilidade estatística dos valores, fato este também evidenciado por Brand *et al.* (2012).

5.2.4. Composição química

5.2.4.1 Teor de materiais voláteis

De acordo com os resultados obtidos, os tratamentos com estocagem na fábrica não diferiram em relação à testemunha, assim como os três primeiros tratamentos de estocagem a campo (30, 60 e 90 dias). Portanto, os cavacos estocados na fábrica não perderam os teores de voláteis, ao contrário dos tratamentos aos 120, 150 e 180 dias de estocagem a campo, que diferiram estatisticamente da testemunha pelo teste de Dunnett (Tabela 13), caracterizando piores médias da estocagem a campo.

No entanto, o resultado obtido para a testemunha diferiu aos valores obtidos por Souza *et al.* (2012) para resíduos de colheita de pinus, bem como por Bauer (2001) para eucalipto, porém estando de acordo com os teores apresentados por Pincelli (2011) para resíduos de pinus, Ramos e Paula *et al.* (2011) e Vale *et al.* (2002) para diversas espécies nativas e Brand (2010) para coníferas.

Tabela 13. Valores médios de teor de materiais voláteis da biomassa residual estocada a campo e cavacos estocados na fábrica.

Tratamento	Tempo de Estocagem (dias)	Procedimentos de Estocagem					
		Biomassa a campo			Cavacos na fábrica		
		Média (%)	Teste Tukey	Teste Dunnett	Média (%)	Teste Tukey	Teste Dunnett
Testemunha	7	77,43			77,43		
T1	30	77,52	aA		76,55	aA	
T2	60	74,72	bAB		77,50	aA	
T3	90	74,35	aAB		74,47	aA	
T4	120	71,42	bBC	*	74,45	aA	
T5	150	70,69	bCD	*	76,45	aA	
T6	180	67,36	bD	*	75,33	aA	

Em que: Teste de Tukey: letras iguais não diferem estatisticamente; letras minúsculas para comparação na linha (forma de estocagem); letras maiúsculas para comparação na coluna (tempo de estocagem). Teste Dunnett: médias com “*” diferem estatisticamente da testemunha.

As médias dos tratamentos sob a influência da estocagem na fábrica não diferiram estatisticamente, sendo que o maior valor foi de 77% (T2 aos 60 dias de estocagem) e a menor média correspondeu a 74% (T3 com 90 dias e T4 com 120 dias de estocagem).

Portanto as médias apresentadas acima, mesmo com a variação do tempo, estão dentro da margem apresentada por Brand (2010) e Vale *et al.* (2002), comprovando-se que a estocagem dos cavacos na fábrica não gerou alteração de forma significativa nas médias dos tratamentos.

Os tratamentos correspondentes a estocagem à campo apresentam uma variação dos dados, sendo que o melhor tratamento foi aos 30 dias (77%), porém não diferindo estatisticamente dos tratamentos aos 60 (74%) e 90 (74%) dias, porém diferindo aos valores obtidos aos 120, 150 e 180 dias (71%, 70% e 67% respectivamente), que apresentaram as piores médias. Estes dados seguem a tendência afirmada por Brand (2007), que cita uma variação da qualidade da biomassa florestal para a produção de energia em função do tempo de estocagem do material.

No entanto, é importante ressaltar que os tratamentos correspondentes a estocagem no campo apresentaram redução constante dos teores de voláteis (Figura 18), sendo que o tratamento aos 30 dias apresentou uma média de 77% e decrescendo até aos 180 dias, com um valor de 67% no teor de voláteis.

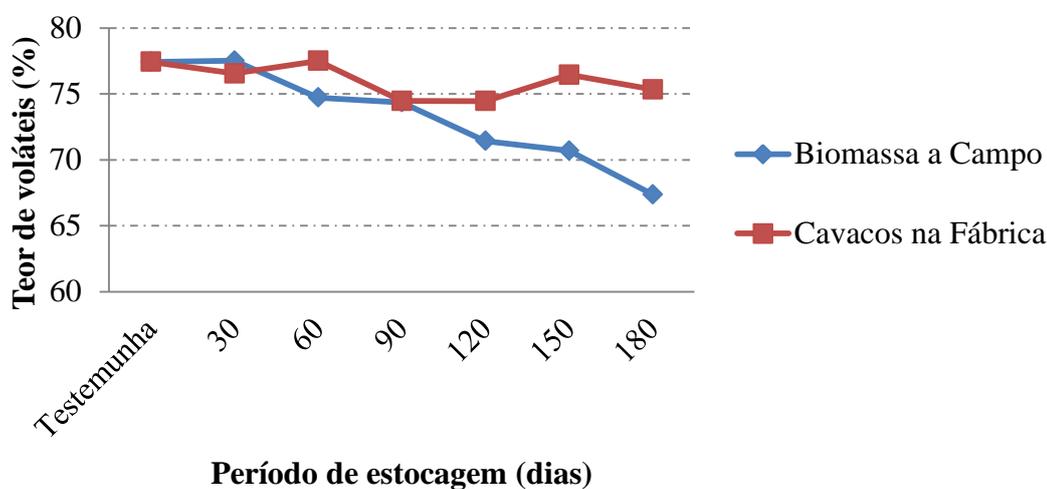


Figura 18. Teor de materiais voláteis dos cavacos processados a partir de biomassa residual estocada em campo e cavacos estocados na fábrica em diferentes períodos de tempo.

Portanto, evidencia-se uma variação significativa na forma de estocagem, com a redução gradativa nos teores de voláteis para o material estocado no campo, sendo possível comparar as duas formas de estocagem do material, como mostrado na Figura 18.

Segundo Brand (2010) e Vieira (2012), a biomassa com altos teores de voláteis tem mais facilidade na ignição e posterior queima, tornando o processo mais rápido. Portanto, a biomassa estocada na fábrica possui maior probabilidade de realizar fácil combustão.

