

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

LUÍS HENRIQUE FERRARI

**MÉTODOS DE CAVAQUEAMENTO E TEMPOS DE ESTOCAGEM NO DESEMPENHO
OPERACIONAL E NA QUALIDADE DA BIOMASSA ENERGÉTICA DE *Pinus taeda* L.**

LAGES - SC

2021

LUÍS HENRIQUE FERRARI

**MÉTODOS DE CAVAQUEAMENTO E TEMPOS DE ESTOCAGEM NO DESEMPENHO
OPERACIONAL E NA QUALIDADE DA BIOMASSA ENERGÉTICA DE *Pinus taeda* L.**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Jean Alberto Sampietro

Coorientadora: Prof. Dra. Martha Andréia Brand

LAGES - SC

2021

Ferrari, Luís Henrique
MÉTODOS DE CAVAQUEAMENTO E TEMPOS DE
ESTOCAGEM NO DESEMPENHO OPERACIONAL E NA
QUALIDADE DA BIOMASSA ENERGÉTICA DE *Pinus taeda*
L. / Luís Henrique Ferrari. -- 2021.
116 p.

Orientador: Jean Alberto Sampietro
Coorientadora: Martha Andréia Brand
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal,
Lages, 2021.

1. Cavaqueador móvel florestal. 2. Biomassa florestal
energética. 3. Tempo de estocagem. 4. Balanço energético. I.
Sampietro, Jean Alberto. II. Brand, Martha Andréia. III.
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de
Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Florestal. IV. Título.

LUÍS HENRIQUE FERRARI

**MÉTODOS DE CAVAQUEAMENTO E TEMPOS DE ESTOCAGEM NO DESEMPENHO
OPERACIONAL E NA QUALIDADE DA BIOMASSA ENERGÉTICA DE *Pinus taeda* L.**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Jean Alberto Sampietro

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membros:



Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes

Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná – UNICENTRO

Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

Universidade Federal do Paraná – UFPR

Lages, 28 de maio de 2021.

Dedico este meu trabalho à Deus, minha
família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que me deu forças e me proporcionou esta oportunidade.

À Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, pela excelência no estudo gratuito e de qualidade.

Ao meu orientador Jean Alberto Sampietro, pela parceria de longo tempo, desde os tempos de graduação até o final deste etapa do mestrado.

À minha coorientadora Martha Andreia Brand, pela paciência, dicas e desenvolvimento deste estudo.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, minha força, minha superação, vem do amor que tenho por vocês.

À minha namorada, que passou por todo esse período de aprendizado ao meu lado.

Aos meus amigos de toda jornada, que estão ao nosso lado durante toda a nossa vida.

À Klabin S/A por me proporcionar todo recurso necessário ao desenvolvimento deste estudo e por toda colaboração, passo primordial ao sucesso deste.

À todos aqueles que estiveram ao meu lado, pessoalmente ou à distância, o meu muito obrigado.

RESUMO

O aproveitamento da madeira de florestas plantadas em sua totalidade, a alta demanda por fontes renováveis de combustíveis, bem como a necessidade de redução dos custos com mecanização das operações de silvicultura e o máximo aproveitamento das áreas produtivas, refletem a importância do correto manejo da biomassa florestal energética. Este trabalho teve como objetivo realizar a avaliação do desempenho operacional e o potencial energético da biomassa energética de *Pinus taeda* L. em diferentes métodos de cavaqueamento e tempos de estocagem. Foram testados os métodos de cavaqueamento com tambor de martelos e tambor de facas em diferentes tempos de estocagem em campo (0 a 200 dias para martelos e 0 a 225 dias para facas). A análise operacional das máquinas do sistema foi realizada por meio de estudo de tempos e movimentos em nível de turno, determinando-se a disponibilidade mecânica (%) e produtividade (em $gt.PMH^{-1}$ e $dt.PMH^{-1}$). A biomassa florestal produzida foi submetida às análises físicas, químicas e energéticas por meio da determinação do teor de umidade, densidade aparente, densidade aparente com 12% de umidade, teor de cinzas, poder calorífico superior e líquido, granulometria e composição física. Após, determinou-se o rendimento e balanço energético do sistema de cavaqueamento. Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva, correlação linear de Pearson, análise de covariância por Modelo Linear Geral e realizados ajustes de modelos dos indicadores operacionais e das características físicas, químicas e energéticas da biomassa. Os resultados operacionais demonstraram valores superiores de disponibilidade mecânica para o cavaqueador móvel florestal equipado com tambor de martelos, havendo efeito significativo sobre a produtividade, com maiores produtividades, também, neste método. O tempo de estocagem apresentou efeito significativo sobre as produtividades de todas as máquinas, com correlação positiva com o cavaqueador e negativa com as demais máquinas. Quanto as características qualitativas da biomassa energética, verificou-se que o método de cavaqueamento apresentou efeito significativo sobre o teor de umidade, sendo os menores valores de teor de umidade resultantes do tambor de martelos. Em relação ao efeito do tempo de estocagem, este apresentou efeito significativo com correlação positiva com a densidade aparente, densidade aparente a 12% de umidade, teor de cinzas, classe granulométrica $<3,35$ mm e com correlação negativa para o poder calorífico superior. Sobre a composição

física da biomassa, houve efeito com correlação negativa entre o tempo de estocagem e as proporções de acículas e casca nas classes granulométricas de 31,4 a 16 mm e 15,9 a 8 mm. Por fim, o tempo de estocagem apresentou efeito significativo sobre o rendimento energético, onde, ao se aumentar o tempo de estocagem há queda nos resultados de rendimento energético. O balanço energético da biomassa florestal foi influenciado significativamente pelo método de cavaqueamento e tempo de estocagem, obtendo os melhores resultados no método de martelos. A maximização do balanço energético ocorreu aos 50 dias para martelos e 0 dias para facas. Sendo assim, o método de martelos apresentou melhores resultados operacionais e o tempo de estocagem apresentou influência sobre a caracterização física, química, energética e balanço energético da biomassa florestal.

Palavras-chave: Cavaqueador móvel florestal, biomassa florestal energética, tempo de estocagem, balanço energético.

ABSTRACT

The use of wood from planted forests in its entirety, the high demand for renewable sources of fuels, as well as the need to reduce costs with mechanization of forestry operations and the maximum use of productive areas, reflect the importance of correct management of energy forest biomass. The objective of this work was to evaluate the operational performance and energy potential of the energy biomass of *Pinus taeda* L. different chipping methods and storage times. Hammer drum and knife drum chipping methods were tested at different storage times in the field (0 to 200 days for hammers and 0 to 225 days for knives). The operational analysis of the system machines was performed through a time and motion study at shift level, determining mechanical availability (%) and productivity (in gt.PMH^{-1} and dt.PMH^{-1}). The forest biomass produced was submitted to physical, chemical and energetic analyses by determining moisture content, apparent density, apparent density with 12% moisture, ash content, superior and liquid calorific value, granulometry and physical composition. After that, the energy efficiency and balance of the chipping system was determined. The data were analyzed by descriptive statistics, Pearson linear correlation, covariance analysis by General Linear Model and adjustments of models of operational indicators and physical, chemical and energy characteristics of biomass were made. The operational results demonstrated higher mechanical availability values for the mobile forestry chipper equipped with hammer drum, there is a significant effect on productivity, with higher productivity, also, in this method. Storage time had a significant effect on the productivity of all machines, with positive correlation with the chipper and negative with the other machines. As for the qualitative characteristics of energy biomass, it was found that the chipping method had a significant effect on the moisture content, the lowest values of moisture content resulting from the hammer drum. Regarding the effect of storage time, it showed a significant effect with a positive correlation with the apparent density, apparent density at 12% moisture, ash content, granulometric class <3.35 mm and with negative correlation for superior calorific value. On the physical composition of biomass, there was an effect with negative correlation between storage time and the proportions of leaf and bark in the granulometric classes of 31.4 to 16 mm and 15.9 to 8 mm. Finally, storage time had a significant effect on energy efficiency, where, by increasing storage time there is a fall in energy efficiency results. The energy balance of forest biomass was significantly influenced by the chipping method and

storage time, getting the best results in the hammer method. The maximization of the energy balance occurred at 50 days for hammers and 0 days for knives. As such, the hammer method showed better operating results and storage time influenced the physical, chemical, energy characterization and energy balance of forest biomass.

Keywords: Mobile forest chipper, energy forest biomass, storage time, energy balance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema de cavaqueamento nas margens de estradas.....	26
Figura 2 – Sistema de cavaqueamento em pátios intermediários.	27
Figura 3 – Sistema de cavaqueamento na indústria.	27
Figura 4 – Sistema de cavaqueamento na floresta.	28
Figura 5 – Volume concentrado de biomassa florestal energética após a operação de enleiramento.	40
Figura 6 – Operação de cavaqueamento da biomassa florestal.	42
Figura 7 - Organograma das etapas desenvolvidas no estudo.	44
Figura 8 – Comportamento das produtividades observadas e estimadas pelo modelo ajustado das máquinas do sistema de cavaqueamento nos diferentes tempos de estocagem.	63
Figura 9 – Resultados observados e estimados do teor de umidade da biomassa florestal energética em função da variável tempo de estocagem.	68
Figura 10 – Resultados observados e estimados da densidade aparente da biomassa florestal energética em função da variável tempo de estocagem.	70
Figura 11 – Resultados observados e estimados da densidade aparente (12% umidade) da biomassa florestal energética em função da variável tempo de estocagem.	72
Figura 12 – Resultados observados e estimados do teor de cinzas da biomassa florestal energética em função da variável tempo de estocagem.	74
Figura 13 – Resultados observados e estimados de poder calorífico superior (a) e líquido (b) da biomassa florestal energética em função da variável tempo de estocagem.	77
Figura 14 – Resultados observados e estimados das classes diamétricas de 15,9 a 8 mm (a), 7,9 a 3,35 mm (b) e <3,35 mm (c) em função da variável tempo de estocagem.	81
Figura 15 – Resultados estimados da composição física da classe granulométrica $\geq 31,5$ mm da biomassa resultante da operação de biomassa configurada com método de cavaqueamento de martelos (a) e facas (b) para tempos de estocagem de 0, 75, 150 e 225 dias.	88

Figura 16 – Resultados estimados da composição física da classe granulométrica de 31,4 a 16 mm da biomassa resultante da operação de biomassa configurada com método de cavaqueamento de martelos (a) e facas (b) para tempos de estocagem de 0, 75, 150 e 225 dias.	89
Figura 17 – Resultados estimados da composição física da classe granulométrica de 15,9 a 8 mm da biomassa resultante da operação de biomassa configurada com método de cavaqueamento de martelos (a) e facas (b) para tempos de estocagem de 0, 75, 150 e 225 dias.	90
Figura 18 – Resultados estimados da composição física da classe granulométrica de 7,9 a 3,35 mm da biomassa resultante da operação de biomassa configurada com método de cavaqueamento de martelos (a) e facas (b) para tempos de estocagem de 0, 75, 150 e 225 dias.	91
Figura 19 – Resultados estimados da composição física da classe granulométrica <3,35 mm da biomassa resultante da operação de biomassa configurada com método de cavaqueamento de martelos (a) e facas (b) para tempos de estocagem de 0, 75, 150 e 225 dias.	92
Figura 20 – Resultados estimados do rendimento energético da operação de biomassa com métodos de cavaqueamento de martelos e facas em função da variável tempo de estocagem.	96
Figura 21 – Resultados estimados do balanço energético da operação de biomassa configurada com métodos de cavaqueamento de martelos e facas em função da variável tempo de estocagem.	98
Figura 22 – Comportamento do poder calorífico líquido da biomassa florestal estimado e produtividade do cavaqueador estimada para os métodos de cavaqueamento de martelos (a) e facas (b).	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Máquinas do sistema de colheita florestal de árvores inteiras (full-tree).	39
Tabela 2 – Máquinas do sistema de enleiramento de biomassa florestal.	40
Tabela 3 – Máquinas do sistema de cavaqueamento de biomassa florestal.	41
Tabela 4 - Configurações de tambor que equipam o cavaqueador móvel florestal Vermeer HG6800TX.....	43
Tabela 5 – Amostras da pesquisa nos métodos de cavaqueamento de martelos e facas, em diferentes períodos de estocagem em campo da biomassa energética.....	44
Tabela 6 – Estatística descritiva, normalidade e erro amostral dos resultados de disponibilidade mecânica.	54
Tabela 7 – Análise de covariância (GLM) relativo aos efeitos método de cavaqueamento e tempo de estocagem sobre a disponibilidade mecânica da escavadeira enleiramento, pá carregadeira, cavaqueador e escavadeira cavaqueamento.....	55
Tabela 8 – Estatística descritiva dos resultados de produtividade operacional.....	56
Tabela 9 – Resultados de p Value do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov das variáveis de produtividade (dt.PMH-1) transformadas.....	58
Tabela 10 – Análise de covariância (GLM) relativo aos efeitos método de cavaqueamento, tempo de estocagem e teor de umidade sobre as produtividades da escavadeira enleiramento, pá carregadeira, cavaqueador e escavadeira cavaqueamento.	58
Tabela 11 – Coeficientes de Correlação de Pearson entre os fatores tempo de estocagem, teor de umidade e produtividades operacionais (gt.PMH-1).	59
Tabela 12 – Coeficientes de Correlação de Pearson entre os fatores tempo de estocagem, teor de umidade e produtividades operacionais (dt.PMH-1).	60
Tabela 13 – Modelagem da produtividade das máquinas do sistema de cavaqueamento de biomassa florestal.	61
Tabela 14 - Estatística descritiva dos resultados de teor de umidade da biomassa florestal.....	66
Tabela 15 – Modelagem do teor de umidade da biomassa florestal energética.	67

Tabela 16 – Estatística descritiva dos resultados de densidade aparente da biomassa florestal.	69
Tabela 17 – Modelagem da densidade aparente da biomassa florestal energética.	69
Tabela 18 – Estatística descritiva dos resultados de densidade a granel da biomassa florestal.	70
Tabela 19 – Modelagem da densidade aparente (12% umidade) da biomassa florestal energética.	71
Tabela 20 – Estatística descritiva dos resultados de teor de cinzas da biomassa florestal.	72
Tabela 21 – Modelagem do teor de cinzas da biomassa florestal energética.	74
Tabela 22 – Estatística descritiva dos resultados de poder calorífico superior, inferior e líquido da biomassa florestal.	75
Tabela 23 – Análise de covariância (GLM) relativo ao efeito dos fatores método de cavaqueamento e tempo de estocagem sobre o poder calorífico superior e líquido.	76
Tabela 24 – Modelagem do poder calorífico superior e líquido da biomassa florestal energética.	76
Tabela 25 – Estatística descritiva das classes granulométricas de biomassa florestal.	79
Tabela 26 – Análise de covariância (GLM) relativo ao efeito dos fatores método de cavaqueamento e tempo de estocagem sobre a granulometria.	79
Tabela 27 – Modelagem das classes granulométricas de biomassa florestal energética.	80
Tabela 28 – Estatística descritiva da composição física das classes granulométricas de biomassa florestal produzida com método de cavaqueamento de martelos.	82
Tabela 29 – Estatística descritiva da composição física das classes granulométricas de biomassa florestal produzida com método de cavaqueamento de facas.	83
Tabela 30 – Análise de covariância (GLM) relativo ao efeito dos fatores do método de cavaqueamento e tempo de estocagem sobre a composição física.	84
Tabela 31 – Modelagem da composição física da classe granulométrica de $\geq 31,5$ mm de biomassa florestal energética.	85

Tabela 32 – Modelagem da composição física da classe granulométrica de 31,4 a 16 mm de biomassa florestal energética.....	86
Tabela 33 – Modelagem da composição física da classe granulométrica de 15,9 a 8 mm de biomassa florestal energética.....	86
Tabela 34 – Modelagem da composição física da classe granulométrica de 7,9 a 3,35 mm de biomassa florestal energética.	87
Tabela 35 – Modelagem da composição física da classe granulométrica de <3,35 mm de biomassa florestal energética.....	87
Tabela 36 – Coeficientes de Correlação de Pearson das características físicas, químicas, energéticas e tempo de estocagem da biomassa florestal. ...	94
Tabela 37 – Estatística descritiva do rendimento energético da operação de biomassa florestal.	95
Tabela 38 – Estatística descritiva do balanço energético da operação de biomassa florestal.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	Porcentagem
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
árv.ha ⁻¹	Árvores por hectare
CEN	European Committee for Standardization
cm	Centímetros
cm ³	Centímetros cúbicos
DIN	Deutsches Institut Für Normung
dt.PMH ⁻¹	Tonelada seca por hora máquina produtiva
EN	Norma Européia
G	Gramas
Gcal.h ⁻¹	Gigacalorias por hora
g.cm ⁻³	Gramas por centímetro cúbico
gKw.t ⁻¹	Grama quilowatts por tonelada
gt.ha ⁻¹	Tonelada verde por hectare
gt.PMH ⁻¹	Tonelada verde por hora máquina produtiva
GLM	Modelo Linear Geral
hp	Horsepower
kcal	Quilocalorias
kg	Quilogramas
kcal.kg ⁻¹	Quilocalorias por quilograma
kcal.t ⁻¹	Quilocalorias por tonelada
l.gt ⁻¹	Litros por tonelada verde
l.PMH ⁻¹	Litros por hora máquina produtiva
log	Logaritmo
m	Metros
m ²	Metros quadrados
m ³	Metros cúbicos
m ³ /árv	Metros cúbicos por árvore
NBR	Norma Brasileira
Prod	Produtividade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	HIPÓTESES	21
1.2	OBJETIVOS	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	BIOMASSA ENERGÉTICA FLORESTAL	23
2.2	FATORES INFLUENTES NO APROVEITAMENTO DA BIOMASSA FLORESTAL.....	24
2.2.1	SISTEMAS DE CAVAQUEAMENTO.....	24
2.2.1.1	CAVAQUEAMENTO NAS MARGENS DE ESTRADAS	25
2.2.1.2	CAVAQUEAMENTO EM PÁTIOS INTERMEDIÁRIOS	26
2.2.1.3	CAVAQUEAMENTO NA INDÚSTRIA	27
2.2.1.4	CAVAQUEAMENTO NA FLORESTA.....	28
2.3	ANÁLISE OPERACIONAL.....	30
2.3.1	OBJETIVOS DA ANÁLISE OPERACIONAL.....	30
2.3.2	ABORDAGEM DO ESTUDO	31
2.3.3	MÉTODOS DE MENSURAÇÃO DO TRABALHO	32
2.4	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E ENERGÉTICAS	34
2.4.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	34
2.4.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	35
2.4.3	PODER CALORÍFICO	36
2.5	BALANÇO ENERGÉTICO	36
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	38
3.1	ÁREA DE ESTUDO	38
3.2	CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO SISTEMA DE COLHEITA FLORESTAL.....	38
3.2.1	ENLEIRAMENTO	39
3.2.2	CAVAQUEAMENTO.....	41
3.3	PROCEDIMENTO AMOSTRAL.....	42
3.3.1	ANÁLISE OPERACIONAL DO SISTEMA DE CAVAQUEAMENTO	44
3.3.2	DISPONIBILIDADE MECÂNICA.....	45