5.2.4.2. Teor de carbono fixo

Os dados obtidos em relação ao teor de carbono fixo indicam que existe uma baixa variação dentre os valores presentes nas amostras analisadas. Com base no teste de Dunnett, apenas quatro das 12e combinações (tratamentos) diferiram quando comparadas à testemunha, que obteve 20,5% (Tabela 14). Portanto, os tratamentos aos 90 dias de estocagem a campo e na fábrica, assim como aos 120 e 180 dias na fábrica diferiram da testemunha com maiores valores do teor de carbono fixo, com 22,5%, 22,6%, 23,2% e 22,8% respectivamente.

Os dados obtidos na testemunha também condiz com o apresentado por Ramos e Paula *et al.* (2011), Pincelli (2011) e Brand (2010) para pinus, e acima do obtido por Bauer (2001) para eucalipto e Souza *et al.* (2012). Entretanto, quando comparado aos teores para maravalha de pinus obtido por Menezes (2013), os valores de carbono fixo apresentados neste trabalho se tornam relativamente baixos.

Tabela 14. Valores médios de teor de carbono fixo da biomassa residual estocada a campo e cavacos estocados na fábrica.

Tratamento	Tempo de Estocagem (dias)	Procedimentos de Estocagem					
		Biomassa a campo			Cavacos na fábrica		
		Média (%)	Teste Tukey	Teste Dunnett	Média (%)	Teste Tukey	Teste Dunnett
Testemunha	7	20,5			20,5		
T1	30	21,6	aA		21,7	aAB	
T2	60	20,5	aAB		21,0	aB	
T3	90	22,5	aA	*	22,6	aAB	*
T4	120	22,2	aA		23,2	aA	*
T5	150	18,7	bB		22,1	aAB	
T6	180	20,5	bAB		22,8	aAB	*

Em que: Teste de Tukey: letras iguais não diferem estatisticamente; letras minúsculas para comparação na linha (forma de estocagem); letras maiúsculas para comparação na coluna (tempo de estocagem). Teste Dunnett: médias com “*” diferem estatisticamente da testemunha.

Na análise comparativa das médias pelo Teste Tukey (Tabela 14), houve uma diferenciação em poucos dos tratamentos. A melhor média para os cavacos estocados em fábrica foi obtida no tratamento aos 120 dias, com valor de 23,2% de teor de carbono fixo, porém não diferindo de forma significativa do tratamento de 60 dias (21%) que foi a menor média dentre todos os tratamentos na estocagem em fábrica. Novamente percebe-se uma estabilidade nesta estocagem, mantendo os níveis próximos ao encontrado pelos demais autores (RAMOS e PAULA *et al.* 2011, PINCELLI 2011 e BRAND 2010).

Portanto, ficou evidente que a melhor forma de estocagem a campo (22,5%) correspondeu ao tratamento T3 (90 dias), que por sua vez, diferiu do T5 (150 dias) com média de 18,7%, pior tratamento, mas não diferindo dos demais.

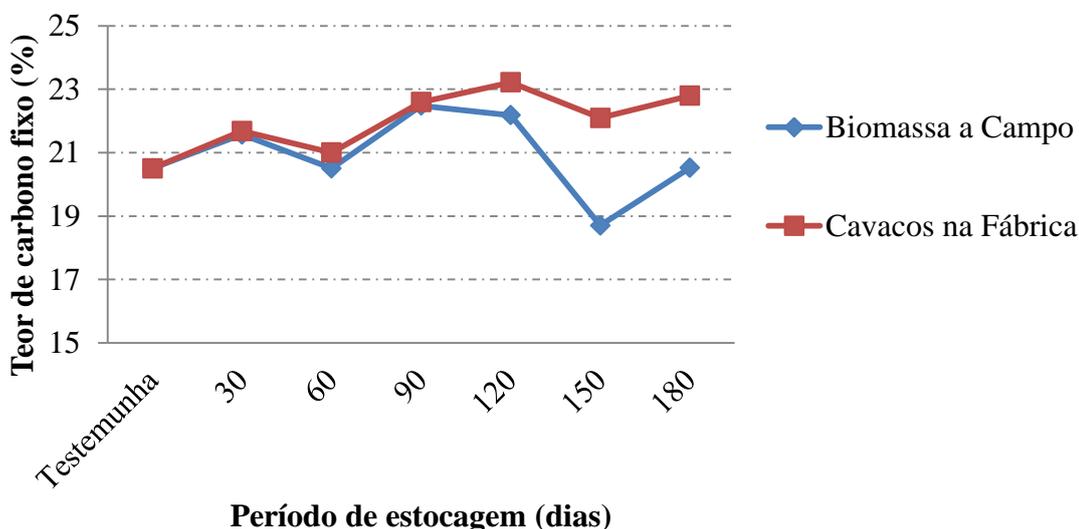


Figura 19. Teor de carbono fixo dos cavacos processados a partir de biomassa residual estocada em campo e cavacos estocados na fábrica em diferentes períodos de tempo.

No entanto, como pode ser visto na Figura 19, houve pequena variação dos dados, onde as médias dos tratamentos estocados na fábrica apresentaram os maiores teores de carbono fixo. Porém, apesar da curva mais acentuada dos resíduos estocados a campo, estes seguiram tendências aproximadas à variação dos dados da estocagem na fábrica.

Portanto, essa diferença de conteúdo de carbono fixo pode acarretar em uma combustão mais lenta, como citado por Brand (2010), em que indica uma proporção inversa dos teores de carbono fixo e voláteis, enquanto a facilidade de queima é aumentada em função do teor de voláteis.

5.2.4.3. Teor de cinzas

De acordo com Teste de Dunnett (Tabela 15), utilizando as médias de teores de cinzas, verifica-se que existe uma diferença significativa entre a testemunha e os tratamentos testados. No cenário de estocagem à campo, quatro das seis médias (60, 120, 150 e 180 dias com médias de 4,8%, 6,4%, 10,6% e 12,1%, respectivamente) diferiram de forma significativa em relação à testemunha (2,1%).

Quando analisadas as médias apresentadas pelos tratamentos estocados na fábrica, todos os seis tratamentos não diferiram estatisticamente em relação à testemunha, sendo que neste caso, Souza *et al.* (2012), Ramos e Paula *et al.* (2011), Almeida *et al.* (2010) e Pincelli (2011) apresentaram médias inferiores à obtida neste estudo com resíduo de pinus. Porém, estes valores estão dentro dos níveis de várias espécies descritos por Bauer (2001), Vale *et al.* (2002), Silva *et al.* (2007), Menezes (2013) e Brito e Barrichelo (1978), assim como os definidos por Furtado *et al.* (2012) quando definiu teores de 2,04% para cinzas de resíduos de colheita de pinus.

Tabela 15. Valores médios de teor de cinzas da biomassa residual estocada a campo e cavacos estocados na fábrica.

Tratamento	Tempo de Estocagem (dias)	Procedimentos de Estocagem					
		Biomassa a campo			Cavacos na fábrica		
		Média (%)	Teste Tukey	Teste Dunnett	Média (%)	Teste Tukey	Teste Dunnett
Testemunha	7	2,1			2,1		
T1	30	0,9	aD		1,8	aA	
T2	60	4,8	aBC	*	1,5	bA	
T3	90	3,2	aCD		2,9	aA	
T4	120	6,4	aB	*	2,3	bA	
T5	150	10,6	aA	*	1,5	bA	
T6	180	12,1	aA	*	1,9	bA	

Em que: Teste de Tukey: letras iguais não diferem estatisticamente; letras minúsculas para comparação na linha (forma de estocagem); letras maiúsculas para comparação na coluna (tempo de estocagem). Teste Dunnett: médias com “*” diferem estatisticamente da testemunha.

Nas comparações das médias (Tabela 15), os tratamentos com influência na forma de estocagem na fábrica não diferiram entre si, tendo a maior média o tratamento T3 (90 dias e média de 2,9%) e as menores médias correspondentes aos tratamentos T2 e T5 (60 dias e 150

dias, com média de 1,5% para os dois tratamentos). Esta tendência temporal foi mantida também em trabalhos realizados por Garstang (2002), Brand (2007) com períodos de estocagem de 180 dias e Almeida *et al.* (2010) com período de estocagem de 90 dias.

Com a comparação das médias entre as duas formas de estocagem e mesmo período de tempo, somente não houve diferenciação das médias nos períodos de 30 e 90 dias de estocagem. Entretanto, foi significativa a forma de estocagem, assim como o tempo de estocagem nos tratamentos a campo, onde o tratamento com a pior e maior média correspondeu ao tratamento T6 aos 180 dias estocado a campo com 12,1% de teor de cinzas e o tratamento com melhor média, na estocagem à campo, corresponde ao T1 com período de 30 dias de estocagem e a média de 0,9%.

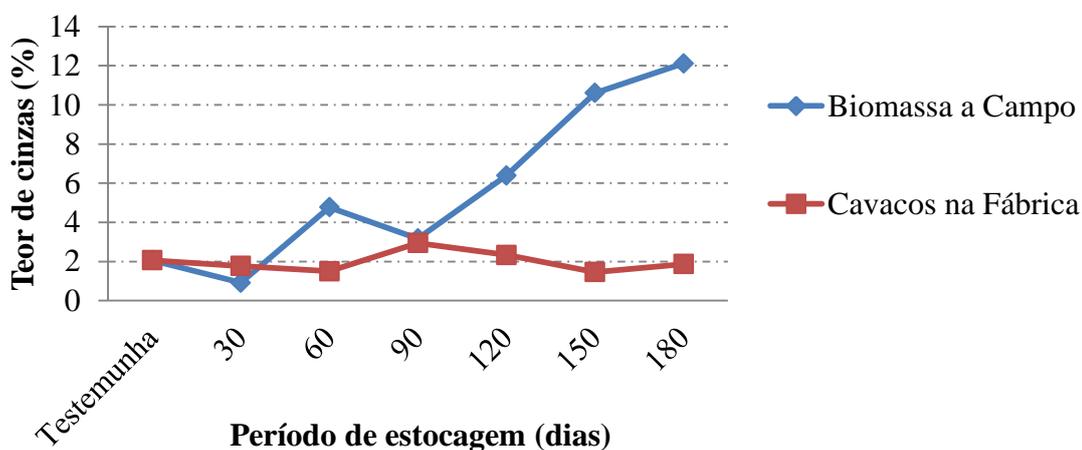


Figura 20. Teor de cinzas dos cavacos processados a partir de biomassa residual estocada em campo e cavacos estocados na fábrica em diferentes períodos de tempo.

A partir dos dados apresentados na Tabela 15, bem como as curvas de médias dos tratamentos inseridas na Figura 20, torna-se evidente o aumento do teor de cinzas presente nos resíduos estocados a campo, e ficando claro o aumento nos teores de cinzas dos tratamentos aos 120, 150 e 180 dias, atingindo valores de 6,4%, 10,6% e 12,1% respectivamente, fato este também descrito por Gartang *et al.* (2002), que obteve uma variação no teor de cinzas do material em diferentes formas e período de estocagem.

O teor de cinza de 12 % obtido aos 180 dias estocados a campo comprova uma quantidade 8 vezes superior quando comparado à estocagem ao abrigo de intempéries, podendo ser explicado pela contaminação por impurezas dos resíduos estocados a campo no decorrer do período de estocagem.