3.3.3	PRODUTIVIDADE	46
3.3.4	RENDIMENTO E BALANÇO ENERGÉTICO	46
3.4	AVALIAÇÕES FÍSICAS, QUÍMICAS E ENERGÉTICAS	47
3.4.1	TEOR DE UMIDADE	48
3.4.2	DENSIDADE APARENTE	48
3.4.3	DENSIDADE APARENTE (12% DE UMIDADE)	49
3.4.4	TEOR DE CINZAS	49
3.4.5	PODER CALORÍFICO.....	49
3.4.6	GRANULOMETRIA	50
3.4.7	COMPOSIÇÃO FÍSICA	51
3.5	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1	ANÁLISE OPERACIONAL.....	54
4.1.1	DISPONIBILIDADE MECÂNICA	54
4.1.2	PRODUTIVIDADE DO SISTEMA DE CAVAQUEAMENTO	56
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E ENERGÉTICA	65
4.2.1	TEOR DE UMIDADE	65
4.2.2	DENSIDADE APARENTE	68
4.2.3	DENSIDADE APARENTE (12% UMIDADE)	70
4.2.4	TEOR DE CINZAS	72
4.2.5	PODER CALORÍFICO.....	75
4.2.6	GRANULOMETRIA	78
4.2.7	COMPOSIÇÃO FÍSICA	82
4.3	RENDIMENTO E BALANÇO ENERGÉTICO	94
4.3.1	RENDIMENTO ENERGÉTICO.....	94
4.3.2	BALANÇO ENERGÉTICO.....	97
5	CONCLUSÕES	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
	APÊNDICE A – MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DA ESCAVADEIRA ENLEIRAMENTO.....	107
	APÊNDICE B – MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DA PÁ CARREGADEIRA.....	108

APÊNDICE C – MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DO CAVAQUEADOR MÓVEL FLORESTAL.	109
APÊNDICE D – MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DA ESCAVADEIRA CAVAQUEAMENTO.	110
APÊNDICE E – PRODUTIVIDADES OBSERVADAS E ESTIMADAS (GT.PMH ⁻¹ E DT.PMH ⁻¹) DA ESCAVADEIRA ENLEIRAMENTO EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS TEMPO DE ESTOCAGEM E TEOR DE UMIDADE.	111
APÊNDICE F – PRODUTIVIDADES OBSERVADAS E ESTIMADAS (GT.PMH ⁻¹ E DT.PMH ⁻¹) DA PÁ CARREGADEIRA EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS TEMPO DE ESTOCAGEM E TEOR DE UMIDADE.....	112
APÊNDICE G – PRODUTIVIDADES OBSERVADAS E ESTIMADAS (GT.PMH ⁻¹ E DT.PMH ⁻¹) DO CAVAQUEADOR MÓVEL FLORESTAL EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS TEMPO DE ESTOCAGEM E TEOR DE UMIDADE.....	113
APÊNDICE H – PRODUTIVIDADES OBSERVADAS E ESTIMADAS (GT.PMH ⁻¹ E DT.PMH ⁻¹) DA ESCAVADEIRA CAVAQUEAMENTO EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS TEMPO DE ESTOCAGEM E TEOR DE UMIDADE.....	115

1 INTRODUÇÃO

O cultivo de florestas plantadas no Brasil concentra-se, em sua maioria, em espécies dos dois principais gêneros cultivados no país: *Pinus* e *Eucalyptus*, manejados com foco na industrialização da madeira, sendo que desta produção resulta como subproduto, também, a biomassa florestal energética, composta por pontas, galhos e folhas/acículas. Contudo, a crescente demanda por produtos florestais, além da alta concorrência por área produtiva com cultivares agrícolas e pecuária no Brasil, faz com que as empresas de base florestal tenham que repensar as suas operações, visando aproveitar ao máximo os recursos florestais de forma sustentável.

O uso de biomassa florestal energética em meio a aumentos no consumo de energia elétrica, reduz os índices de gás carbônico e demais poluentes, tornando-se a uma importante alternativa na geração de energia renovável, com potencial à ser explorado. Atualmente um dos maiores desafios para aumentar a utilização da biomassa florestal é o uso adequado das tecnologias de colheita de aproveitamento da biomassa, de forma a atender à crescente demanda por matéria-prima (ORO, 2015).

Dentre as tecnologias de colheita de aproveitamento da biomassa florestal energética, se enquadram os diferentes métodos de cavaqueamento, os quais influenciam na operação de aproveitamento da biomassa e na qualidade da matéria-prima entregue para geração de energia elétrica. Estes métodos são segregados conforme a configuração de tambor utilizada no cavaqueador.

O método de martelos, no qual a biomassa é triturada, em geral, apresenta maior disponibilidade mecânica e produtividade ao se diminuir o teor de umidade da biomassa florestal, sendo que, o material resultante desta operação apresenta maior heterogeneidade e superfície áspera.

No caso do método de cavaqueamento por facas, tende a apresentar menor disponibilidade mecânica, devido à necessidade frequente de troca de facas, apresentando melhor resultado de produtividade em cenários de maior teor de umidade da biomassa com produção de matéria-prima mais uniforme através da picagem.

Desse modo, como o método de cavaqueamento é determinante para maximizar a utilização da biomassa florestal, é necessário estudar o trabalho destas

operações visando obter a melhor escolha para cada situação. Estudos de tempos e movimentos foram e são frequentemente utilizados para gerenciar, analisar alternativas e melhorar o desempenho de operações florestais. Para isso, são investigados parâmetros ou indicadores operacionais, como a produtividade e disponibilidade mecânica, por meio da mensuração de tempos consumidos e a quantidade produzida (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

No entanto, a viabilização do aproveitamento da biomassa florestal energética, também, depende de características como poder calorífico, massa específica, teor de umidade e composição granulométrica, que são variáveis que precisam ser controladas para aumentar a eficiência de utilização e competitividade desta fonte de energia (BRAND, 2007).

Portanto, o desenvolvimento de estudos para qualificação da biomassa florestal para o uso energético tem sido um dos pontos importantes de pesquisa no Brasil e no mundo. Estes estudos visam aumentar o ganho energético do material nos processos de conversão em energia.

Porém, ainda existem algumas lacunas de conhecimento relativas à qualificação energética, como o efeito do tempo de estocagem. Este tempo é parte integrante do pré-tratamento da biomassa para o uso industrial e transformação do material em tempo adequado permite melhorar algumas propriedades físicas, químicas e energéticas da biomassa florestal para a geração de energia (BRAND, 2007).

Diante à importância do aproveitamento da matéria prima e da área produtiva, o elevado custo operacional dos sistemas de cavaqueamento da biomassa florestal e as potencialidades destes materiais com elevado potencial como combustível, esta pesquisa visou analisar o efeito do método de cavaqueamento e tempo de estocagem sobre desempenho operacional, qualidade e balanço energético de um sistema de cavaqueamento de biomassa residual de *Pinus taeda* L.

1.1 HIPÓTESES

As hipóteses levantadas com base nos problemas da pesquisa foram:

O método de cavaqueamento de martelos apresenta operacionalmente e na caracterização física, química e energética da biomassa, melhor resultado para o cavaqueamento de biomassa florestal energética de *Pinus taeda* L.

O tempo de estocagem apresenta influência sobre a caracterização física, química e energética da biomassa florestal e sobre o rendimento e balanço energético desta operação.

1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa teve como objetivo geral avaliar o desempenho operacional, potencial energético e a qualidade do produto de dois métodos de cavaqueamento em biomassa energética de *Pinus taeda* L., em diferentes tempos de estocagem.

Especificamente, objetivou-se:

- Mensurar e analisar os indicadores operacionais das atividades de enleiramento e cavaqueamento de biomassa energética de florestas de pinus com diferentes métodos de cavaqueamento e tempos de estocagem da biomassa;
- Mensurar e analisar o efeito do tempo de estocagem e o método de cavaqueamento na qualidade física, química e energética do material produzido;
- Modelar o desempenho operacional, as características físicas, químicas e energéticas da biomassa florestal energética cavaqueados por diferentes métodos de cavaqueamento e tempos de estocagem, e;
- Analisar balanço energético, em tonelada verde e seca, do sistema de enleiramento e cavaqueamento de biomassa energética de *Pinus taeda* L.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BIOMASSA ENERGÉTICA FLORESTAL

A crescente demanda por energia em decorrência do aumento populacional e da atividade industrial tem como uma das suas possibilidades de suprimentos a biomassa de origem florestal, que se apresenta como potencial alternativa a ser utilizada como fonte de energia limpa, renovável e produtora de empregos (SOARES *et al.*, 2006).

Um fator positivo a ser citado no Brasil, visto desta crescente demanda por energia, é resultante das grandes áreas de extensões cultiváveis, solo e condições climáticas adequadas, que se apresentam com grande potencial para produção de biomassa florestal. Os resíduos (em geral, galhos, casca e folhas) gerados durante o processo de produção, também, podem ser utilizados com grande potencial na geração de energia elétrica (VIEIRA, 2012), por isso, tais componentes são denominados de biomassa florestal energética.

Além deste grande potencial de fornecimento de biomassa para geração de energia, a matriz energética brasileira em comparação com o restante do mundo, é considerada limpa pelo uso intensivo das fontes de energia renováveis com importante participação da biomassa. No entanto, este material combustível citado ainda não recebe o destaque merecido no balanço energético nacional (BRAND *et al.*, 2014).

Conforme citado, dentro da matriz energética do Brasil considerada limpa, 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 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 (BRITO; BARRICHELO, 1979), citação confirmada ao passar dos anos, considerando que no atual momento existem florestas energéticas no Brasil e no mundo, as quais tem como principal objetivo o fornecimento de madeira para geração de energia.

Importante fonte de energia renovável, a biomassa florestal é considerada a única fonte renovável no fornecimento de carbono fixo, que é um dos principais ingredientes dos combustíveis (BRIDWATER, 2006), sendo esta resultante da operação de colheita florestal, operação de beneficiamento da madeira que gera produtos madeireiros com diversas finalidades. Dentre os produtos gerados pela colheita florestal, a biomassa florestal está entre as principais fontes de energia, sendo composto normalmente por toras com diâmetro abaixo de 8 cm, galhos, folhas, tocos e raízes (ORO, 2015).

Apesar de todo potencial de aproveitamento citado, a biomassa florestal ainda não é plenamente utilizada muitas vezes devido aos custos de coleta e transporte, que tornam esta matéria prima florestal pouco atrativa economicamente para o aproveitamento energético, sendo ainda a colheita deste material uma atividade complexa, dado o grande número de variáveis que afetam a produtividade e, consequentemente, os custos operacionais (CANTO *et al.*, 2006).

Diante de todo este contexto, é recomendável pensar em melhor aproveitar os recursos florestais, com ênfase em agregar valor em produtos alternativos e que são subutilizados ou simplesmente ficam na floresta, como no caso da biomassa florestal energética (MAGOSSI, 2007).

2.2 FATORES INFLUENTES NO APROVEITAMENTO DA BIOMASSA FLORESTAL

2.2.1 SISTEMAS DE CAVAQUEAMENTO

A operação de cavaqueamento consiste na redução do material em partículas menores, configurando-se na transformação da biomassa florestal, que representa parte dos sub produtos da colheita florestal, em biomassa florestal energética cavaqueada. 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).

Os cavaqueadores são classificados em picadores e trituradores. A escolha depende das dimensões e da uniformidade desejada do produto final (CHRISTOPHERSON *et al.*, 1993). Estes diferentes métodos de cavaqueamento

afetam em resultados operacionais, na qualidade física, química e energética do combustível e no balanço e rendimento energético da operação.

Os picadores de facas normalmente são empregados quando se deseja alta velocidade e uniformidade de cavacos em formato e dimensões (POTTIE; GUIMIER, 1985), sendo os picadores de tambor de facas indicados para materiais de formatos heterogêneos, como para o processamento de biomassa energética resultante da colheita de madeira. A aplicação deste método de cavaqueamento, resulta em um sistema mais sensível a presença de contaminantes, visto que as facas que compõem o tambor passíveis de grandes danos na presença deste material indesejado.

Os trituradores possuem martelos, que quebram ou despedaçam a madeira com alta ou baixa velocidade de rotação, produzindo cavacos de forma e tamanho irregulares e superfície áspera. Os trituradores são bastante tolerantes a impurezas na biomassa, como areia, solo e pequenas pedras, e têm a vantagem de não necessitarem de afiação de facas (POTTIE; GUIMIER, 1985).

Ainda segundo Pottie e Guimier (1985) a utilização de picador para o cavaqueamento da madeira apresenta menores consumos de energia no cavaqueamento de materiais com maiores teores de umidade. Em contrapartida, o triturador apresenta menores consumos de energia em materiais mais secos.

Para o cavaqueamento de biomassa energética, tem-se como opção mais utilizada em escala global, o cavaqueador de tambor equipado com martelos, que apresenta maior vida útil do conjunto de corte, atrelado principalmente à maior resistência à existência de contaminantes no material à ser processado.

A maior aplicabilidade do triturador no cavaqueamento de biomassa energética faz com que grande parte deste combustível produzido apresente irregularidade no seu formato e na distribuição granulométrica desta, fazendo com que a qualidade deste material não tenha a importância devida. Assim sendo, estudos relacionados a avaliar os efeitos destes diferentes métodos de cavaqueamento, visando o impacto destes nas análises operacionais, de qualidade da biomassa energética cavaqueada e nos indicadores de rendimento e balanço energético tenham grande importância.

2.2.1.1 CAVAQUEAMENTO NAS MARGENS DE ESTRADAS

Dentre os sistemas de cavaqueamento mais usuais no Brasil, encontra-se o cavaqueamento nas margens das estradas, neste a biomassa florestal é disposta as

margens das estradas, os quais normalmente são cavaqueados diretamente em veículos de transporte que posteriormente realizarão o transporte até a planta energética (LEINONEN, 2004 *apud* CANTO, 2009).

Os cavaqueadores do tipo trituradores são amplamente empregados por serem mais resistentes a impurezas adquiridas pela galhada das árvores durante a extração (CANTO, 2009). A integração entre o cavaqueador e o caminhão é considerado o ponto fraco deste sistema (HAKKILA, 2004 *apud* CANTO, 2009) (Figura 1).

Figura 1 – Sistema de cavaqueamento nas margens de estradas.

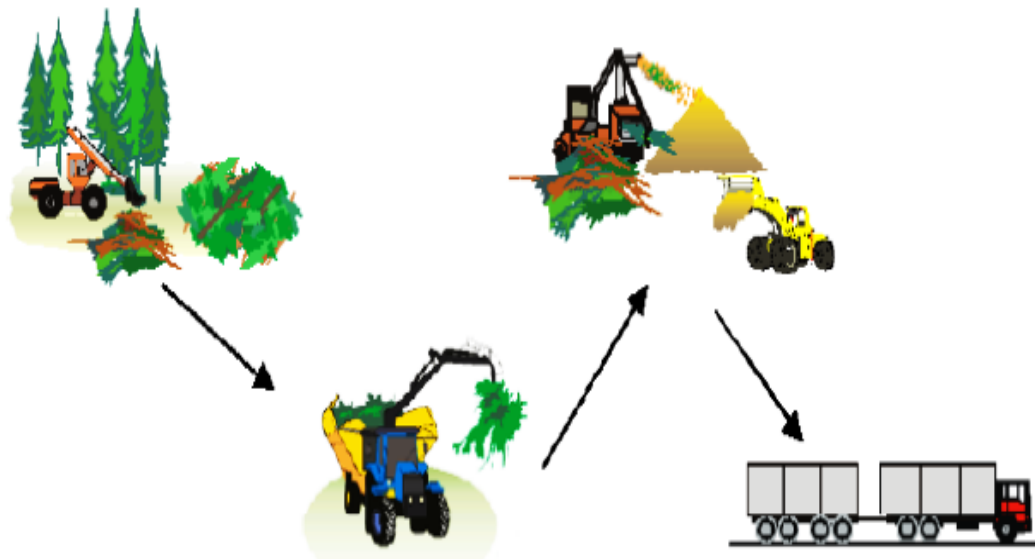


Fonte: Kallio e Leinonen (2005).

2.2.1.2 CAVAQUEAMENTO EM PÁTIOS INTERMEDIÁRIOS

Neste sistema a biomassa é inicialmente estocada em pátios intermediários para a perda de umidade, sendo empilhados com o auxílio de uma atividade adicional, o baldeio de biomassa florestal energética (GORTE, 2019). O material combustível resultante podem ser cavaqueados diretamente sobre os veículos para o transporte ou depositados sobre o terreno, formando estoques de reserva (LEINONEN, 2004) (Figura 2).

Figura 2 – Sistema de cavaqueamento em pátios intermediários.