6. CONCLUSÃO

Os resultados permitiram obter as seguintes conclusões:

- a) O processamento dos resíduos ocupou o maior tempo do ciclo operacional efetivo do sistema de cavaqueamento.
- b) As interrupções operacionais afetaram negativamente a eficiência operacional e produtividade do sistema de cavaqueamento, causados pelos constantes deslocamentos do cavaqueador, o aguardo dos veículos de transporte e as manutenções mecânicas.
- c) O sistema de cavaqueamento apresentou adequada produtividade efetiva, porém a produção diária foi afetada pela ineficiência operacional e demonstrando a necessidade de melhorias no planejamento operacional.
- d) O rendimento e balanço energético do sistema de cavaqueamento indicaram um baixo consumo energético da máquina e uma boa conversão energética dos resíduos.
- e) O teor de umidade, poder calorífico superior e poder calorífico líquido caracterizam melhor padrão energético para biomassa estocada na fábrica, pela redução da umidade e aumento do potencial energético dos cavacos.
- f) Na estocagem da biomassa residual da colheita de madeira a campo, o melhor período para o aproveitamento do material como fonte de energia é aos 30 dias.
- g) Para a biomassa estocada na fábrica na forma de cavacos, o melhor período para o aproveitamento do material como fonte de energia é aos 60 dias.
- h) A melhor forma de estocagem da biomassa para fins energéticos corresponde à forma de cavacos estocados ao abrigo na fábrica, garantindo melhores características físicas e químicas e utilização energética.

7. RECOMENDAÇÕES

Avaliar o sistema operacional de cavaqueamento com diversas qualidades de cavacos, bem como comparar os diferentes sistemas existentes.

Realizar uma análise econômica do sistema de cavaqueamento e da estocagem da biomassa a campo e na fábrica.

Identificar as variáveis de maior influência no resultado energético dos cavacos e da biomassa residual.

Englobar mais fatores de campo que possam influenciar no poder energético dos cavacos e resíduos de biomassa, visando aumento da produção energética.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKPINAR, A.; KÖMÜRÇÜ, M.I.; KANKAL M.; ÖZÖLÇER, I.H.; KAYGUSUZ, K. Energy situation and renewables in Turkey and environmental effects of energy use. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.12, n. 8, p.2013–2039, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM E711-87: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL, ASTM E 871-82: Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL, ASTM E 872-82: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL, ASTM E 873-82: Standard Test Method for Bulk Density of Densified Particulate Biomass Fuels. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, ASTM E1534: Standard Test Method for Determination of Ash Content of Particulate Wood Fuels, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 14984: Madeira - Determinação da densidade aparente de cavacos, Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 11956: Coque - Determinação do poder calorífico superior - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS-ABRAF. **Anuário Estatístico da ABRAF - 2013**: Ano base 2012. 146 p. 2013.

BARNES, R. M. **Estudos de movimentos e de tempos: projeto e medida do trabalho**, Edgard Bluncher, 1977, 635 p.

BARRETA, A.; GUZZO, P.; OLIVEIRA, J.; ARAGÃO, V.; NADAL, R.; Desenvolvimento de um módulo de picagem de ponteira de eucalipto para utilização como biomassa pela Jari Celulose. **Biomassa e Energia**, Viçosa v. 2, n. 4, p. 331-340, 2005.

BAUER, S.R.T. **Resíduos da exploração florestal de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden para geração de energia elétrica**, Botucatu: UNESP, 2001, 65 p., (Dissertação de Mestrado em Agronomia) Botucatu, 2001.

BRAND, M.A.; BRITO, J.O.; QUIRINO, W.F.; MUÑIZ, G.I.B. Influência da época de estocagem na qualidade da biomassa florestal para a geração de energia. **Revista Floresta**, Curitiba, vol.42, n. 2, p.369-380, 2012.

BRAND, M.A.; MUÑIZ G.I.B.; QUIRINO, W.F.; BRITO, J.O. Storage as a tool to improve wood fuel quality. **Biomass and Bioenergy**, v.35, p. 2581-2588, 2011.

BRAND, M.A. **Energia de Biomassa Florestal**, 1ª Ed, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 131p., 2010.

BRAND, M.A. **Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem**. Curitiba: Tese (Doutorado), UFPR, 169 p. 2007.

BRIDGWATER, T. Review Biomass for energy, **Journal of the Science of Food and Agriculture**, n. 86, p. 1755-1768, 2006.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia, Piracicaba: Circular técnica IPEF, n. 52, 1979. 7 p.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G Características do Eucalipto como Combustível: análise química imediata da madeira e da casca, **Revista IPEF**, Piracicaba, n. 16, p. 63-70, 1978.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto, **Revista IPEF**, Piracicaba, n. 14, p. 9-20, 1977.

CANTO J.L.; MACHADO C.C.; SEIXAS, F.; SOUZA, A.P.; SANT'ANNA, C.M. Avaliação de um sistema de cavaqueamento de ponteiros de eucalipto para aproveitamento energético, **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 1327 – 1334, 2011.

CANTO, J. L. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia**. Viçosa: Tese (Doutorado em Ciência Florestal), UFV, 2009. 127 p.

CANTO, J.L.; MACHADO, C.C.; GONTIJO F.M.; JACOVINE L.A.G. Colheita e transporte florestal em propriedades rurais fomentadas no estado do espírito santo, **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 989-998, 2006.

CREMER, T. **Produktivitätsmodelle als Entscheidungsgrundlage über Verfahren und Aushaltungsvarianten, entwickelt auf der Basis einer Metaanalyse**, Freiburg (Alemanha): Tese (Doutorado em Ciências Florestais e Ambientais), Albert Ludwigs Universität, 2008, 199 p.

DESROCHERS, L.; PUTTOCK, D.; RYANS, M. The economics of chipping logging residues at roadside: a study of three systems, **Biomass and Bioenergy**, v. 5, n. 6, p. 401-411, 1993.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG e. V. **DIN 15104: Feste Biobrennstoffe – Bestimmung des Gesamtgehaltes an Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff – Instrumentelle Verfahren**. Berlim, 2011.