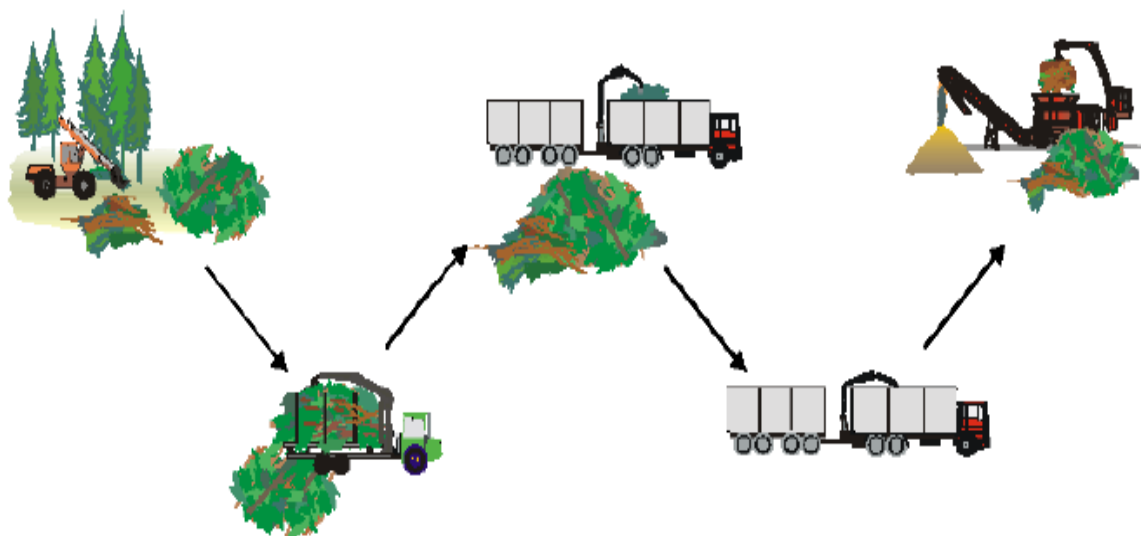


Fonte: Ranta, *et al.* (2001).

2.2.1.3 CAVAQUEAMENTO NA INDÚSTRIA

Neste sistema, a biomassa é transportada até o pátio de alimentação de conversão de biomassa para energia em sua forma original. O principal desafio deste sistema está relacionado com o custo por volume transportado, devido à baixa densidade da biomassa florestal energética (CANTO, 2009) (Figura 3).

Figura 3 – Sistema de cavaqueamento na indústria.



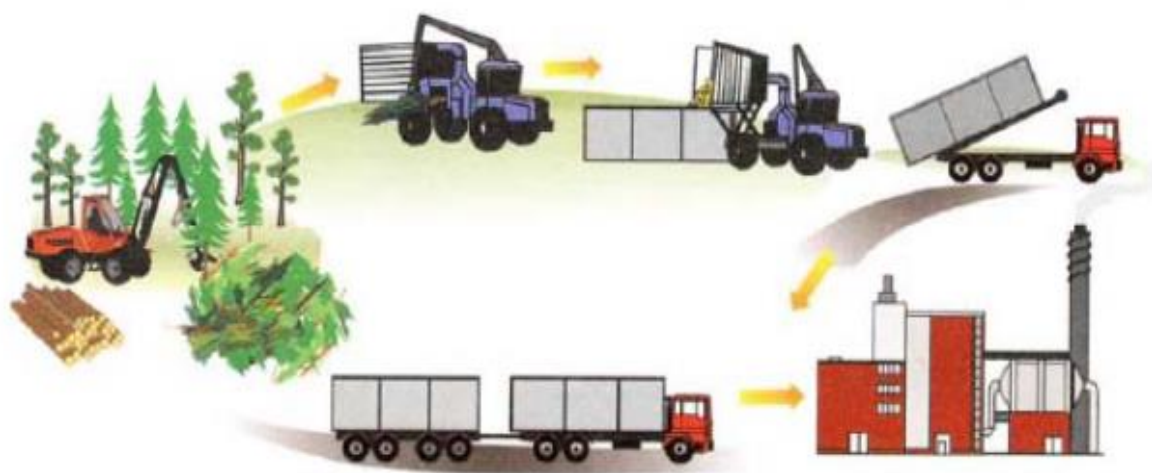
Fonte: Ranta, *et al.* (2001).

Neste sistema há o desafio relacionado ao custo do transporte deste material até as fábricas, entretanto, o sistema possui logística facilitada, uma vez que o carregamento e o transporte da biomassa florestal independe da etapa de cavaqueamento (RANTA e RINNE, 2006).

2.2.1.4 CAVAQUEAMENTO NA FLORESTA

O sistema com cavaqueamento dentro da floresta tem sido o menos utilizado no Brasil e no mundo. Este é baseado em uma única máquina (*Terrain Chipper*) que realiza a coleta e o cavaqueamento da biomassa florestal dentro floresta, depositando-os diretamente em um compartimento de carga. Após realizada a picagem, o *Terrain Chipper* descarrega os cavacos diretamente em comportimentos de cargas avulsos dispostos nas margens das estradas, que são transportados até a planta energética por caminhões (CANTO, 2009) (Figura 4).

Figura 4 – Sistema de cavaqueamento na floresta.



Fonte: Kallio e Leinonen (2005).

2.2.2 TEMPO DE ESTOCAGEM DA BIOMASSA FLORESTAL

O tempo de estocagem é um dos fatores mais importantes a ser considerado na qualidade da biomassa, podendo apresentar alterações das propriedades físicas, químicas e energéticas da biomassa, além de diretamente os custos operacionais de

cavaqueamento e da planta de geração de energia. Este item tem implicação direta sobre a imobilização do combustível e a ocupação de área para a realização da atividade (BRAND, 2007).

A biomassa florestal, por ser um elemento higroscópico, possui a capacidade de perder e/ou absorver água durante a sua estocagem, apresentando variação na quantidade de água presente no material. Assim, apresentando diferentes resultados de teor de umidade em relação ao tempo de estocagem sendo que essa variação impacta diretamente em outras características físicas e energéticas do combustível.

Conforme citado, uma das principais características afetadas pelo tempo de estocagem são os resultados de teores de umidade, que são reduzidos durante o período de tempo em que os materiais devem permanecer estocados (LEINONEN, 2004). Segundo Brand (2007), o tempo de estocagem deve ser suficiente para diminuir o teor de umidade da biomassa, sem ocorrer perdas energéticas devido à perda de massa seca. A estocagem pode ser influenciada também por outros fatores: local, época do ano, alterações climáticas, estações do ano, tipo e composição da biomassa e o grau final das propriedades desejado para a geração de energia.

O teor de umidade é um parâmetro muito importante para o aproveitamento, por meio da combustão, da energia contida na biomassa. A presença de água na biomassa afeta diretamente o poder calorífico líquido, até mais que a espécie, e essa relação é inversamente proporcional, ou seja, quanto maior o teor de umidade, menor o poder calorífico líquido (BRAND, 2010).

A influência do teor de umidade nos resultados de poder calorífico líquido do combustível dificulta a queima da biomassa energética e aumenta o consumo deste combustível, pois parte do calor gerado é usado para evaporar água. Isso aumenta o volume de produtos de combustão e os custos de transporte. A combustão em caldeiras de biomassa com alto teor de umidade provoca aceleração da corrosão da parte final da caldeira e o acúmulo de sujeira nas superfícies de aquecimento (BRAND, 2010).

Jirjis (2005) concluiu em seu estudo que houve pequena variação no potencial energético 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.

De qualquer forma, deve-se procurar alcançar as condições de menor teor de umidade, menor perda de massa possível, maior ganho energético, no menor tempo, evitando assim, a elevação dos custos desta operação (BRAND, 2007).

2.3 ANÁLISE OPERACIONAL

A realização de estudos que visem a conhecer a capacidade produtiva e as possíveis variáveis que interferem no rendimento de máquinas e equipamentos tornou-se uma preocupação crescente das empresas florestais, visando ao desenvolvimento de técnicas que melhorem o desempenho operacional e a eficiência das máquinas, maximizando a produtividade e indicadores de performance (Silva *et al.* 2003).

2.3.1 OBJETIVOS DA ANÁLISE OPERACIONAL

Objetivos precisos fazem com que o tempo e os recursos sejam utilizados de forma eficiente e ajudam no desenvolvimento de resultados desejados. Alguns possíveis exemplos de objetivos são: localizar ineficiências em um determinado sistema; determinar a produtividade de um operador de máquinas; comparar a produtividade de dois sistemas de colheita florestal; avaliar o tempo de inatividade de uma determinada máquina apontando as razões da inatividade e desenvolver modelos de produtividade para uma máquina (ACKERMAN *et al.*, 2014).

A definição dos objetivos de cada estudo deve ser guiada por alguns passos, sendo estes descritos como: problema específico a ser resolvido ou conhecimento a ser adquirido; uso previsto dos resultados do estudo e recursos disponíveis. Um exemplo, é a necessidade de precisão será diferente entre um estudo de baixo orçamento destinado a obter uma estimativa aproximada do desempenho esperado, e um estudo experimental em larga escala destinado a produzir diretrizes confiáveis para uso oficial. Por isso, é muito importante controlar o tempo utilizado para tal e consideração para formular o problema, para que ele atenda à expectativa do usuário final e ao orçamento disponível, seguindo as diretrizes esperadas para o projeto (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

Quanto ao objetivo, diferenciam-se estudos comparativos de estudos de modelagem. Estudos comparativos visam determinar como e se a produtividade ou o consumo de tempo é afetado por duas ou mais alternativas operacionais. Basicamente, estudos comparativos tentam divulgar os efeitos de fatores fixos. Em contraste, os estudos de modelagem visam determinar o efeito de variáveis contínuas, ou covariáveis sobre a variável de interesse (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

2.3.2 ABORDAGEM DO ESTUDO

Os estudos de medição do trabalho são classificados de acordo com o escopo, objetivos e características experimentais, sendo estes divididos em: estudos observacionais, estudos experimentais e estudos de modelagem (ACKERMAN *et al.*, 2014).

Nos estudos observacionais, também chamados de estudos descritivos não há o controle das variáveis influentes (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012), assim apresentando um menor controle sobre o experimento. A base de um estudo observacional, exige mais senso crítico do que a discussão dos efeitos de um tratamento, estudado através de estudo experimental. Dessa forma, ele fornece evidências indicativas, ao invés de conclusivas sobre o efeito das variáveis-alvo (BONAZZA, 2019).

Os estudos experimentais envolvem uma maior capacidade de controlar variáveis do processo, com níveis que podem ser adequadamente organizados em um forte delineamento experimental. Os conhecimentos obtidos a partir desses estudos são mais confiáveis e precisos quando comparados aos obtidos em estudos observacionais. Delineamentos experimentais e análise estatística adequada permitem contrastar o efeito das variáveis-alvo em relação ao efeito geral de todas as outras variáveis combinadas (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

Os delineamentos experimentais comparam diferentes variáveis para determinar diferenças ou estabelecer causa e efeito, sendo necessário mais controle da variação (como inclinação, tipo de máquina), resultado assim em projetos que geralmente são mais complexos. Devido à citada complexidade, são utilizadas diferentes técnicas para controlar o erro sistemático incluindo a casualização e o bloqueio (ACKERMAN *et al.*, 2014).

Em estudos envolvendo modelagem, deve-se gerar uma matriz das variáveis dependentes relevantes (como elementos de tempo de ciclo e produção) e variáveis independentes, antecipando quais podem influenciar a primeira variável (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012). Estes estudos de modelagem são feitos para observar máquinas, operadores ou sistemas e criar um modelo de produção ou custo baseado em uma série de fatores de entrada. Esses fatores de entrada devem ser mensuráveis e contínuos de preferência, significando que são quantitativos e dentro de um intervalo onde qualquer número pode existir (ACKERMAN *et al.*, 2014).

2.3.3 MÉTODOS DE MENSURAÇÃO DO TRABALHO

Os estudos de medição de trabalho são classificados de acordo com seu escopo, objetivos e características, em diferentes tipos de estudo, normalmente exigindo diferentes desenhos experimentais e técnicas estatísticas. O escopo do estudo pode ser descrito após a definição cuidadosa dos limites do sistema. Em geral, um estudo pode envolver um único trabalhador, uma única máquina ou todo um sistema (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

Normalmente um estudo de trabalho é dividido em duas partes, o estudo do método e medida do trabalho. Um estudo de método é normalmente a primeira etapa a fim de determinar qual o método ótimo para terminar uma dada tarefa. Um estudo de método é definido como um estudo onde a tarefa é sistematicamente gravada e analisada criticamente para encontrar formas de melhorar a conclusão da determinada tarefa (KANAWATY, 1992).

Já o resultado do estudo de tempo é tipicamente uma medida de produtividade por hora de máquina produtiva. Estes dados resultantes são muito úteis, permitindo a criação de padrões de operação ou de máquina, entradas precisas para modelos de custeio preexistentes e potencialmente a criação de modelos para prever a produtividade de máquinas e/ou operações dadas certas entradas (ACKERMAN *et al.*, 2014).

Um modelo de conceitos de tempo desenvolvido pela União Internacional de Organizações de Pesquisa Florestal (IUFRO) está incluso na norma, o qual foi útil para a divisão precisa de elementos de tempo comum incluídos em todos os sistemas de trabalho e produção. A norma descreve em detalhes os seis escopos diferentes de estudos de tempo, variando de curto a longo. Os estudos de tempo considerados são:

ao nível de turno, ao nível de parcela, ao nível de ciclo, determinação ou contagem do tempo e produção, amostragem do trabalho e ao nível de elemento do ciclo (ACKERMAN *et al.*, 2014).

O estudo ao nível de ciclo examina a produção ao nível do ciclo e a unidade observacional é um ciclo terminado, sendo este definido como uma sequência de tarefas que executam um trabalho ou produzem uma unidade de produção (KANAWATY, 1992). O principal entrave deste método de estudo é que ele não tem o detalhe elementar do processo de trabalho. As vantagens são o fornecimento de maneira rápida de ver a variabilidade no processo de trabalho e permite que as informações de interrupções sejam capturadas (ACKERMAN *et al.*, 2014).

Na medição ao nível de parcela, a unidade de observação consiste de uma parcela exclusiva. Assim, todos os dados de tempo necessário para a colheita da madeira da parcela são acumulados. Nesse caso a parcela pode ser considerada uma área ou um número pré-determinado de árvores. A entrada de tempo tem três possíveis métodos de coleta, sendo medida diretamente pelo pesquisador observando a operação, automaticamente por sensores conectados a um registrador de dados ou registrados manualmente por um operador cooperativo devidamente instruído (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

O estudo com base na medição ao nível de turno tem como base de observação um turno de trabalho. As medições ao nível de turno são realizadas manual ou automaticamente. No primeiro caso, os operadores recebem formulários de coleta de dados e são instruídos a anotar diariamente os dados do formulário. As mesmas informações podem ser coletadas automaticamente através de sensores apropriados, conectados à máquina de interesse. A medição ao nível de turno é geralmente a principal técnica usada para estudos de acompanhamento a longo prazo, pois este acompanhamento é realizado em paralelo a operação, visando determinar a utilização da máquina (taxa de utilização), a produtividade a longo prazo e a incidência de interrupções (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

Utilizando-se das definições de tempo da IUFRO, é possível calcular algumas taxas de utilização do tempo que contribuem para conhecimento e gerenciamento das tarefas, além de conhecer a produtividade e custos da operação. Para esses cálculos torna-se necessário a interpretação de índices propostos por Ackerman *et al.* (2014): SMH – *Schedule machine hour* ou Hora-máquina programada – É referente ao tempo de um turno de trabalho (exemplo 8 horas/turno/dia).

AMH – *Available machine hour* ou Hora máquina disponível – É o tempo em que a máquina está apta para trabalho, sendo descontados os intervalos de manutenção. PMH – *Productive machine hour* ou Hora máquina produtiva – É a porção de tempo em que está ocorrendo a produção de forma efetiva para uma determinada tarefa, é o tempo programado descontando os intervalos de manutenção e outras interrupções. HM – *Hour in maintenance* – Hora em manutenção – Refere-se ao tempo em que a máquina passou por algum tipo de manutenção.

A análise de dados passará pelas seguintes etapas: estatística descritiva, checagem dos *outliers*, checagem da normalidade, transformação dos dados (se necessário), comparação estatística e modelagem (MAGAGNOTTI; SPINELLI, 2012).

2.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS E ENERGÉTICAS

Para a adequada utilização da biomassa florestal, a caracterização física, química e energética do material é devidamente importante, objetivando chegar ao maior rendimento dos materiais. Independentemente do tipo de biomassa, é necessário obter os menores teores de umidade e perda de massa e maior ganho energético em menor tempo, reduzindo com isso, os custos de operação (BRAND, 2007).

2.4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Um dos fatores de 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. Souza (2010) descreve que o teor de água é considerado o fator que exerce a maior influência sobre a queima de materiais combustíveis.

Além de ser uma característica que não possui dificuldades para ser mensurada, o conteúdo de umidade é sempre um parâmetro importante para ser avaliado na madeira e na biomassa que serão destinados ao uso energético (CANTO, 2009). Quanto maior a proporção de água nos combustíveis de origem florestal, menor será o poder de combustão, visto que o processo de secagem do combustível absorverá parte da energia.

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). Esta densidade poderá influenciar no poder calorífico de um material na medida em que o calor gerado pela combustão está relacionado com a quantidade de massa, assim sendo, madeiras e derivados mais densos, apresentam maior poder calorífico por unidade volumétrica (ALMEIDA, 2016).

A característica física relacionada à distribuição dos materiais em diferentes classes de tamanho é conhecida como granulometria, onde a biomassa é distribuída em classes aceitáveis, finos (partículas menores que o aceitável) e *oversizes* (partículas maiores que o aceitável). Rackl e Günthner (2016) afirmam que quando as características da biomassa apresentam maior quantidade de finos, poderão proporcionar o travamento da rosca alimentadora e atrito na alimentação do reator da caldeira.

2.4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Parâmetros relevantes de combustível incluem as suas características físicas, como umidade, massa e quantidade de pós finos nos cavacos, e também a composição química do combustível (RACKL; GÜNTNER, 2016).

A proporção química do combustível considerado como teor 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 (BRAND, 2010).

Quando estes materiais inorgânicos são quimicamente ligados à estrutura de carbono e que resultam do processo de combustão, são denominados de cinzas naturais. As cinzas podem ainda ser agregadas à biomassa como partículas do solo mineral que foram aglutinados durante o crescimento; durante o processo de formação da casca, se elevando e se distribuindo ao longo do fuste com o processo de crescimento, ou durante a colheita, quando a madeira entra em contato com o solo e acaba arrastando resíduos de terra e também durante o transporte. Estas são caracterizadas como cinzas de contaminação (HANSEN; NYGAARD, 2014).

2.4.3 PODER CALORÍFICO

Uma das principais características de um combustível, é o seu poder calorífico, sendo este correspondente à quantidade de energia térmica total que é liberada na combustão de determinada quantidade de massa ou determinado volume de combustível. O poder calorífico é dependente de algumas propriedades 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).

O poder calorífico superior representa o calor liberado, ou seja, a quantidade máxima de energia que pode ser obtida da transferência de calor do combustível (NOGUEIRA, 2007). Segundo Cortez, Lora e Gómez (2008) pode-se dizer que a diferença entre o poder calorífico superior e o poder calorífico inferior é a energia gasta para evaporar a água formada durante a combustão a partir da oxidação do hidrogênio do combustível.

Quando não se considera o calor latente da condensação da água de ligação presente nos produtos de combustão, tem-se poder calorífico líquido, sendo a quantificação do poder calorífico líquido representado pelo poder calorífico superior descontada a energia térmica necessária para evaporar o hidrogênio e a água livre presentes no combustível (CORTEZ; LORA, GÓMEZ, 2008).

2.5 BALANÇO ENERGÉTICO

As máquinas empregadas na colheita de biomassa florestal consomem combustível e lubrificantes. Esse consumo de energia fóssil não renovável deve ser quantificado e comparado com a quantidade de energia contida na biomassa produzida. Somente a partir desse balanço energético é que se pode evidenciar a vantagem da colheita mecanizada de biomassa florestal para geração de energia (CANTO, 2009).

Sendo assim, o balanço energético tem como objetivo estabelecer os fluxos de energia através da identificação da demanda total, eficiência refletida pelo ganho líquido e pela relação produção/demanda, além da quantidade necessária para produzir ou processar um determinado produto, tornando-se um fator importante na

escolha de uma matéria-prima para a produção de energia (ROMANELLI, 2007 *apud* ALMEIDA, 2016).

Segundo Gazzoni *et al.* (2007), o balanço energético é o parâmetro mais adequado para definir a viabilidade técnica de um programa de bioenergia. Para ser positivo, o balanço energético depende de diversos fatores, em especial da produtividade energética da biomassa, menor consumo e maior produtividade do sistema.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em áreas produtivas de *Pinus taeda* L. pertencentes à empresa Klabin S/A na região da serra catarinense. O clima na região é classificado por *Köppen* como Cfb, ou seja, clima temperado constantemente úmido, com verão ameno onde as temperaturas médias do mês mais quente são inferiores a 22°C e com temperatura média anual entre 13,8 a 15,8°C (EPAGRI, 1998).

Os povoamentos florestais das áreas de estudo foram conduzidos sem nenhuma intervenção de podas e desbastes, ou seja, em regime de manejo *pulpwood*, com produção de madeira para fabricação de celulose e papel sendo o principal produto a ser produzido a partir destas. A densidade inicial dos plantios era de aproximadamente 1.666 árv.ha⁻¹, com ciclo produtivo entre 15 e 18 anos, contando com médias de diâmetro a altura do peito, altura e volumes individuais iguais à 26,0 cm, 22,1 m e 0,53 m³/árv, havendo após a colheita das toras, cerca de 114,9 gt.ha⁻¹ (tonelada verde por hectare produtivo) como média de massa resultante de biomassa florestal energética.

3.2 CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DO SISTEMA DE COLHEITA FLORESTAL

Para entendimento do sistema de cavaqueamento estudado, é necessário entender que, primeiramente, as operações envolvidas na colheita da madeira nos povoamentos de *Pinus taeda* L., que era realizada pelo sistema de árvores inteiras (*full-tree*), composto por *feller buncher*, *skidder* e *harvester* (Tabela 1).

A biomassa energética gerada pela operação de colheita da madeira era composta basicamente por ponteiros das árvores, galhos e acículas que ficavam depositados nas margens dos talhões de forma acumulada e permaneciam no campo durante um determinado período de tempo até a execução das atividades de cavaqueamento, período este definido neste estudo como tempo de estocagem. A biomassa em seguida passava pelas etapas de enleiramento, cavaqueamento e transporte até as fábricas para, então, serem aproveitadas para a geração de energia.

Tabela 1 – Máquinas do sistema de colheita florestal de árvores inteiras (*full-tree*).

Equipamento	Marca	Modelo	Função
<i>Feller buncher</i> 	<i>Tigercat</i>	L855C	Derrubada de árvores
<i>Skidder 6x6</i> 	<i>Tigercat</i>	635G	Arraste de árvores
<i>Harvester</i> 	<i>John deere</i>	953M com cabeçote <i>Waratah 622B</i>	Desgalhamento, destopamento, traçamento e empilhamento de toras

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

3.2.1 ENLEIRAMENTO

A operação de enleiramento foi realizada após o processamento das árvores e carregamento das toras, tendo esta o objetivo de concentrar o volume de biomassa em pontos específicos nas margens dos talhões operacionais, com o objetivo de reduzir o deslocamento do cavaqueador móvel florestal e aumentar a produtividade do sistema de cavaqueamento. As duas máquinas responsáveis pelo enleiramento de biomassa energética concentravam os volumes de biomassa em montes distanciados entre si em aproximadamente 150 m (Figura 5).

Na formação das pilhas pela operação de enleiramento, eram utilizados materiais homogêneos pertencentes ao mesmo talhão operacional, formando os montes compostos basicamente por pontas (diâmetro menor de 8 cm), galhos e acículas para posterior cavaqueamento. Após esta operação de enleiramento, levaram-se dois dias para o material ser cavaqueado e transportado.


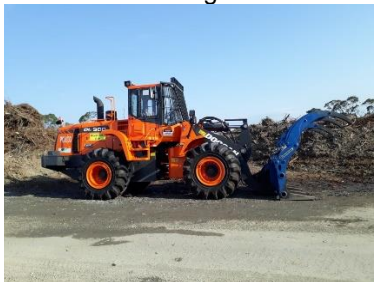
Figura 5 – Volume concentrado de biomassa florestal energética após a operação de enleiramento.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

As máquinas utilizadas eram uma pá carregadeira de rodas, *Doosan* DL300, com garfo frontal *Potenza* de 3,0 m³, que realizava o baldeio da biomassa florestal até a escavadeira hidráulica florestal *Doosan* DX225LC equipada com garra florestal *Rotobec* 1,0 m², que confeccionava os montes de biomassa florestal nas margens dos talhões operacionais (Tabela 2).

Tabela 2 – Máquinas do sistema de enleiramento de biomassa florestal.

Equipamento	Marca	Modelo	Função
Escavadeira hidráulica			
	<i>Doosan</i>	DX225LC com garra florestal Rotobec 1,0 m ²	Enleiramento de biomassa florestal
Pá carregadeira			
	<i>Doosan</i>	DL300 com garfo frontal Potenza 3,0 m ³	Enleiramento de biomassa florestal

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).



3.2.2 CAVAQUEAMENTO

O cavaqueamento da biomassa florestal energética era realizada por meio de cavaqueador móvel horizontal *Vermeer* HG6800TX equipado com um tambor rotativo. Para o carregamento da biomassa na calha de processamento do cavaqueador, era utilizada uma segunda escavadeira hidráulica *Doosan* DX225LC, também, equipada com garra florestal *Rotobec* 1,0 m² (Tabela 3).

Todo a biomassa florestal cavaqueada era descarregada da correia de descarga do cavaqueador diretamente sobre caminhões-caçamba, que realizavam o transporte do material processado para as fábricas (Figura 6).

O cavaqueador móvel empregado era o *Vermeer* HG6800TX, equipado com motor *caterpillar* C27, 8 cilindros em V, potência nominal de 950 hp e tanque de combustível com 1.200 litros de capacidade. Era operado através de controle remoto, que comandava todas as funções de operação e deslocamento.

Tabela 3 – Máquinas do sistema de cavaqueamento de biomassa florestal.

Equipamento	Marca	Modelo	Função
Cavaqueador móvel florestal			
	<i>Vermeer</i>	HG6800TX	Cavaqueamento de biomassa florestal
Escavadeira hidráulica			
	<i>Doosan</i>	DX225LC com garra florestal <i>Rotobec</i> 1,0 m ²	Abastecimento do cavaqueador móvel florestal

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Figura 6 – Operação de cavaqueamento da biomassa florestal.



Fonte: Elaborada pelo autor (2020).



3.3 PROCEDIMENTO AMOSTRAL

Foi avaliado o efeito de dois fatores sobre o desempenho operacional, qualidade e balanço energético da biomassa florestal energética. O primeiro fator, que se considerou como de efeito-fixo, foi o método de cavaqueamento, sendo testados: (i) processamento por tambor de martelos e; (ii) processamento por tambor de facas.

O cavaqueador composto por configuração de tambor de martelos, configura a máquina como um triturador, composto por 10 martelos e 20 cortadores (afixados nos martelos), que realizam o cavaqueamento do material no encontro destes cortadores contra a bigorna. Este método de cavaqueamento por martelos é indicado em operações com maior grau de contaminação do material, visto da durabilidade dos cortadores em contato com material contaminante (Tabela 4).

O tambor de facas, configura o cavaqueador como picador e é composto por 28 facas, além de blocos, suportes das facas e capas das facas, que realizam a picagem do material no momento de encontro entre facas e contra faca do equipamento (Tabela 4).

Tabela 4 - Configurações de tambor que equipam o cavaqueador móvel florestal
Vermeer HG6800TX.

Tambor	Configuração do cavaqueador	Detalhamento
<p>Martelos</p> 	Triturador	<p>Nº de cortadores: 20 Nº de martelos: 10</p> <p>Martelos fixos no tambor por parafusos, os quais sustentam os cortadores, fixos por parafusos e porcas.</p>
<p>Facas</p> 	Picador	<p>Nº de facas: 28 Nº de capas de facas: 28 Nº de suporte de facas: 28 Nº de blocos: 14</p> <p>Blocos fixos por parafusos no tambor, os quais sustentam os suportes de facas, facas e capas de facas, todas fixas no bloco por parafusos.</p>

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A mudança de configuração entre tambores neste equipamento era realizada de maneira simples, em aproximadamente oito horas de trabalho e consiste na troca do tambor e de seus mancais laterais somente, outras peças do cavaqueador, como bigorna/contra faca, peneiras e chapas de desgaste, permanecem as mesmas para ambas as configurações.

Além do fator método de cavaqueamento, foram testados diferentes períodos de estocagem do material em campo, considerando-se este fator como de efeito aleatório. O tempo de estocagem foi considerado o intervalo entre o processamento da madeira realizado pelo *harvester* na colheita de toras e o cavaqueamento da biomassa florestal energética via cavaqueador móvel florestal.

A amostragem do estudo (Tabela 5) contemplou os métodos de cavaqueamento via tambor de martelos e facas, sendo definidos os seguintes períodos estocagem à campo: 0, 40, 80, 109, 138, 186 e 200 dias para método de cavaqueamento de martelos e 0, 75, 150 e 225 dias para método de cavaqueamento de facas.

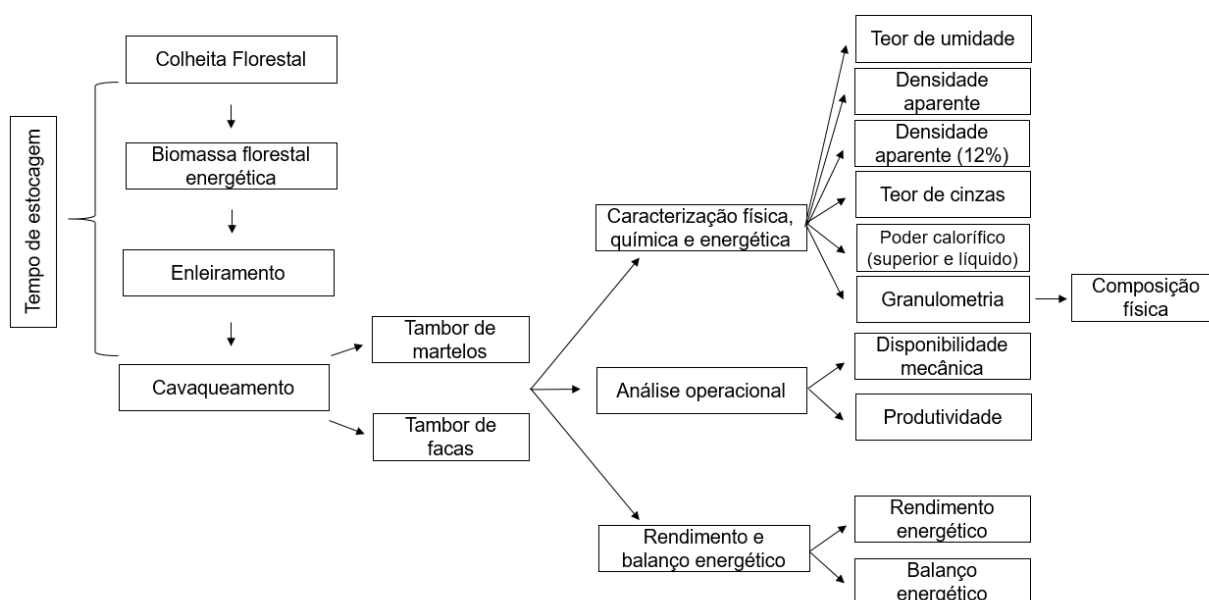
Tabela 5 – Amostras da pesquisa nos métodos de cavaqueamento de martelos e facas, em diferentes períodos de estocagem em campo da biomassa energética.

Amostras	Método de cavaqueamento	Período de estocagem em campo (Dias)
1	Martelos	0
2	Martelos	40
3	Martelos	80
4	Martelos	109
5	Martelos	138
6	Martelos	186
7	Martelos	200
8	Facas	0
9	Facas	75
10	Facas	150
11	Facas	225

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A Figura 7 demonstra o organograma do projeto, detalhando as etapas e análises que foram realizadas no presente estudo.

Figura 7 - Organograma das etapas desenvolvidas no estudo.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

3.3.1 ANÁLISE OPERACIONAL DO SISTEMA DE CAVAQUEAMENTO

A avaliação do desempenho operacional foi realizada através de estudos de tempos e movimentos, seguindo uma abordagem experimental e de modelagem,

utilizando método de amostragem ao nível de turno de trabalho. Neste método de amostragem, os dados foram obtidos através dos apontamentos realizados em diários operacionais, dos quais foram retirados os tempos consumidos para a produção de cada carga de biomassa florestal energética, tempos para manutenção da estrutura operacional e demais tempos consumidos durante os turnos de trabalho.

O primeiro passo foi a realização de estudo piloto, utilizado para cálculo da suficiência amostral das variáveis operacionais de interesse desta pesquisa, utilizando a metodologia proposta por Murphy (2005) e citada por Magagnotti e Spinelli (2012) através da equação (1), visando atingir uma probabilidade de erro de 5%.

$$n = \frac{(Sx^2 * t^2_{0,05})}{\left(E * \frac{\bar{x}}{100}\right)^2} \quad (1)$$

Onde: n = número de amostras; Sx^2 = variância dos dados; $t^2_{0,05}$ = valor tabelado da distribuição de Student a 5% de probabilidade; E = erro admitido; \bar{x} = média dos dados.

Após realizadas as coletas de dados, determinam-se os resultados de disponibilidade mecânica e produtividade, em tonelada verde e tonelada seca por hora máquina produtiva (*green tonnes per productive machine hour*, $gt.PMH^{-1}$ e *dry tonnes per productive machine hour*, $dt.PMH^{-1}$). Através dos consumos energéticos realizados pelas máquinas, foi possível a determinação do rendimento e balanço energético desta operação.

3.3.2 DISPONIBILIDADE MECÂNICA

A disponibilidade mecânica reflete a proporção em que os equipamentos estão aptos mecanicamente para serem operados, sendo calculada conforme a equação (2):

$$DM = \left(\frac{AMH}{SMH}\right) \times 100 \quad (2)$$

Onde: DM = disponibilidade mecânica (%); AMH = hora máquina disponível mecanicamente (h); SMH = hora máquina programada (h).

3.3.3 PRODUTIVIDADE

A produtividade foi calculada para as máquinas da estrutura de cavaqueamento de biomassa energética, sendo a relação entre a quantidade de cavacos produzidas em cada carga no veículo de transporte e os tempos consumidos para produção de tal quantidade. A quantificação do material se deu através do peso em tonelada, obtido pela pesagem em balanças rodoviárias, resultante da subtração do peso bruto total combinado pela tara de cada veículo, no momento do transporte do material do campo até as fábricas. A produtividade foi determinada em tonelada (umidade do momento do cavaqueamento) e tonelada seca (0% de umidade), sendo assim, calculadas pelas equações (3) e (4).

$$Prod = \left(\frac{\sum Q (0\%)}{\sum PMH} \right) \quad (3)$$

Onde: Prod = produtividade ($dt.PMH^{-1}$); Q (0%) = quantidade de biomassa seca (dt – dry ton/tonelada seca); PMH = total de horas efetivas trabalhadas (h).

$$Prod = \left(\frac{\sum Q}{\sum PMH} \right) \quad (4)$$

Onde: Prod = produtividade ($gt.PMH^{-1}$); Q = quantidade de biomassa (gt – green ton/tonelada verde); PMH = total de horas efetivas trabalhadas (h).

3.3.4 RENDIMENTO E BALANÇO ENERGÉTICO

O rendimento energético demonstra qual a massa de combustível necessária para a produção de determinado volume de material, neste caso, volume de biomassa florestal energética processada. O rendimento energético foi calculado por meio da equação (5).

$$RE = \left(\frac{C}{PE}\right) \quad (5)$$

Onde: RE = Rendimento energético (l.gt⁻¹); C = consumo de combustível (l.h⁻¹); PE = produtividade efetiva (gt.PMH⁻¹).

O balanço energético do sistema de cavaqueamento de biomassa energética de *Pinus taeda* L. foi resultante da razão entre produtividade energética e consumo energético do sistema. Os cálculos de produtividade energética, consumo energético e balanço energético são demonstrados nas equações (6), (7) e (8), respectivamente.

$$PE = (PCL * Prod) \quad (6)$$

Onde: PE = produtividade energética (kcal.PMH⁻¹); PCL = poder calorífico líquido (kcal.gt⁻¹), Prod = produtividade (gt.PMH⁻¹)

$$CE = (C * Ds * PCSd) \quad (7)$$

Onde: CE = consumo energético (kcal.PMH⁻¹); C = consumo de combustível (l.PMH⁻¹); Ds = densidade do diesel, considerada 0,85 kg.l⁻¹; PCSd = poder calorífico superior do diesel, considerado 10.676,4 Kcal.kg⁻¹.