ELETROBRÁS, **Plano nacional de energia elétrica: Plano 2015. Estudos básicos.** v. III, 1993.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), **Balanco energético nacional de 2014:** ano base 2013, Rio de Janeiro, 2014, 288p.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA), **Anual Energy Outlook 2014 with projections to 2040**, Washington, DOE/EIA, 0383, 269 p. 2014.

FURTADO, T.S.; FERREIRA, J.C.; BRAND, M.A.; MUÑIZ, G.I.B.; QUIRINO, W.F. Mapeamento da frequência de uso e características da biomassa florestal utilizada para a geração de energia em Lages, SC. **Ciência Florestal**, Santa Maria v. 29, n. 4, p. 795-802, 2012.

GARSTANG, J.; WEEKES, A.; POULTER, R.; BARTLETT, D. **Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, non-ventilated bulkstorage of wood chips and development of best storage practices.** Relatório técnico. FES B/W2/00716/RESP.DTI/Pub, 2002. 116 p.

HEDING, N. The critical moisture content. In: **Conference held by the International Energy Agency (IEA) – Forestry Energy Programme Group C – Storing, drying and internal handling of wood fuels**, Danish Institute of Forest Technology, p. 6 – 11, Denmark, 1984.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, **Relatório anual 2015**, ano base 2014, 64 p. 2015.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, **Relatório anual 2014**, ano base 2013, 100 p. 2014.

JACOVINE, L.A.G.; MACHADO, C.C.; SOUZA, A.P.; LEITE, H.G.; MINETTI L.J. Avaliação da qualidade operacional em cinco subsistemas de colheita florestal, **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 391 – 400, 2005.

JIRJIS, R. Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. **Biomass and Bioenergy**, v.28, n.1, p.193-201, 2005.

LEINONEN, A. **Harvesting technology of forest residues for fuel on the USA and Finland.** Espoo, Finland. VTT, 2004, 132 p. (Research Notes 2229).

LEITE, A.M.P.; LOPES, E.S.; FIEDLER, N.C.; MACHADO, C.C.; SILVA, E.N. Colheita florestal em propriedades rurais. In: SILVA E.N.; FIEDLER N.C.; PEREIRA, D.P.; PAULA, M.O. **Florestas de produção**. 1. Ed., Editora Suprema, Viçosa, p. 237-272, 2014.

MACEDO, I.C. **Estado da arte e tendências tecnológicas para energia.** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE, 90 p., Brasília, 2003.

MACHADO, C.C. **Planejamento e controle de custos na exploração florestal.** UFV, Imprensa Universitária, Viçosa, 1984. 138 p.

MACHADO, C.C. **Elementos básicos do transporte florestal rodoviário**. Editora UFV, Viçosa, 2000. 167p.

MACHADO, C.C. **Colheita Florestal**, 3ª Ed, Editora UFV, Viçosa, 2014. 501 p.

MAGOSSI, D.C. **A produção florestal e a industrialização de seus resíduos na região de Jaguariaíva**, Curitiba, Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), UFPR, 88 p. 2007.

MALINOVSKI, J.R.; CAMARGO, C.M.S.; MALINOVSKI, R.A.; MALINOVSKI, R.A.; CASTRO, G.P., Sistemas, In: MACHADO C.C., **Colheita Florestal**, 3ª Ed., Editora UFV, Viçosa, 2014, p. 178-205.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Plano Nacional de Agroenergia 2006 – 2011**, 2ª ed., Embrapa Informações Tecnológicas, Brasília, 2006. 110 p.

MENEZES, M.J.S. **Poder calorífico e análise imediata da maravalha de Pinus (*pinus sp.*) e Araucária (*araucaria angustifolia*) de reflorestamento como resíduos de madeira**, Cascavel, Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura), UNIOESTE, 42 p. 2013.

MÜLLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação de eucalipto em Itamarandiba, MG**. Viçosa, Tese (Doutorado em Ciências Florestais), UFV, 94 p. 2005.

MUSSA, M. **A global growth rebound: how strong for how long?**, Institute for International Economics, Washington, DC. 2005, 15 p. Disponível em: <<http://www.iie.com/publications/papers/mussa0903.pdf>>, Acesso em: 15/02/2015.

NEUHOF, I.; MERGLER, F.; ZORMAIER, F.; WEINERT, B.; HÜTTL, K. Hackschnitzel richtig lagern. In: LWF Merkblatt 11, **Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft**. 4 p. 2014.

NURMI, J. The effect of whole-tree storage on the fuelwood properties of short-rotation Salix crops. **Biomass and Bioenergy**, v. 8, n. 4, p. 245-249. 1995.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. **Embrapa Floresta**, Colombo, Documento 38, 113 p. 2000.

PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A., **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – FISPQ**, v.4, n. BR0109, Rio de Janeiro, 2014.

PINCELLI, A.L.P.S.M. **Características dos resíduos da colheita florestal de eucalipto e pinus, submetidos a tratamento térmico, com foco na aplicação energética**. Piracicaba, Tese (Doutorado em Ciências de Recursos Florestais), ESALQ, 113p. 2011.

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

REMLER, N. *et al.* Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln. **Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft**. Dokument :LWF, Informationen aus der Wissenschaft. 1999.

ROCHA, M.P.; KLITZKE, R.J. Energia da madeira. **Série didática FUFPEF**, n. 3. Curitiba: FUFPEF, 1998, 86 p.

RÖSER, D.; MOLA-YUDEGO, B.; PRINZ, R.; EMER, B.; SIKANEN, L. Chipping operations and efficiency in different operational environments. **Silva Fennica**, 46 (2): p. 275–286. 2012.

ROTTMANN-MEYER, M.L.; KRALEMANN, M. **Holzpellets, Hackschnitzel und Stückholz: Fachinformationen für Verbraucher**. 3N-Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe e.V.. 28 p. 2012.

SANTIAGO, F.L.S. **Aproveitamento de resíduos florestais de Eucalyptus spp na indústria de fabricação de celulose para geração de energia térmica e elétrica**, Botucatu, Tese (Doutorado em Agronomia), UNESP, 108p. 2013.