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

Onde: BA = Balanço energético; PE = produtividade energética (kcal.PMH⁻¹); CE = consumo energético (kcal.PMH⁻¹).

3.4 AVALIAÇÕES FÍSICAS, QUÍMICAS E ENERGÉTICAS

A coleta se deu em montes cavaqueados no chão, nos quais, para cada amostra foram coletadas 25 repetições de 10 quilogramas. Todo o material foi coletado em sacos impermeáveis, evitando que as características do material coletado fossem alteradas pelas condições climáticas.

As características físicas, energéticas e químicas da biomassa avaliadas pós cavaqueamento, produzidas nos diferentes métodos de cavaqueamento e tempos de estocagem à campo do material foram as seguintes: teor de umidade, densidade aparente, densidade aparente com 12% de umidade, teor de cinzas, poder calorífico, granulometria e composição física.

3.4.1 TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade se baseou em quantificar o teor de água presente na biomassa energética. Para a determinação, as amostras dos tratamentos foram primeiramente pesadas em balança analítica de precisão de 0,001 g para determinação do peso úmido.

Na sequência, as amostras foram transportadas para secagem em estufas a 103°C, durante aproximadamente 24 horas, até obtenção de peso constante, para posterior pesagem do material seco, atendendo as exigências da norma EN 14774 (CEN, 2009). Sendo o teor de umidade calculado através da equação (9).

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

Onde: TU = teor de umidade em base úmida (%); PU = peso úmido da amostra (g); PS = peso seco da amostra (g).

3.4.2 DENSIDADE APARENTE

O cálculo da densidade aparente consiste na relação entre o peso e o volume do cavaco proveniente da biomassa florestal de *Pinus taeda* L, considerando o teor de umidade do momento de cavaqueamento da biomassa florestal. Para esta mensuração, utiliza-se de um recipiente com volume conhecido, neste caso, utilizou-se *beckers* de 0,05 m³ para obtenção do volume deste material. Para determinação do peso deste determinado volume, utilizou-se de balança analítica com precisão de 0,01 g, assim seguindo as exigências da norma EN 15103 (CEN, 2009). O cálculo da densidade aparente do cavaco é realizado através da equação (10).

$$DA = \left(\frac{P}{v} \right) \quad (10)$$

Onde: DA = densidade aparente (g.cm⁻³); P = peso da amostra (g); v = volume do becker (cm³).

3.4.3 DENSIDADE APARENTE (12% DE UMIDADE)

A densidade aparente à 12% de umidade é calculada através da relação entre o peso e o volume do cavaco proveniente da biomassa florestal de *Pinus taeda* L., considerando o teor de umidade da biomassa florestal energética de 12%, seguindo as exigências da norma EN 15103 (CEN, 2009). O cálculo da densidade aparente do cavaco é realizado através da equação (11), conforme demonstrado abaixo.

$$DG = \left(\frac{P}{v} \right) \quad (11)$$

Onde: DG = densidade aparente com 12% de umidade (g.cm⁻³); P = peso da amostra com teor de umidade igual à 12% (g); v = volume do Becker a 12% (cm³).

3.4.4 TEOR DE CINZAS

A análise do teor de cinzas da biomassa florestal foi realizada seguindo os parâmetros descritos na norma NBR 13999 (ABNT, 2017). Para a obtenção do teor de cinzas dos tratamentos, as amostras sem umidade e materiais voláteis, foram incineradas em mufla, em temperatura igual à 525°C.

3.4.5 PODER CALORÍFICO

A determinação do poder calorífico foi realizada seguindo a norma DIN 51900 (DIN, 2000). Para a determinação do poder calorífico superior, as amostras foram secas, trituradas e submetida à bomba calométrica.

Para a obtenção do poder calorífico inferior utilizou-se dos dados resultantes de poder calorífico superior e submetidos à equação (12) (BRAND, 2010).

$$PCI = PCS - (60 * 9 * (H\%/100)) \quad (12)$$

Onde: PCI = poder calorífico inferior (kcal.kg⁻¹); PCS = poder calorífico superior (kcal.kg⁻¹); H% = teor de hidrogênio médio.

A partir da experiência prática de equipe e pesquisa e das empresas que utilizam a biomassa energética florestal foram utilizados dois métodos de cálculo para poder calorífico, sendo o primeiro considerando amostras com resultados de teor de cinzas ≤10%, o qual é demonstrado pela equação (13).

$$PCLu = PCI * \left(\frac{100-TU}{100} \right) - (6 * TU) \quad (13)$$

Onde: PCLu = poder calorífico líquido (kcal.kg⁻¹); PCI = poder calorífico inferior (kcal.kg⁻¹); TU = teor de umidade da biomassa em base úmida (%).

Para amostras com teor de cinzas >10%, considerou-se este teor no cálculo do poder calorífico líquido, sendo dimensionado pela seguinte equação.

$$PCLu = PCI * \left(\left(\frac{100-TU}{100} \right) * \left(\frac{100-TC}{100} \right) \right) - (6 * TU) \quad (14)$$

Onde: PCLu = poder calorífico líquido (kcal.kg⁻¹); PCI = poder calorífico inferior (kcal.kg⁻¹); TU = teor de umidade da biomassa em base úmida (%); TC = teor de cinzas (%).

3.4.6 GRANULOMETRIA

A granulometria quantifica a proporção do material produzido por classe de tamanho físico. Para determinação da granulometria, as amostras foram submetidas a separação em classes de granulometria através de utilização de peneira vibratória, durante 20 minutos, com malhas de 3,35; 8; 16 e 31,5 mm, com o uso das normas EN 15149-1/ EN 15149-2 (CEN, 2011).

Após a etapa de peneiramento, com o material retido em cada malha das peneiras se deu a pesagem de cada malha da peneira vibratória, além da base que

retém todo material que passa por todas as malhas, ou seja, material com dimensões menores que 3,35 mm. Com o objetivo de quantificar o peso encontrado em cada classe granulométrica dos determinados tratamentos. Para se calcular a proporção de materiais em cada faixa de granulometria, utilizou-se a equação (15).

$$G(\%) = \left(\frac{Px}{Pt} \right) * 100 \quad (15)$$

Onde: G (%) = proporção de biomassa em determinada faixa de granulometria; Px = peso da biomassa nesta faixa de granulometria; Pt = peso total de biomassa (todas as granulometrias).

3.4.7 COMPOSIÇÃO FÍSICA

Utilizando-se dos volumes resultantes das análises granulométricas, nas classes de tamanho $\geq 31,5$ mm, 31,4 a 16 mm, 15,9 a 8 mm, 7,9 a 3,35 mm e $< 3,35$ mm realizou-se a determinação da composição física do material dentro de cada uma destas classes granulométricas, separando o volume em casca, acículas, material lenhoso (com e sem casca) e contaminantes.

Nas classes granulométricas de $\geq 31,5$ mm, 31,4 a 16 mm, 15,9 a 8 mm e 7,9 a 3,35 mm a separação foi realizada visualmente e manualmente. Para mensuração e quantificação de cada material dentro dos tratamentos, sendo a proporção calculada através da equação (16).

$$CF = \left(\frac{PC}{PT} \right) * 100 \quad (16)$$

Onde: CF = composição física (%); PC = peso seco do material classificado (g); PT = peso seco total do material (g).

Para a classe de menor granulometria ($< 3,35$ mm), devido à dificuldade de separação destes materiais, através da experiência prática de equipe e pesquisa e das empresas que utilizam a biomassa energética foi utilizado o método de lavagem do material com metodologia desenvolvida no presente estudo, utilizando de 60 litros de água por repetição. As etapas para a mensuração das proporções de acículas e

material contaminante iniciaram na análise de teor de umidade inicial, seguindo para a pesagem do material, lavagem deste, análise do teor de umidade final e pesagem do material pós lavagem.

Em posse de todos os resultados, a mensuração da proporção de acículas, que foi o material que se manteve após a lavagem da biomassa, foi calculada utilizando a equação (17).

$$CFac = \left(\frac{(PI * (1 - TUi)) - (PF * (1 - TUf))}{Pt} \right) * 100 \quad (17)$$

Onde: CFac = composição física acículas (%); PI = peso inicial do material classificado (g); PF = peso final do material classificado (g); TUi = teor de umidade do material pré lavagem (%); TUf = teor de umidade da biomassa pós lavagem (%); PT = peso seco total do material (g).

A mensuração da proporção de material contaminante da classe granulométrica <3,35 mm, se deu através da diferença da porcentagem de acículas da amostra, conforme demonstrado na equação (18).

$$CFmc = 100 - CFac \quad (18)$$

Onde: CFmc = composição física material contaminante (%); CFac = composição física acículas (%).

3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Todos os dados coletados foram, primeiramente, submetidos aos cálculos de estatística descritiva das variáveis de interesse, cálculo do erro amostral e cálculo de quartis para posterior eliminação de *outliers*.

A eliminação de *outliers* seguiu os critérios de Tukey (1977), Hoaglin (1983) e Regazzi e Leite (1993). Em seguida, foram realizados os cálculos de normalidade dos dados através do teste de *Kolmogorov-Smirnov* à 5% de significância.

As relações entre as variáveis analisadas foram avaliadas pelo coeficiente de correlação linear de *Pearson* (r), prosseguindo-se para a análise de covariância por Modelo Linear Geral.

Em seguida foram ajustadas equações de regressão linear múltipla utilizando o método de *stepwise*, com foco em modelar o comportamento das variáveis operacionais, qualidade física e química dos cavacos, em função dos métodos de cavaqueamento e tempo de estocagem. As equações ajustadas foram avaliadas através dos parâmetro de R^2 ajustado, erro padrão da estimativa (S_{yx}) e valor de F . Todas as análises estatísticas foram realizadas por meio do *software Statgraphics* 18.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE OPERACIONAL

4.1.1 DISPONIBILIDADE MECÂNICA

Os erros relativos amostrais para todas as máquinas se enquadraram abaixo dos 5% para a disponibilidade mecânica. Os resultados médios de disponibilidade mecânica das máquinas de enleiramento foram de 95,47% e 94,55% e medianas com valores de 96,98% e 95,90% para a escavadeira enleiramento e pá carregadeira, respectivamente (Tabela 6).

Tabela 6 – Estatística descritiva, normalidade e erro amostral dos resultados de disponibilidade mecânica.

Máquina	Método de cavaq.	n	Média	Mediana	E (%)	CV (%)	Mín.	Máx.	Curt.	Assim.	p Value
Escavadeira Enleiramento	Martelos e facas	54	95,47%	96,98%	1,39	5,11	83,33%	100,00%	0,29	-1,12	0,0260
Pá Carregadeira	Martelos e facas	42	94,55%	95,90%	1,58	5,07	81,67%	100,00%	0,83	-1,05	0,2522*
Cavaqueador	Martelos	40	98,07%	99,54%	0,79	2,46	92,34%	100,00%	-0,17	-1,01	0,0026
Cavaqueador	Facas	13	97,15%	98,11%	2,15	3,55	90,29%	100,00%	0,57	-1,25	0,5667*
Escavadeira Cavaqueamento	Martelos	31	97,53%	97,92%	0,87	2,38	91,23%	100,00%	0,37	-0,81	0,0959*
Escavadeira Cavaqueamento	Facas	18	96,00%	96,86%	2,16	4,35	86,12%	100,00%	0,35	-0,99	0,6614*

Legenda: n= número de amostras; E (%): erro relativo amostral; CV (%)= coeficiente de variação; Mín= mínimo; Máx= máximo; Curt.= curtose; Assim.= assimetria; p Value= valor do teste de *Kolmogorov-Smirnov*; *valores significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Os resultados de disponibilidade mecânica da escavadeira cavaqueamento foram de 97,53% e 96,00% para os métodos de cavaqueamento de martelos e facas, respectivamente. No caso da disponibilidade mecânica do cavaqueador móvel florestal, houve melhor resultado deste para o método de cavaqueamento de martelos, com valor médio igual à 98,07% para martelos contra 97,15% para facas (Tabela 6).

A diferença quanto à disponibilidade entre os métodos de cavaqueamento pode ser explicada, principalmente, pelas paradas mecânicas necessárias para realização

da troca de facas do cavaqueador móvel florestal, as quais acontecem com maior frequência quando comparadas as paradas mecânicas para troca de martelos.

Comportamento semelhante foi observado por Canto *et al.* (2011), os quais obtiveram em seu estudo 28% do tempo com manutenções mecânicas e uma disponibilidade mecânica igual à 72%, sendo que, grande parte desta indisponibilidade do cavaqueador móvel florestal, foi dispendido para as trocas de facas, onde estas representaram 24,5% de tempo improdutivo, em relação ao tempo total, em intervalo médio de 5,39 h entre trocas, com duração média de 38 min para cada troca.

Oro (2015) em seu estudo envolvendo a análise técnica de um cavaqueador em biomassa energética de Pinus, obteve resultados inferiores aos encontrados no presente estudo, onde o qual apresentou 86% de disponibilidade mecânica para o cavaqueador móvel florestal equipado com método de martelos, segundo Oro (2015), a maior causa deste resultado de disponibilidade mecânica foram as horas utilizadas para manutenção corretiva do cavaqueador.

Desse modo, verificou-se efeito significativo do fator método de cavaqueamento nos resultados de disponibilidade mecânica do cavaqueador móvel florestal na análise de covariância. O tempo de estocagem em campo da biomassa florestal não apresentou efeito significativo sobre a disponibilidade mecânica das outras máquinas do sistema de cavaqueamento (Tabela 7).

Tabela 7 – Valores de *p* da análise de covariância (GLM) relativo aos efeitos método de cavaqueamento e tempo de estocagem sobre a disponibilidade mecânica da escavadeira enleiramento, pá carregadeira, cavaqueador e escavadeira cavaqueamento.

Máquina	Método de cavaqueamento	Tempo de estocagem
Escavadeira Enleiramento	-	0,2310
Pá Carregadeira	-	0,4082
Cavaqueador	0,0001*	0,1257
Escavadeira Cavaqueamento	0,1453	0,7956

*valores significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

4.1.2 PRODUTIVIDADE DO SISTEMA DE CAVAQUEAMENTO

A análise da produtividade das máquinas do sistema de enleiramento demonstraram maiores produtividades da pá carregadeira em comparação à escavadeira no enleiramento, com produtividades de 57,05 gt.PMH⁻¹ e 28,65 dt.PMH⁻¹ para a escavadeira enleiramento e 68,80 gt.PMH⁻¹ e 33,51 dt.PMH⁻¹ para a pá carregadeira (Tabela 8).

Tabela 8 – Estatística descritiva dos resultados de produtividade operacional.

Máquina	Método de cavaq.	Variável	n	Média	Mediana	E (%)	CV (%)	Mín.	Máx.	Curt.	Assim.	p Value
Escavadeira Enleiramento	Martelos e Facas	gt.PMH ⁻¹	372	57,05	56,20	2,28	22,37	28,3	93,3	-0,45	-0,05	0,3045*
	Martelos e Facas	dt.PMH ⁻¹	380	28,65	28,04	2,44	24,18	15,8	45,49	-0,18	0,56	0,0986*
Pá Carregadeira	Martelos e Facas	gt.PMH ⁻¹	364	68,8	69,02	1,61	15,6	41,7	97,83	0,02	0,28	0,5104*
	Martelos e Facas	dt.PMH ⁻¹	351	33,51	32,88	1,74	16,57	23,1	48,64	0,52	0,74	0,0010
Cavaqueador	Martelos	gt.PMH ⁻¹	249	83,31	81,93	1,74	13,95	60,5	114	-0,42	0,45	0,2688*
	Facas	gt.PMH ⁻¹	136	81,37	82,45	1,59	9,39	64,9	102	-0,32	-0,07	0,3112*
	Martelos	dt.PMH ⁻¹	250	42,85	42,97	1,67	13,37	28	57,56	0	0,01	0,9459*
	Facas	dt.PMH ⁻¹	134	37,35	37,78	1,5	8,8	30	44,63	-0,66	-0,19	0,9459*
Escavadeira Cavaqueamento	Martelos	gt.PMH ⁻¹	257	95,78	93,21	2,66	21,66	56	148,1	-0,32	0,54	0,0508*
	Facas	gt.PMH ⁻¹	133	71,7	70,77	1,25	7,26	60,6	84,06	-0,52	0,3	0,4607*
	Martelos	dt.PMH ⁻¹	246	48,1	44,88	3,02	24,03	31,2	75,94	0,01	0,96	0,0010
	Facas	dt.PMH ⁻¹	133	33,03	32,87	1,17	6,82	28,1	38,79	-0,15	0,34	0,5772*

Legenda: n= número de amostras; E (%): erro relativo amostral; CV (%)= coeficiente de variação; Mín= mínimo; Máx= máximo; Curt.= curtose; Assim.= assimetria; p Value= valor do teste de Kolmogorov-Smirnov; *valores significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

O desempenho do cavaqueador com o método de cavaqueamento de martelos obteve os melhores resultados, apresentando produtividade igual à 83,31 gt.PMH⁻¹, sendo que, o método de facas apresentou produtividade de 81,37 gt.PMH⁻¹. A escavadeira cavaqueamento, também, apresentou maiores produtividades utilizando o método de cavaqueamento de martelos, com produtividade igual à 95,78 gt.PMH⁻¹ e 71,70 gt.PMH⁻¹ para o método de facas (Tabela 8).

Ao se retirar o fator teor de umidade da análise, transformando a produtividade em tonelada verde (gt.PMH^{-1}) para produtividade em tonelada seca (dt.PMH^{-1}), as tendências persistem como anteriormente para todas as máquinas. As produtividades do cavaqueador foram iguais à $42,85 \text{ dt.PMH}^{-1}$ para o método de martelos e $37,35 \text{ dt.PMH}^{-1}$ para o método de facas.

Assim como para o cavaqueador, o comportamento da produtividade em tonelada seca obteve maior produtividade para o método de martelos, com resultados de $48,10$ e $33,03 \text{ dt.PMH}^{-1}$, para martelos e facas respectivamente. Em todas as análises de produtividade realizadas os resultados de erro relativo amostral obtiveram resultados inferiores à 5% (Tabela 8).