SAWINSKY JUNIOR, J. **Rentabilidade econômica comparativa entre pinus, eucalipto, erva-mate e as principais culturas agrícolas da microrregião de canoinhas – SC**, Curitiba, Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), UFPR, 113p. 2000.

SCHOLZ, V.; *et al.* Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut, **Institut für Agrartechnik Bornim e.V. (ATB)**, Ed. 39, Potsdam-Bornim (Alemanha), 155 p. 2005.

Serviço Florestal Brasileiro (SFB), **Brasil com Florestas: oportunidades para o desenvolvimento de uma economia florestal e a reestruturação necessária do setor**, Serviço Florestal Brasileiro, Brasília, 30 p. 2012.

SILVA, M.L.; OLIVEIRA, R.J.; VALVERDE, R.S.; MACHADO C.C.; PIRES, V. A.V. Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos, **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1073-1079, 2007.

SILVA, M.G.; NUMAZAWA, S.; ARAUJO, M.M.; NAGAISHI, T.Y.R.; GALVÃO, G.R. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. **Acta Amazonica**, Manaus, v.37, n.1, p. 61-70, 2007.

SILVA, D.A. **Avaliação da eficiência energética em uma indústria de painéis compensado**. Curitiba: Tese (Doutorado em Ciências Florestais), UFPR. 205 p. 2001.

SIMÕES, D. **Avaliação econômica de dois sistemas de colheita florestal mecanizada de eucalipto**, Botucatu: Dissertação (Mestrado em Agronomia), UNESP, 105 p. 2008.

SOUZA, M.M.; SILVA, D.A.; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R.C. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *pinus taeda*. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 2, p. 325-334, 2012.

SOUZA, M.M., **Caracterização e viabilidade econômica do uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda* L.**, Curitiba: Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), UFPR, 77p. 2010.

SPINELLI R.; HARTSOUGH B. A survey of Italian chipping operations, **Biomass and Bioenergy**, v. 21, p. 433-444, 2001.

SPINELLI, R.; VISSER, R.J.M. Analyzing and estimating delays in wood chipping operations, **Biomass and Bioenergy**, v. 33, p. 429-433, 2009.

THÖRNQVIST, T. Storing of forest residues and comminuted fuels from forest residues. In: **Conference held by the International Energy Agency (IEA) – Forestry Energy Programme Group C – Storing, drying and internal handling of wood fuels**, Denmark, Danish Institute of Forest Technology, p. 16 – 18, Denmark 1984.

TOLMASQUIM, M.T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética Brasileira: uma prospectiva. **Revista Novos Estudos**, v. 79, p. 47 – 69, 2007.

TUOTO, M. Levantamento sobre a geração de resíduos provenientes da atividade madeireira e proposição de diretrizes para políticas, normas e condutas técnicas para promover o seu uso adequado. **Sumário executivo – Revisão 01**. Curitiba: Projeto PNUD BRA 00/20 - Apoio às Políticas Públicas na Área de Gestão e Controle Ambiental. 27 p. 2009.

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

VAN BELLE, J.A model to estimate fossil CO₂ emissions during the harvesting of forest residues for energy with an application on the case of chipping, **Biomass and Bioenergy**, v. 30, p. 1067–1075, 2006.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. Cascavel: Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura), UNIOESTE, 56 p. 2012.

WILLIAMS, R. H. Toward zero emission for transportation using fossil fuels, In: **Biennial Asilomar Conference, VIII, Washington, 2001**. Disponível em: <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/sun1/docs/asilomar.pdf#page=71>, acesso em: 07/08/2013.

9. APÊNDICE

A – Análise de Tempos e Movimentos

Tabela 16. Análise de normalidade dos dados de análise de tempos e movimentos, utilizando vários testes estatísticos.

Teste (Estatística)	Valor	Vcrit	p-valor	Normal
Shapiro-Wilk (W)	0.96165	-	0.08172	Sim

H0: Existe normalidade dos dados; Não rejeita-se H0.

B – Teor de Umidade

Tabela 17. Análise de variância, anova da variável teor de umidade.

Quadro de Análise						
FV	GL	SQ	QM	F	Fcrit.	P<=
Fator1(F1)	1	6882,38780	6882,38780	686,3993**	7,15	1%
1Fator2(F2)	5	213,89668	42,77934	4,2665**	3,3927	1%
Int. F1xF2	5	1390,65135	278,13027	27,7387**	3,3927	1%
Fat x Testemunha	1	299,05513	299,05513	29,8256**	7,15	1%
Tratamentos	12	8785,99096	732,16591	73,0209**	2,548	1%
Resíduo	52	521,39358	10,02680			
Total	64	9307,38454				

Tabela 18. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 1 (Forma do material e de estocagem) a 5% de probabilidade.

Fator 1 – Estocagem			
Tratamento	Média	DMS	Diferença estatística
à Campo	55,69	1,64143	A
Ao abrigo de intempéries	34,27	1,64143	B

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 19. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 2 (Período de Estocagem) à 5% de probabilidade.

Fator 2 – Período de estocagem			
Tratamento	Média	DMS	Diferenciação estatística
30 dias	47,58	4,18714	A
60 dias	41,43	4,18714	B
90 dias	45,05	4,18714	AB
120 dias	44,18	4,18714	AB
150 dias	45,91	4,18714	A
180 dias	45,70	4,18714	A

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 20. Teste Tukey para diferenciação de médias de interação a 5% de probabilidade.

Fator1	Fator 2					
	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	150 dias	180 dias
À Campo	50,14 aB	47,09 aB	57,49 aA	58,32 aA	60,69 aA	60,39 aA
Ao Abrigo	45,02 bA	35,77 bB	32,61 bB	30,40 bB	31,14 bB	31,02 bB

OBS: dms para colunas =4,0207; dms para linhas =5,9215. Classificação com letras minúsculas para fator 1 e classificação com letras maiúsculas para fator 2. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

C – Densidade Aparente

Tabela 21. Análise de variância, anova da variável densidade aparente.