Os resultados de produtividade (gt.PMH^{-1}) foram superiores aos encontrados por Oro (2015) que apresentou resultado de produtividade em tonelada verde igual à $59,2 \text{ t.PMH}^{-1}$ avaliando um cavaqueador *Vermeer* HG6000TX com potência de 630 hp, utilizando do método de cavaqueamento de martelos, diferença essa motivada pela diferença na capacidade dos cavaqueadores estudados.

Spinelli e Hartsough (2001) estudando mais de 100 sistemas de cavaqueamento com cavaqueadores de diversos portes e configurações na Europa, apresentaram um tempo médio de 10 minutos para a formação de uma tonelada de cavacos, resultando em produtividades de 6 gt.PMH^{-1} . Mola-Yudego *et al.* (2015), avaliaram a produtividade de diferentes picadores de disco e tambor na América do Norte, configurados com método de cavaqueamento de facas, obtiveram resultados de produtividade em tonelada verde semelhantes aos encontrados no presente estudo, com produtividade máxima de $91,04 \text{ gt.PMH}^{-1}$.

Aman, Baker e Dale Greene (2011) avaliando três empreiteiras de cavaqueamento, utilizando trituradores horizontais no cavaqueamento de biomassa florestal energética de *Pinus* e picadores horizontais no cavaqueamento de árvores inteiras nos EUA, obtiveram resultados de produtividade em tonelada verde próximos aos encontrados no presente estudo, resultados estes entre 64 e 70 gt.PMH^{-1} , não apresentando diferença significativa entre métodos de cavaqueamento.

Como os dados de produtividade da escavadeira cavaqueamento (dt.PMH^{-1}) e pá carregadeira (dt.PMH^{-1}) não apresentaram normalidade, estes foram transformados para possibilitar a realização de estatística seguinte (Tabela 9).

Tabela 9 – Resultados de *p Value* do teste de normalidade de *Kolmogorov-Smirnov* das variáveis de produtividade (dt.PMH⁻¹) transformadas.

Método de cavaqueamento	Máquina	Variável	<i>p Value</i>
Martelos e facas	Pá Carregadeira	log (dt.PMH ⁻¹)	0,0541*
Martelos	Escavadeira Cav	log (dt.PMH ⁻¹)	0,0534*

Legenda: *p Value*= valor do teste de *Kolmogorov-Smirnov*; *valores significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

As análises de covariância dos dados de produtividade em tonelada verde (gt.PMH⁻¹) e tonelada seca (dt.PMH⁻¹) demonstraram o efeito significativo dos fatores método de cavaqueamento e tempo de estocagem em todas as máquinas do sistema de cavaqueamento (Tabela 10).

Tabela 10 – Valores de *p* da análise de covariância (GLM) relativo aos efeitos método de cavaqueamento, tempo de estocagem e teor de umidade sobre as produtividades da escavadeira enleiramento, pá carregadeira, cavaqueador e escavadeira cavaqueamento.

Variável	Máquina	Método de cavaqueamento	Tempo de estocagem
gt.PMH ⁻¹	Escavadeira Enleiramento	-	0,0000*
	Pá Carregadeira	-	0,0000*
	Cavaqueador	0,0000*	0,0047*
	Escavadeira Cavaqueamento	0,0000*	0,0000*
dt.PMH ⁻¹	Escavadeira Enleiramento	-	0,0000*
	Pá Carregadeira	-	0,0000*
	Cavaqueador	0,0000*	0,0275*
	Escavadeira Cavaqueamento	0,0000*	0,0000*

*valores significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Houve correlação significativa entre o tempo de estocagem e a produtividade (gt.PMH^{-1}) de todas as máquinas do sistema de cavaqueamento, sendo positiva para produtividade do cavaqueador e negativa para as produtividades da escavadeira cavaqueamento, escavadeira enleiramento e pá carregadeira (Tabela 11).

Tabela 11 – Coeficientes de Correlação de *Pearson* entre os fatores tempo de estocagem, teor de umidade e produtividades operacionais (gt.PMH^{-1}).

gt.PMH^{-1}	Tempo de estocagem	Produtividade Cavaqueador	Produtividade Escavadeira Cavaqueamento	Produtividade Escavadeira Enleiramento	Produtividade Pá Carregadeira
Tempo de estocagem	1,00				
Produtividade Cavaqueador	0,27*	1,00			
Produtividade Escavadeira Cavaqueamento	-0,40*	0,22*	1,00		
Produtividade Escavadeira Enleiramento	-0,47*	0,27*	0,32*	1,00	
Produtividade Pá Carregadeira	-0,58*	0,35*	0,72*	0,75*	1,00

*correlação significativa ao nível de 5% de probabilidade; ^{ns} correlação não significativa
 Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Os coeficientes de correlação de *Pearson* para a produtividade em tonelada seca (dt.PMH^{-1}) apresentaram as mesmas tendências significativas da correlação anterior (gt.PMH^{-1}), positivas para cavaqueador e negativas para escavadeira cavaqueamento, escavadeira enleiramento e pá carregadeira (Tabela 12).

Tabela 12 – Coeficientes de Correlação de *Pearson* entre os fatores tempo de estocagem, teor de umidade e produtividades operacionais (dt.PMH⁻¹).

dt.PMH ⁻¹	Tempo de estocagem	Produtividade Cavaqueador	Produtividade Escavadeira Cavaqueamento	Produtividade Escavadeira Enleiramento	Produtividade Pá Carregadeira
Tempo de estocagem	1,00				
Produtividade Cavaqueador	0,20*	1,00			
Produtividade Escavadeira Cavaqueamento	-0,25*	0,50*	1,00		
Produtividade Escavadeira Enleiramento	-0,56*	0,14*	0,25*	1,00	
Produtividade Pá Carregadeira	-0,56*	0,43*	0,69*	0,70*	1,00

* correlação significativa ao nível de 5% de probabilidade; ^{ns} correlação não significativa.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Equações foram ajustadas levando em consideração as produtividades em tonelada verde e seca, contando como variáveis independentes o tempo de estocagem e o teor de umidade para a escavadeira enleiramento (APÊNDICE A), pá carregadeira (APÊNDICE B), cavaqueador móvel florestal (APÊNDICE C) e escavadeira cavaqueamento (APÊNDICE D).

O resultado da modelagem para a escavadeira enleiramento obteve como melhor modelagem a estimativa da produtividade em tonelada seca, tendo como variável independente o tempo de estocagem (R^2 ajustado igual à 0,74), sendo resultante do efeito significativo do tempo de estocagem e da correlação negativa entre produtividade da escavadeira enleiramento e tempo de estocagem (Tabela 13).

Tabela 13 – Modelagem da produtividade das máquinas do sistema de cavaqueamento de biomassa florestal.

Máquina	Método de cavaqueamento	Equação	Syx	F	R ² _{aj}
Escavadeira enleiramento	Martelos e facas	$\text{Prod (dt.PMH}^{-1}) = 51,3632 - 0,262058 \cdot \text{TPC} + 0,00000307487 \cdot \text{TPC}^3 - 30,0493 \cdot (1/\text{TPC})$	3,38	349,81	0,74
Pá carregadeira	Martelos e facas	$\log(\text{Prod (dt.PMH}^{-1})) = 17,2567 - 0,0668911 \cdot \text{TPC} - 16,3757 \cdot (1/\text{TPC}) + 2,83915 \cdot \sqrt{\text{TPC}} - 7,65423 \cdot \log(\text{TPC})$	1,17	97,69	0,50
Cavaqueador	Martelos	$\text{Prod (gt.PMH}^{-1}) = 73,1667 + 0,306074 \cdot \text{TPC} - 0,00429539 \cdot \text{TPC}^2 + 0,0000168816 \cdot \text{TPC}^3$	9,61	74,29	0,46
	Facas	$\text{Prod (gt.PMH}^{-1}) = 85,6403 - 0,000301427 \cdot \text{TPC}^2$	4,18	237,68	0,65
Escavadeira cavaqueamento	Martelos	$\log(\text{Prod (dt.PMH}^{-1})) = 322,829 - 10,9273 \cdot \text{TPC} + 0,0173883 \cdot \text{TPC}^2 - 0,0000208183 \cdot \text{TPC}^3 - 543,003 \cdot (1/\text{TPC}) + 234,936 \cdot \sqrt{\text{TPC}} - 374,166 \cdot (\log(\text{TPC}))$	1,11	193,96	0,82
	Facas	$\text{Prod (gt.PMH}^{-1}) = -5271,57 + 8076,89 \cdot \text{TU}^3 + 2197,75 \cdot (1/\text{TU})$	4,01	46,13	0,41

Onde: Prod (gt.PMH⁻¹)= produtividade em tonelada verde; Prod (dt.PMH⁻¹)= produtividade em tonelada seca; TPC= tempo de estocagem da biomassa florestal; TU= teor de umidade da biomassa florestal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Para a pá carregadeira, assim como na escavadeira enleiramento, o modelo teve como variável dependente a produtividade em tonelada seca e como variável independente o tempo de estocagem, este apresentou o melhor ajuste para estimativa da produtividade com indicador de R² ajustado de 0,50 (Tabela 13).

A modelagem da produtividade do cavaqueador para ambos os métodos de cavaqueamento, obteve melhor ajuste a estimativa da produtividade em tonelada verde, tendo como variável independente o tempo de estocagem da biomassa, com resultado de R² ajustado igual à 0,46 para martelos e 0,64 para facas (Tabela 13).

A produtividade da escavadeira cavaqueamento, para o método de cavaqueamento de martelos, apresentou como melhor ajuste a equação que estima a produtividade em tonelada seca, desconsiderando a umidade da biomassa, em função da variável tempo de estocagem, com resultados de R² ajustado de 0,82.

Para a estimativa da produtividade da escavadeira cavaqueamento, com método de cavaqueamento de facas, o melhor modelo foi representado pela estimativa da produtividade em tonelada verde, com a variável independente teor de umidade resultando em R^2 ajustado igual à 0,41 (Tabela 13).

O resultado das estimativas geradas através de todas as equações ajustadas, com os dados observados são demonstradas nas representações gráficas para as máquinas: escavadeira enleiramento (APÊNDICE E), pá carregadeira (APÊNDICE F), cavaqueador móvel florestal (APÊNDICE G) e escavadeira cavaqueamento (APÊNDICE H).

As produtividades observadas e estimadas para as equações com melhores ajustes são demonstradas na Figura 8 e demonstram comportamentos distintos entre as produtividades das máquinas do sistema de cavaqueamento ao se aumentar o tempo de estocagem da biomassa.

A escavadeira enleiramento apresenta a sua maior produtividade com 40 dias de estocagem, apresentando a partir deste tempo de estocagem decréscimo nos seus resultados de produtividade (Figura 8a), mesmo comportamento foi observado na pá carregadeira (Figura 8b).

O comportamento da escavadeira cavaqueamento foi diferente nos dois métodos de cavaqueamento, sendo que, no método de cavaqueamento de martelos, houve tendência de queda da produtividade ao se aumentar o tempo de estocagem da biomassa, com a maximização da produtividade aos 40 dias de estocagem (Figura 8e).

Utilizando o método de cavaqueamento de facas, o comportamento da produtividade se mostrou com pouca variabilidade ao passar do tempo de estocagem, com os melhores resultados encontrados nos tempos de estocagem 0 e 150 dias, resultados estes muito próximos (Figura 8f).

Figura 8 – Comportamento das produtividades observadas e estimadas pelo modelo ajustado das máquinas do sistema de cavaqueamento nos diferentes tempos de estocagem.

(continua)

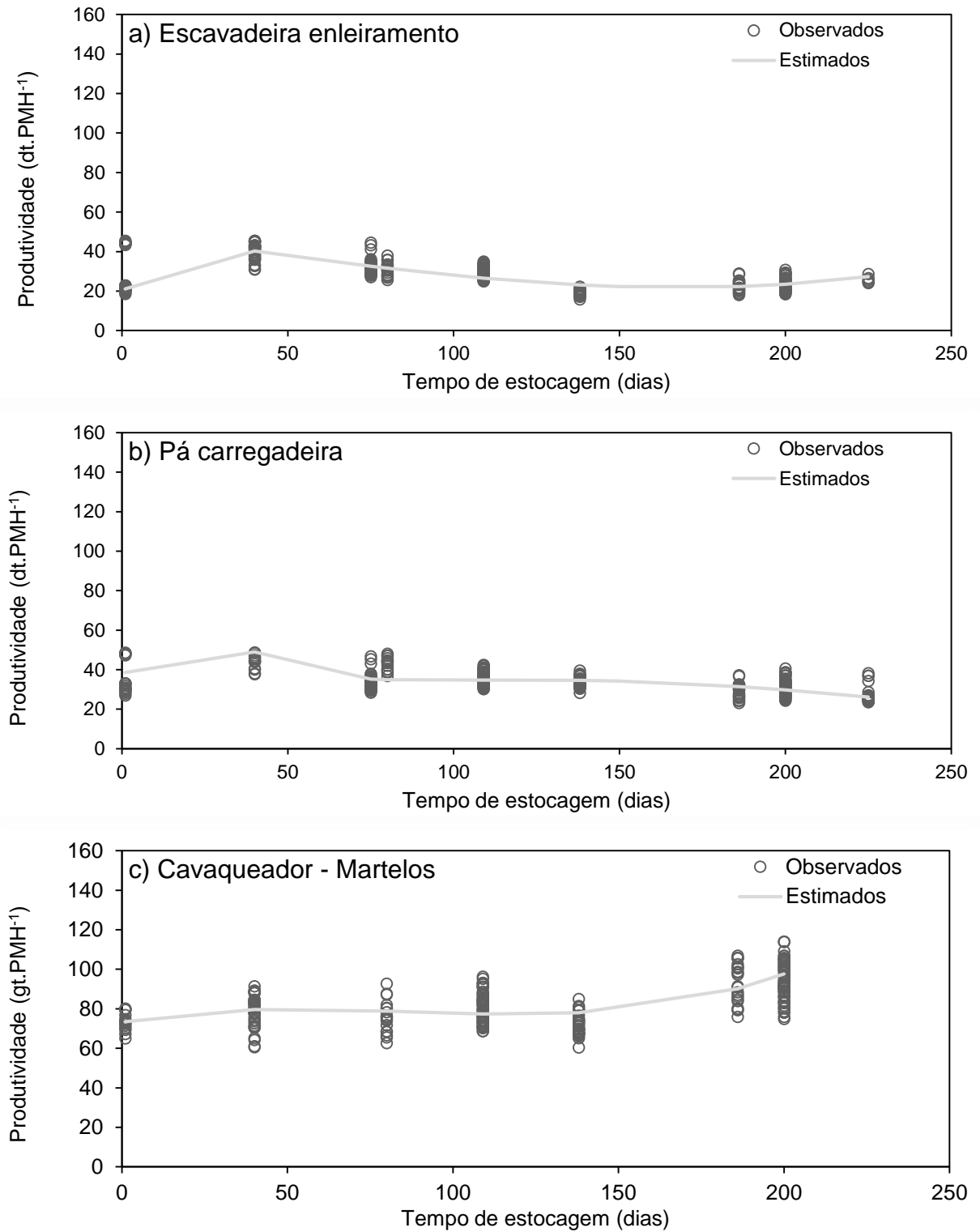
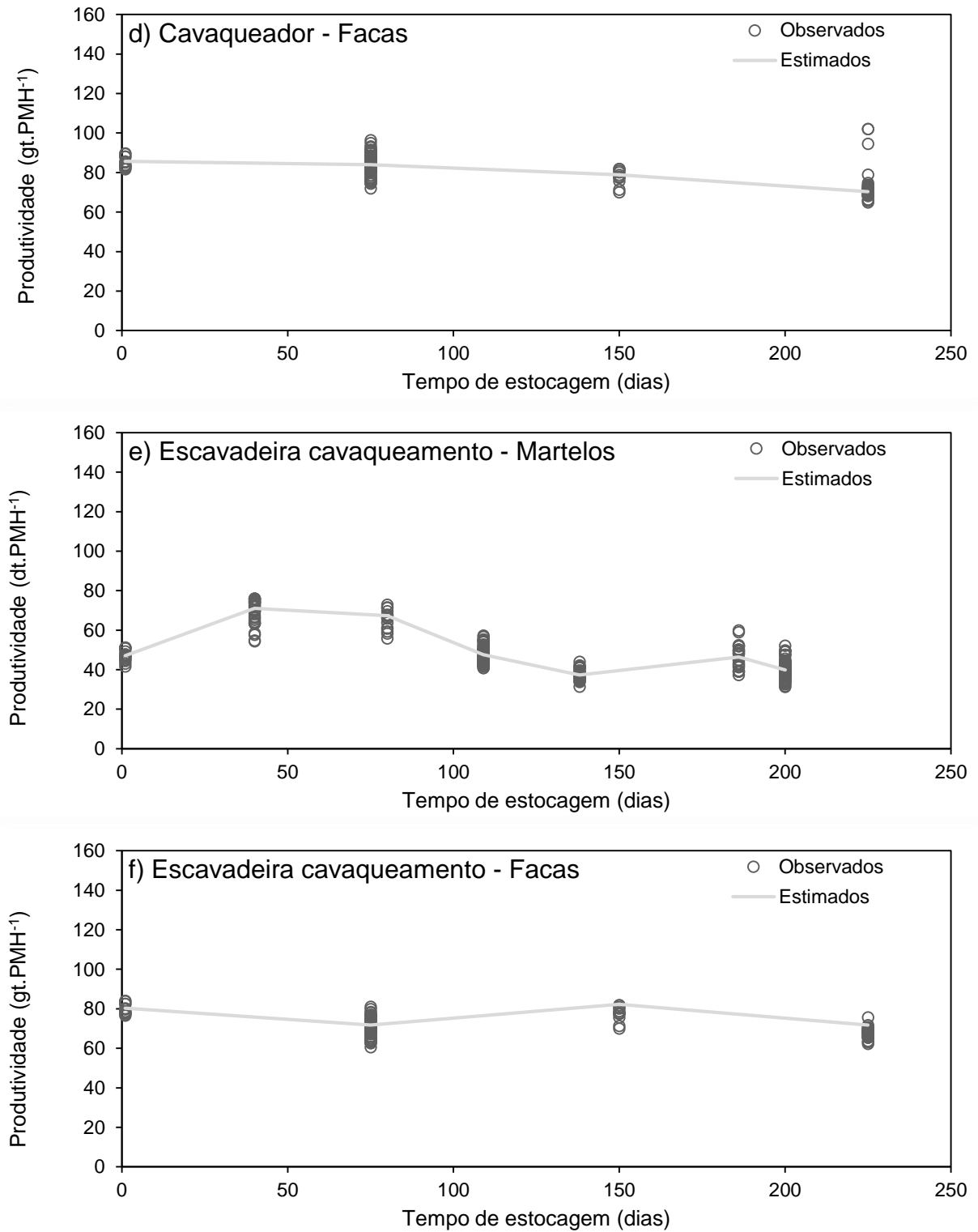


Figura 8 – Comportamento das produtividades observadas e estimadas pelo modelo ajustado das máquinas do sistema de cavaqueamento nos diferentes tempos de estocagem.

(continuação)



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

O cavaqueador móvel, por sua vez, apresentou comportamentos distintos nos diferentes métodos de cavaqueamento. No método de martelos, ao se aumentar o tempo de estocagem, houve incremento na produtividade, com os melhores resultados representados nos 200 dias de estocagem (Figura 8c). Em contrapartida, implementando o método de facas, houve decréscimo na produtividade do cavaqueador ao passar do tempo de estocagem, apresentado o melhor resultado de produtividade aos 0 dias (Figura 8d).

Comportamento à esses resultados foram reportados por Pottie e Guimier (1985) que descrevem que a energia requerida pelos trituradores (martelos) será menor quanto mais seco for o material a ser cavaqueado e que a energia requerida pelos picadores (facas) é maior quanto mais seco for o material a ser cavaqueado.

Estima-se que o consumo de energia de um picador no cavaqueamento de madeira seca é duas vezes maior do que no de madeira verde (HAKKILA, 1989). Além disso, Watson, Sabo e Stokes (1986) explicam que quanto mais secos forem os fustes cavaqueados, maior será a necessidade de trocas de facas do picador. Isso reduz o tempo produtivo e, conseqüentemente, aumenta o custo por hora produtiva e por tonelada de cavacos.

Este mesmo comportamento de produtividade foi encontrado para a escavadeira cavaqueamento, a qual apresentou maiores produtividades no método de cavaqueamento de martelos. Segundo Aman, Baker e Dale Greene (2011) a produtividade entre escavadeira cavaqueamento é diretamente vinculado à produção do cavaqueador porque a escavadeira não pode abastecer o cavaqueador móvel florestal com biomassa, se este não estiver em funcionamento.

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E ENERGÉTICA

4.2.1 TEOR DE UMIDADE

Os valores médios de umidade foram de 47,47% e 52,26% para os métodos de cavaqueamento de martelos e facas, respectivamente, com erros relativos amostrais de 4,20% e 2,59%, ambos dentro do aceitável de 5% (Tabela 14).

Tabela 14 - Estatística descritiva dos resultados de teor de umidade da biomassa florestal.

Método de cavaqueamento	n	Média (%)	Mediana	E (%)	CV (%)	Mín.	Máx.	Curt.	Assim.	p Value
Martelos	70	47,47	47,25	4,20	17,62	24,48	64,12	-0,11	-0,41	0,6946*
Facas	40	54,26	53,84	2,79	8,72	44,00	62,17	-0,27	-0,32	0,7295*

Legenda: n= número de amostras; E (%): erro relativo amostral; CV (%)= coeficiente de variação; Mín= mínimo; Máx= máximo; Curt.= curtose; Assim.= assimetria; p Value= valor do teste de Kolmogorov-Smirnov; *valores significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Os resultados de teor de umidade apresentaram diferença entre os métodos de cavaqueamento de martelos e facas, com resultado de valor de p igual à 0,000, sendo que o método de facas obteve maior teor de umidade médio da biomassa florestal. Os valores de teor de umidade variaram de 24,48% em material produzido com martelos e 40 dias de estocagem até 64,12% em material provindo do método de martelos e 0 dias de estocagem (Tabela 13). Brand (2007), assim como no presente estudo, encontrou os maiores valores de teor de umidade no material recém coletado, com teor de umidade igual à 56%.

Oro (2015) avaliando os resultados de teor de umidade, concluiu que não houve diferença estatística significativa desta característica da biomassa florestal de pinus ao passar do tempo de estocagem, o qual encontrou uma redução nos resultados de teor de umidade entre 30 e 60 dias de estocagem em campo, com resultados de teor de umidade iguais à 50% e 47% respectivamente, sendo que, aos 90 dias o valor encontrado foi de 60%.

Segundo Almeida *et al.* (2010), o material estocado sofreu uma elevada perda de umidade no primeiro mês, de aproximadamente 50% de seu valor, e este se manteve praticamente constante até os três meses de armazenamento. Podendo se concluir que o tempo de estocagem no período de um mês a três meses não influenciou na umidade da madeira.

O teor de umidade foi influenciado significativamente pelo método de cavaqueamento, influência essa demonstrada por meio dos resultados obtidos pela análise de covariância (GLM), a qual demonstrou valor de p igual à 0,0000, efeito este calculado ao nível de 5% de probabilidade. Em contrapartida, o tempo de estocagem

não apresentou efeito significativo sobre o teor de umidade, com resultado de valor de p igual à 0,2068.

Os resultados encontrados por Oro (2015) e Almeida *et al.* (2010), assim como os resultados do presente trabalho, demonstraram perdas de umidade em maiores proporções nos primeiros dias de estocagem, sendo que, ao passar do tempo de estocagem esta perda se estabiliza, resultando na inexistência de efeito significativo do fator tempo de estocagem sobre o teor de umidade da biomassa.

Devido a existência de diferença significativa do teor de umidade para os diferentes métodos de cavaqueamento, a modelagem para esta característica física da biomassa foi realizada separadamente para cada método, apresentando melhor ajuste para o banco de dados da biomassa produzida pelo método de martelos, com R^2 ajustado de 0,44 (Tabela 15).

Tabela 15 – Modelagem do teor de umidade da biomassa florestal energética.

Variável independente	Variável dependente	Método de cavaqueamento	Equação	Syx	f	R^2 aj
Tempo de estocagem (TPC)	Teor de umidade (TU)	Martelos	$TU = 41,5646 + 0,00000123816 \cdot TPC^3 + 16,7966 \cdot (1/TPC)$	6,28	27,67	0,44
Tempo de estocagem (TPC)	Teor de umidade (TU)	Facas	$TU = 53,2989 + 3,73945 \cdot (1/TPC)$	4,50	5,10	0,10

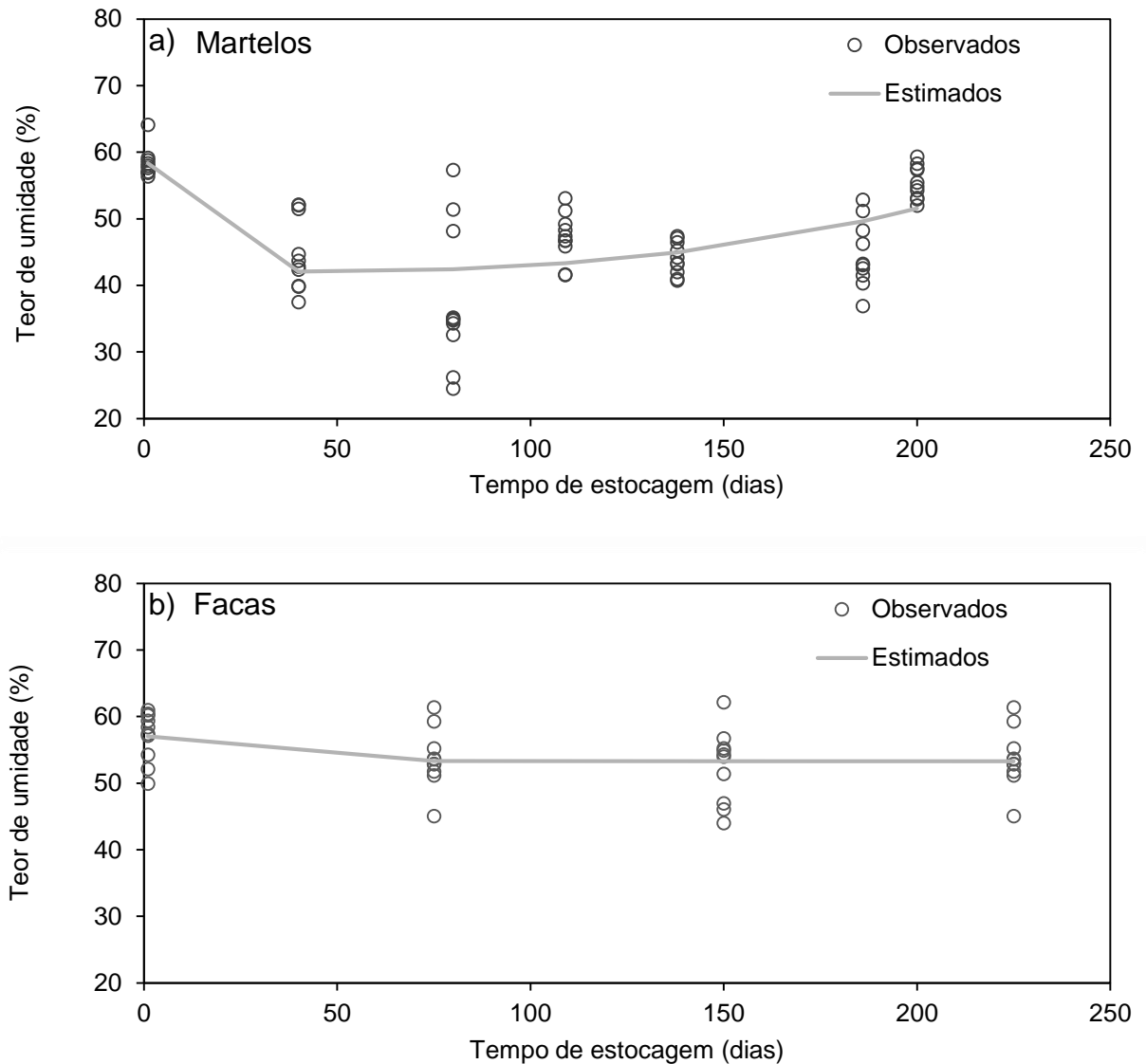
Onde: TU= teor de umidade (%); TPC= tempo de estocagem da biomassa florestal (dias).

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Quando aplicado o método de martelos, a biomassa florestal energética apresentou perda de umidade até os 40 dias, onde foi obtido o mínimo valor de teor de umidade deste material, sendo que, a partir deste ponto há novo incremento de umidade na biomassa (Figura 9a).

Os resultados de teor de umidade do método de cavaqueamento de facas, resultaram em tendência próxima a linearidade, onde se percebeu uma pequena perda de umidade entre 0 e 75 dias. Após os 75 dias de estocagem, não houve tendência de perda ou absorção de umidade nesta (Figura 9b).

Figura 9 – Resultados observados e estimados do teor de umidade da biomassa florestal energética em função da variável tempo de estocagem.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

4.2.2 DENSIDADE APARENTE

A densidade aparente da biomassa energética de *Pinus taeda* L. apresentou resultados médios de 299,40 e 317,83 g.cm⁻³ para os métodos de cavaqueamento de martelos e facas, com medianas iguais à 293,11 e 298,44 g.cm⁻³ (Tabela 16).

Tabela 16 – Estatística descritiva dos resultados de densidade aparente da biomassa florestal.

Método de cavaqueamento	n	Média (g.cm ⁻³)	Mediana	E (%)	CV (%)	Mín.	Máx.	Curt.	Assim.	p Value
Martelos	42	299,40	293,11	5,96	19,13	212,89	429,78	0,45	0,87	0,1696*
Facas	24	317,83	298,44	7,59	17,98	254,67	419,56	-0,73	0,91	0,1144*

Legenda: n= número de amostras; E (%): erro relativo amostral; CV (%)= coeficiente de variação; Mín= mínimo; Máx= máximo; Curt.= curtose; Assim.= assimetria; p Value= valor do teste de Kolmogorov-Smirnov; *valores significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

O mínimo valor de densidade aparente foi resultante da amostra cavaqueada com método de martelos com 109 dias de estocagem, resultado este igual à 220,74 g.cm⁻³. O maior valor obtido para esta característica foi igual à 415,78 g.cm⁻³, cavaqueado pelo método de martelos e 200 dias de estocagem (Tabela 16). Almeida *et al.* (2010) obtiveram resultados semelhantes aos encontrados no presente estudo, tendo como valor médio de densidade aparente 380 g.cm⁻³, obtendo o menor valor na biomassa florestal recém-abatida.

Os resultados de densidade aparente não apresentaram efeito significativo do método de cavaqueamento, resultante da análise de covariância (5% de probabilidade), com resultado de valor de p igual à 0,2240. Com resultado de valor de p igual à 0,0188, o tempo de estocagem apresentou efeito significativo sobre a densidade aparente do material

Devido a não existência de efeito significativo do método de cavaqueamento sobre a densidade aparente, este fator foi modelado considerando banco de dados único, com resultados dos métodos de cavaqueamento de martelos e facas (Tabela 17).

Tabela 17 – Modelagem da densidade aparente da biomassa florestal energética.

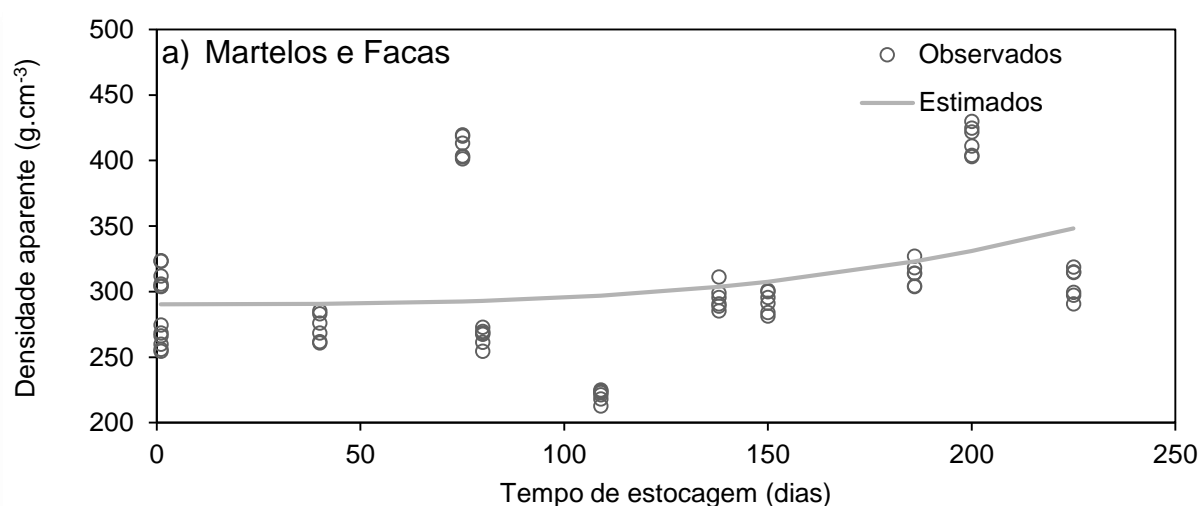
Variável independente	Variável dependente	Método de cavaqueamento	Equação	Syx	f	R ² aj
Tempo de estocagem (TPC)	Densidade aparente (DA)	Martelos e facas	DA= 290,373 + 0,00000507029*TPC ³	54,73	7,71	0,09

Onde: DA= densidade aparente (g.cm⁻³); TPC= tempo de estocagem da biomassa florestal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Através dos dados observados e estimados, plotou-se graficamente a Figura 10, a qual traz o comportamento da densidade aparente nos diferentes tempos de estocagem da biomassa florestal em campo, a qual apresentou tendência de aumento da densidade aparente a partir dos 80 dias de estocagem.

Figura 10 – Resultados observados e estimados da densidade aparente da biomassa florestal energética em função da variável tempo de estocagem.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

4.2.3 DENSIDADE APARENTE (12% UMIDADE)

Os resultados da característica densidade aparente (12% umidade) demonstraram, assim como na densidade aparente, valores médios próximos entre os dois métodos de cavaqueamento, com resultados médios iguais à $180,59 \text{ g.cm}^{-3}$ para martelos e $191,28 \text{ g.cm}^{-3}$ para facas (Tabela 18).

Tabela 18 – Estatística descritiva dos resultados de densidade a granel da biomassa florestal.

Método de cavaqueamento	n	Média (g.cm^{-3})	Mediana	E (%)	CV (%)	Mín.	Máx.	Curt.	Assim.	p Value
Martelos	42	180,59	186,00	5,94	19,06	109,33	234,67	-0,13	-0,69	0,3808*
Facas	18	191,28	194,44	7,68	15,45	138,67	228,89	-1,07	-0,50	0,4505*

Legenda: n= número de amostras; E (%): erro relativo amostral; CV (%)= coeficiente de variação; Mín= mínimo; Máx= máximo; Curt.= curtose; Assim.= assimetria; p Value= valor do teste de Kolmogorov-Smirnov; *valores significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Os valores de densidade aparente com 12% de teor de umidade variaram entre 113,63 e 223,20 g.cm⁻³, ambos via método de cavaqueamento de martelos, com 0 e 200 dias de estocagem, respectivamente (Tabela 18). Pincelli (2011) avaliando a caracterização de biomassa de pinus, obteve resultados de 207,3 g.cm⁻³ para este combustível, resultado este semelhante aos valores encontrados no presente.

Os resultados da análise de covariância ao nível de 5% de probabilidade, demonstraram que a densidade aparente com 12% umidade não apresenta influência significativa do método de cavaqueamento (0,4250), em contrapartida, apresentou influência significativa do tempo de estocagem sobre esta (0,0000).

A modelagem da densidade aparente (12% umidade) demonstrou ajuste com resultado de R² ajustado igual à 0,78, tendo como variável independente o tempo de estocagem (Tabela 19).

Tabela 19 – Modelagem da densidade aparente (12% umidade) da biomassa florestal energética.

Variável independente	Variável dependente	Método de cavaqueamento	Equação	Syx	F	R ² aj
Tempo de estocagem (TPC)	Densidade aparente (12%) (DG)	Martelos e facas	DG= 120,687 + 6,53885*√TPC	15,59	208,80	0,78

Onde: DG= densidade aparente com 12% de umidade(g.cm⁻³); TPC= tempo de estocagem da biomassa florestal.