Quadro de Análise						
FV	GL	SQ	QM	F	Fcrit.	P<=
Fator1(F1)	1	13068,10215	13068,10215	162,7919	7,15	1%
1Fator2(F2)	5	5000,15990	1000,03198	12,4576	3,3927	1%
Int. F1xF2	5	3835,41959	767,08392	9,5557	3,3927	1%
Fat x Testemunha	1	17681,53875	17681,53875	220,2624	7,15	1%
Tratamentos	12	39585,22039	3298,76837	41,0934	2,548	1%
Resíduo	52	4174,29388	80,27488			
Total	64	43759,51427				

Tabela 22. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 1 (Forma do material e de estocagem) a 5% de probabilidade.

Tratamento	Fator 1 – Estocagem		Diferença estatística
	Média	DMS	
à Campo	137,104	4,6409	A
Ao abrigo de intempéries	107,588	4,6409	B

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 23. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 2 (Período de Estocagem) à 5% de probabilidade.

Tratamento	Fator 2 – Período de estocagem		Diferenciação estatística
	Média	DMS	
30 dias	109,507	8,038	E
60 dias	135,979	8,038	A
90 dias	113,539	8,038	DE
120 dias	126,866	8,038	BC
150 dias	119,340	8,038	CD
180 dias	128,848	8,038	AB

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 24. Teste Tukey para diferenciação de médias de interação a 5% de probabilidade.

Fator1	Fator 2					
	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	150 dias	180 dias
À Campo	118,282aD	158,978aA	116,913aD	143,273aB	130,104aC	155,076aA
Ao Abrigo	100,732bB	112,980bA	110,164aAB	110,458bAB	108,576bAB	102,619bAB

OBS: dms para colunas =11,368; dms para linhas =11,368. Classificação com letras minúsculas para fator 1 e classificação com letras maiúsculas para fator 2. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

D – Poder Calorífico Superior

Tabela 25. Análise de variância, anova da variável poder calorífico superior.

Quadro de Análise						
FV	GL	SQ	QM	F	Fcrit.	P<=
Fator1(F1)	1	1316757,20417	1316757,20417	160,1140	7,15	1%
1Fator2(F2)	5	675499,53750	135099,90750	16,4278	3,3927	1%
Int. F1xF2	5	906291,67083	181258,33417	22,0405	3,3927	1%
Fat x Testemunha	1	275401,27212	275401,27212	33,4880	7,15	1%
Tratamentos	12	3173949,68462	264495,80705	32,1620	2,548	1%
Resíduo	52	427641,30000	8223,87115			
Total	64	3601590,98462				

Tabela 26. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 1 (Forma do material e de estocagem) a 5% de probabilidade.

Fator 1 – Estocagem			
Tratamento	Média	DMS	Diferença estatística
à Campo	4455,9330	47,0087	B
Ao abrigo de intempéries	4752,2170	47,0087	A

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 27. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 2 (Período de Estocagem) à 5% de probabilidade.

Fator 2 – Período de estocagem			
Tratamento	Média	DMS	Diferenciação estatística
30 dias	4775,70	119,91	A
60 dias	4539,20	119,91	CD
90 dias	4691,45	119,91	AB
120 dias	4621,35	119,91	BC
150 dias	4540,85	119,91	CD
180 dias	4455,90	119,91	D

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 28. Teste Tukey para diferenciação de médias de interação a 5% de probabilidade.

Fator1	Fator 2					
	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	150 dias	180 dias
À Campo	4792,90aA	4372,40bCD	4665,60aAB	4505,90bBC	4268,50bDE	4130,30bE
Ao Abrigo	4758,50aA	4706,00aA	4717,30aA	4736,80aA	4813,20aA	4781,50aA

OBS: dms para colunas =115,15; dms para linhas =169,59. Classificação com letras minúsculas para fator 1 e classificação com letras maiúsculas para fator 2. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

E – Poder Calorífico Líquido

Tabela 29. Análise de variância, anova da variável poder calorífico líquido.

FV	Quadro de Análise					
	GL	SQ	QM	F	Fcrit.	P<=
Fator1(F1)	1	17405836.02316	17405836.0232	747.1551	7,15	1%
Fator2(F2)	5	249967.30835	49993.46167	2.1460	3,3927	ns
Int. F1xF2	5	3609027.51407	721805.50281	30.9839	3,3927	1%
Fat x Testemunha	1	1064279.74522	1064279.74522	45.6848	7,15	1%
Tratamentos	12	22329110.59080	1860759.21590	79.8741	2,548	1%
Resíduo	52	1211399.65579	23296.14723			
Total	64	23540510.24659				

Tabela 30. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 1 (Forma do material e de estocagem) a 5% de probabilidade.

Tratamento	Fator 1 – Estocagem		
	Média	DMS	Diferença estatística
à Campo	1834.62	79.12	B
Ao abrigo na fábrica	2911.83	79.12	A

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 31. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 2 (Período de estocagem) à 5% de probabilidade.

Tratamento	Fator 2 – Período de estocagem		
	Média	DMS	Diferenciação estatística
30 dias	2340.37	201.83	A
60 dias	2476.26	201.830	A
90 dias	2397.12	201.830	A
120 dias	2422.36	201.830	A
150 dias	2307.18	201.830	A
180 dias	2296.06	201.83	A

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 32. Teste Tukey para diferenciação de médias de interação a 5% de probabilidade.

Fator1	Fator 2					
	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	150 dias	180 dias
À Campo	2233,59bA	2143,34bA	1832,62bB	1745,56bBC	1543,92bC	1508,69bC
Ao Abrigo	2447,15aC	2809,18aB	2961,63aAB	3099,16aA	3070,44aAB	3083,44aAB

OBS: dms para colunas = 193.80; dms para linhas = 285.43. Classificação com letras minúsculas para fator 1 e classificação com letras maiúsculas para fator 2. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

F – Teor de Voláteis

Tabela 33. Análise de variância, anova da variável teor de voláteis.

Quadro de Análise						
FV	GL	SQ	QM	F	Fcrit.	P<=
Fator1(F1)	1	145,45447	145,45447	44,9183	7,15	1%
1Fator2(F2)	5	218,48062	43,69612	13,4939	3,3927	1%
Int. F1xF2	5	140,86386	28,17277	8,7001	3,3927	1%
Fat x Testemunha	1	47,13801	47,13801	14,5568	7,15	1%
Tratamentos	12	551,93696	45,99475	14,2038	2,548	1%
Resíduo	52	168,38656	3,23820			
Total	64	720,32352				

Tabela 34. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 1 (Forma do material e de estocagem) a 5% de probabilidade.

Tratamento	Fator 1 – Estocagem		
	Média	DMS	Diferença estatística
à Campo	72,68	0,933	B
Ao abrigo de intempéries	75,79	0,933	A

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 35. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 2 (Período de estocagem) à 5% de probabilidade.

Tratamento	Fator 2 – Período de estocagem		
	Média	DMS	Diferenciação estatística
30 dias	77,03	2,379	A
60 dias	76,11	2,379	AB
90 dias	74,41	2,379	BC
120 dias	72,94	2,379	CD
150 dias	73,57	2,379	CD
180 dias	71,35	2,379	D

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 36. Teste Tukey para diferenciação de médias de interação a 5% de probabilidade.

Fator1	Fator 2					
	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	150 dias	180 dias
À Campo	77,52aA	74,72bAB	74,35aAB	71,42bBC	70,69bCD	67,36bD
Ao Abrigo	76,55aA	77,50aA	74,47aA	74,45aA	76,45aA	75,33aA

OBS: dms para colunas =2,285; dms para linhas =3,365. Classificação com letras minúsculas para fator 1 e classificação com letras maiúsculas para fator 2. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

G – Teor de Carbono Fixo

Tabela 37. Análise de variância, anova da variável teor de carbono fixo.

Quadro de Análise						
FV	GL	SQ	QM	F	Fcrit.	P<=
Fator1(F1)	1	22,98905	22,98905	19,8207	7,15	1%
1Fator2(F2)	5	42,50381	8,50076	7,3292	3,3927	1%
Int. F1xF2	5	22,15522	4,43104	3,8204	3,3927	1%
Fat x Testemunha	1	5,64653	5,64653	4,8683	4,0269	5%
Tratamentos	12	93,29461	7,77455	6,7031	2,548	1%
Resíduo	52	60,31216	1,15985			
Total	64	153,60677				

Tabela 38. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 1 (Forma do material e de Estocagem) a 5% de probabilidade.

Tratamento	Fator 1 – Estocagem		
	Média	DMS	Diferença estatística
à Campo	20,99	0,558	B
Ao abrigo de intempéries	22,23	0,558	A

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 39. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 2 (Período de Estocagem) à 5% de probabilidade.

Tratamento	Fator 2 – Período de estocagem		
	Média	DMS	Diferenciação estatística
30 dias	21,63	1,424	AB
60 dias	20,75	1,424	B
90 dias	22,53	1,424	A
120 dias	22,70	1,424	A
150 dias	20,40	1,424	B
180 dias	21,66	1,424	AB

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 40. Teste Tukey para diferenciação de médias de interação a 5% de probabilidade.

Fator1	Fator 2					
	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	150 dias	180 dias
À Campo	21,57aA	20,51aAB	22,48aA	22,18aA	18,70bB	20,52bAB
Ao Abrigo	21,68aAB	21,09aB	22,59aAB	23,22aA	22,10aAB	22,80aAB

OBS: dms para colunas =1,367; dms para linhas =2,014. Classificação com letras minúsculas para fator 1 e classificação com letras maiúsculas para fator 2. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

H – Teor de Cinzas

Tabela 41. Análise de variância, anova da variável teor de cinzas.

Quadro de Análise						
FV	GL	SQ	QM	F	Fcrit.	P<=
Fator1(F1)	1	284.09576	284.09576	156.6183	7,15	1%
1Fator2(F2)	5	218.23471	43.64694	24.0620	3,3927	1%
Int. F1xF2	5	258.07690	51.61538	28.4549	3,3927	1%
Fat x Testemunha	1	20.15535	20.15535	11.1114	7,15	1%
Tratamentos	12	780.56271	65.04689	35.8595	2,548	1%
Resíduo	52	94.32474	1.81394			
Total	64	874.88746				

Tabela 42. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 1 (Forma do material e de estocagem) a 5% de probabilidade.

Fator 1 – Estocagem			
Tratamento	Média	DMS	Diferença estatística
à Campo	6,33	0,70	A
Ao abrigo de intempéries	1,98	0,70	B

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 43. Teste Tukey para diferenciação de médias do Fator 2 (Período de estocagem) à 5% de probabilidade.

Fator 2 – Período de estocagem			
Tratamento	Média	DMS	Diferenciação estatística
30 dias	1,34	1,781	D
60 dias	3,13	1,781	C
90 dias	3,05	1,781	CD
120 dias	4,36	1,781	BC
150 dias	6,03	1,781	AB
180 dias	6,99	1,781	A

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 44. Teste Tukey para diferenciação de médias de interação a 5% de probabilidade.

Fator1	Fator 2					
	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	150 dias	180 dias
À	0,91aD	4,77aBC	3,17aCD	6,40aB	10,61aA	12,12aA
Campo						
Ao	1,77aA	1,50bA	2,94aA	2,33bA	1,46bA	1,87bA
Abriço						

OBS: dms para colunas =1,710; dms para linhas =2,519. Classificação com letras minúsculas para fator 1 e classificação com letras maiúsculas para fator 2. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si à níveis de 5% de probabilidade de erro.