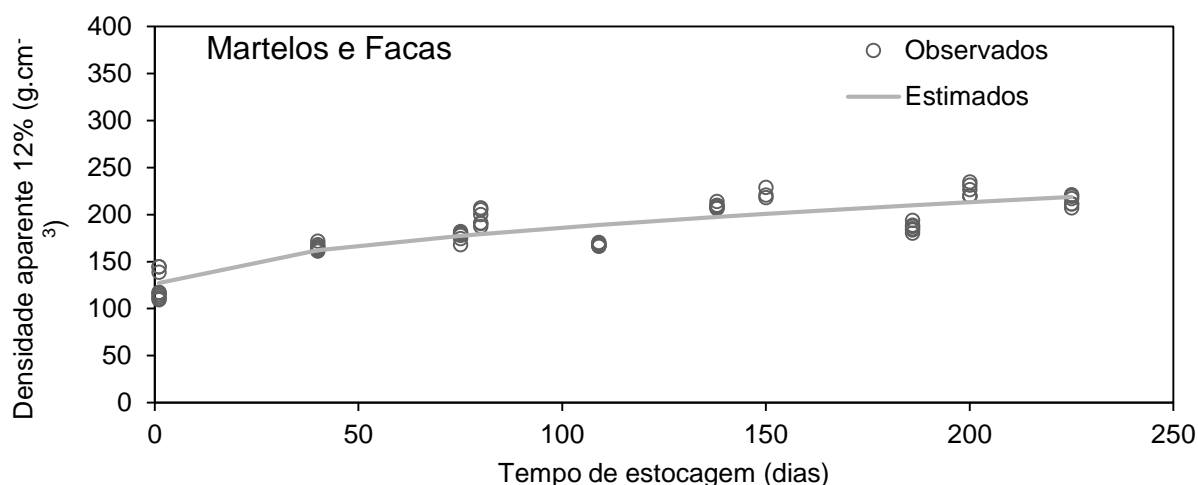
Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A modelagem desta característica resultou em comportamento com acréscimo no resultado de densidade aparente (12% umidade) ao se aumentar o tempo de estocagem da biomassa florestal, sendo este acréscimo em maiores proporções entre 0 e 40 dias de estocagem (Figura 11).

O comportamento da densidade aparente e da densidade aparente com 12% de umidade da biomassa florestal foi resultado da maior a decomposição do material lenhoso, acículas e casca, ao se aumentar o tempo de estocagem, influenciando diretamente na distribuição granulométrica da biomassa, aumentando a proporção de material nas menores classes granulométricas, o que resulta em um melhor arranjo

das partículas, aumentando a quantidade de biomassa florestal em um determinado volume.

Figura 11 – Resultados observados e estimados da densidade aparente (12% umidade) da biomassa florestal energética em função da variável tempo de estocagem.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

4.2.4 TEOR DE CINZAS

Os resultados apresentaram proporções de cinzas consideradas altas para combustíveis oriundos de recursos madeireiros, tendo como resultados médios 15,03% para o método de cavaqueamento de martelos e 9,66% para o de facas (Tabela 20).

Tabela 20 – Estatística descritiva dos resultados de teor de cinzas da biomassa florestal.

Método de cavaqueamento	n	Média (%)	Mediana	E (%)	CV (%)	Mín.	Máx.	Curt.	Assim.	p Value
Martelos	21	15,03	10,57	29,69	65,22	2,60	30,74	-1,08	0,67	0,0909*
Facas	12	9,66	9,59	41,48	65,28	2,64	16,86	-2,32	-0,01	0,2776*

Legenda: n= número de amostras; E (%): erro relativo amostral; CV (%)= coeficiente de variação; Mín= mínimo; Máx= máximo; Curt.= curtose; Assim.= assimetria; p Value= valor do teste de Kolmogorov-Smirnov; *valores significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Os resultados de teor de cinzas variaram entre 2,60% (método de cavaqueamento de martelos com 40 dias de estocagem) e 30,74% (método de cavaqueamento de martelos com 138 dias de estocagem), apresentando valores médios 15,63% e 9,66% para os métodos de martelos e facas (Tabela 20).

Resultados estes semelhantes aos encontrados por Mbanze *et al.* (2018), os quais obtiveram resultados médios de teor de cinzas entre 3,92% e 22,15%. Os resultados encontrados na presente pesquisa e por Mbanze *et al.* (2018) demonstram que os teores de cinzas resultantes da biomassa florestal de pinus apresentaram valores maiores que valores normalmente encontrados para outros materiais combustíveis de origem florestal, Gorte (2019) obteve resultados entre 0,35% e 0,94% avaliando biomassa energética e diferentes coprodutos de *Eucalyptus urograndis* e *Eucalyptus saligna*.

Conforme descrito por Baker, Dale Greene e Wilson (2012) os maiores teores de cinzas encontrados na biomassa energética são motivados pelo fato de o topo da árvore ser a parte com maior probabilidade de acumular sujeira durante a extração baseada em *skidders*, então quando uma parte do topo da árvore está incluída no material de cavaqueamento, menores volumes irão conter alto conteúdo de cinzas.

De maneira geral, mesmo os altos níveis demonstrados de teor de cinzas da madeira, este não é um complicador para o uso desta para a geração de energia, devido inclusive ao seu baixo teor de enxofre (BRAND *et al.*, 2005).

O método de cavaqueamento não apresentou efeito significativo sobre o teor de cinzas, com resultado de valor de p de 0,0518 na análise de covariância, porém, o efeito tempo de estocagem apresentou este efeito significativo com valor de p igual à 0,0019, o qual resultou em uma correlação positiva, onde ao se aumentar este tempo de estocagem do material em campo, há o aumento dos resultados de teor de cinzas da biomassa.

Garstang *et al.* (2002, *apud* Brand, 2007, p. 38) menciona a tendência linear de aumento do teor de cinzas ao longo do tempo de estocagem, com 27 a 45% das variações explicadas pelo tempo de estocagem.

Quando analisados os resultados de teor de cinzas da biomassa nos tempos de estocagem, este apresentou comportamento semelhante ao encontrado por Oro (2015), o qual obteve resultados de 2,1%, 4,8%, 6,4%, 10,6% e 12,1%, para os tempos de estocagem à campo de 7, 60, 120, 150 e 180 dias.

O modelo gerado para a estimativa do teor de cinzas foi ajustado para ambos os métodos de cavaqueamento, visto que o método de cavaqueamento não apresentou efeito significativo sobre esta característica da biomassa (Tabela 21).

Tabela 21 – Modelagem do teor de cinzas da biomassa florestal energética.

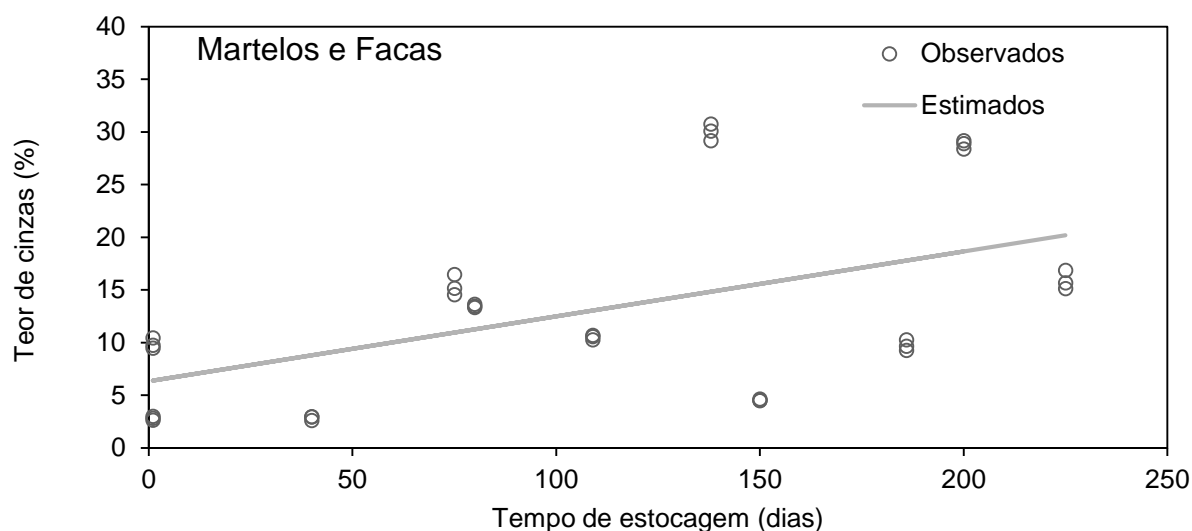
Variável independente	Variável dependente	Método de cavaqueamento	Equação	Syx	f	R ² aj
Tempo de estocagem (TPC)	Teor de cinzas (TC)	Martelos e facas	$TC = 6,33732 + 0,0615412 * TPC$	7,82	11,20	0,24

Onde: TC= teor de cinzas (%); TPC= tempo de estocagem da biomassa florestal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

O gráfico gerado pelos dados observados e estimados do teor de cinzas da biomassa demonstrou comportamento de acréscimo linear do teor de cinzas ao se aumentar o tempo de estocagem deste material em campo (Figura 12).

Figura 12 – Resultados observados e estimados do teor de cinzas da biomassa florestal energética em função da variável tempo de estocagem.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Este aumento de proporção foi explicado pela composição física da proporção de acículas do pinus, que após certo tempo de estocagem se assemelha em grande parte com os sedimentos de solo que está em contato com a biomassa florestal (pré-

cavaqueamento), fazendo com que a contaminação da biomassa por material contaminante seja maior, resultando em resultados maiores de teor de cinzas.

4.2.5 PODER CALORÍFICO

O comportamento médio dos poderes caloríficos superior e líquido apresentaram pequena diferença entre os métodos de martelos e facas, apresentando o método de cavaqueamento de facas melhores resultados médios para poder calorífico superior, 4.380,67 kcal.kg⁻¹. Para poder calorífico líquido o método de cavaqueamento de martelos apresentou os melhores resultados para poder calorífico líquido, com média igual à 1.532,69 kcal.kg⁻¹ (Tabela 22).

Tabela 22 – Estatística descritiva dos resultados de poder calorífico superior, inferior e líquido da biomassa florestal.

Variável	Método de cavaq.	n	Média kcal.kg ⁻¹	Mediana	E (%)	CV (%)	Mín.	Máx.	Curt.	Assim.	p Value
Poder calorífico superior	Martelos	21	4.170,71	4.401,00	5,86	12,88	3.292,00	4.804,00	-1,11	-0,73	0,1562*
	Facas	12	4.380,67	4.385,00	5,04	7,94	3.988,00	4.775,00	-2,28	-0,01	0,5195*
Poder calorífico líquido	Martelos	21	1.532,69	1.721,19	16,46	36,16	636,54	2.211,67	-1,30	-0,45	0,4414*
	Facas	12	1.393,00	1.361,85	12,80	20,14	1.104,67	1.781,60	-2,00	0,21	0,3402*

Legenda: n= número de amostras; E (%): erro relativo amostral; CV (%)= coeficiente de variação; Mín= mínimo; Máx= máximo; Curt.= curtose; Assim.= assimetria; p Value= valor do teste de Kolmogorov-Smirnov; *valores significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A pequena diferença nos resultados de poder calorífico superior e líquido entre os métodos de cavaqueamento resultaram na inexistência de efeito entre método de cavaqueamento e poder calorífico superior e líquido.

O tempo de estocagem da biomassa florestal em campo apresentou efeito significativo sobre o poder calorífico superior deste combustível visto que, ao se aumentar o tempo de estocagem, há a decomposição da proporção de galhos e acículas que compõem a biomassa florestal, sendo esta proporção de galho e acículas um combustível com menor teor de umidade que reflete em maiores resultados de poder calorífico (Tabela 23).

Tabela 23 – Análise de covariância (GLM) relativo ao efeito dos fatores método de cavaqueamento e tempo de estocagem sobre o poder calorífico superior e líquido.

Variável	Método de cavaqueamento	Tempo de estocagem
Poder calorífico superior	0,1460	0,0027*
Poder calorífico líquido	0,4393	0,0717

*valores significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A modelagem do poder calorífico superior apresentou melhor ajuste quando comparado à modelagem do poder calorífico líquido (Tabela 24).

Tabela 24 – Modelagem do poder calorífico superior e líquido da biomassa florestal energética.

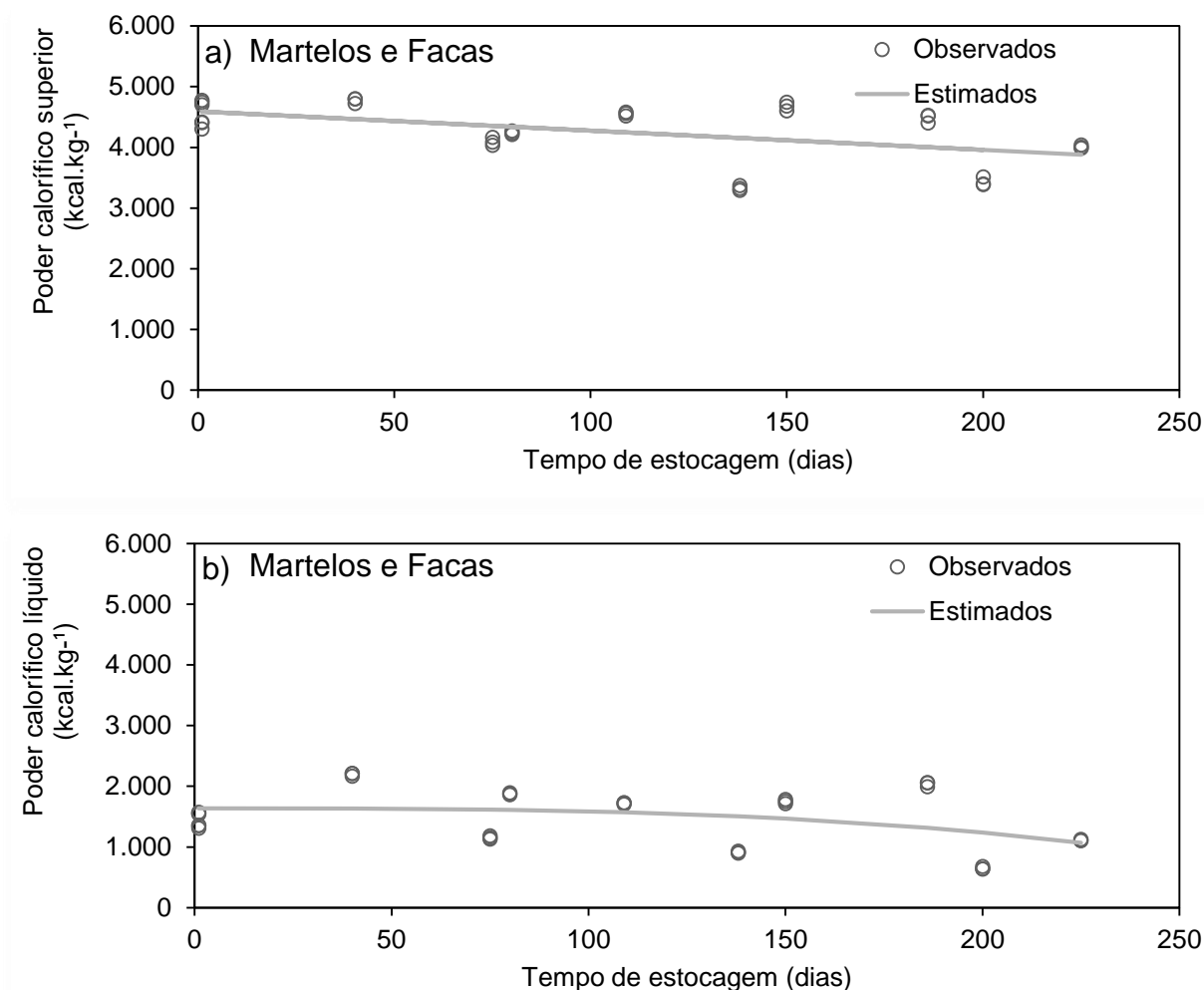
Variável independente	Variável dependente	Método de cavaqueamento	Equação	Syx	f	R ² aj
Tempo de estocagem (TPC)	Poder calorífico superior (PCS)	Martelos e facas	$PCS = 4593,82 - 3,16541 \cdot TPC$	425,89	9,99	0,22
Tempo de estocagem (TPC)	Poder calorífico líquido (PCL)	Martelos e facas	$PCL = 1636,36 - 0,0000497945 \cdot TPC^3$	441,53	5,71	0,13

Onde: PCS= poder calorífico superior (kcal.kg⁻¹); PCI= poder calorífico inferior (kcal.kg⁻¹); PCL= poder calorífico líquido (kcal.kg⁻¹); TPC= tempo de estocagem da biomassa florestal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

O comportamento de ambos os poderes caloríficos (superior e líquido) apresentaram tendência de queda ao aumentar o tempo de estocagem da biomassa. Para o poder calorífico superior, esta queda foi linear, com os maiores resultados de poder calorífico nos menores tempos de estocagem (Figura 13a). O poder calorífico líquido apresentou linearidade dos resultados até os 100 dias de estocagem, sendo que, após os 100 dias houve decréscimo deste (Figura 13b).

Figura 13 – Resultados observados e estimados de poder calorífico superior (a) e líquido (b) da biomassa florestal energética em função da variável tempo de estocagem.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Os resultados apresentados por Oro (2015), assim como no presente estudo, também, demonstraram tendência de redução da produção energética ao se aumentar o tempo de estocagem, sendo os tratamentos com 30 e 180 dias de estocagem o melhor e o pior tratamento respectivamente, dentre todos os analisados, com resultados de poder calorífico superior iguais à 4.792 kcal.kg⁻¹ e 4.130 kcal.kg⁻¹.

Ao serem comparados os valores de poder calorífico superior encontrados na presente pesquisa, observou-se que esses são similares aos resultados de outras pesquisas com biomassa de Pinus (PINCELLI, 2011; FERREIRA *et al*, 2016; MBANZE *et al*, 2018).

Almeida *et al.* (2010) considerando o poder calorífico superior da biomassa de *Pinus patula* obtiveram o valor médio de $4.615 \text{ kcal.kg}^{-1}$ valores estes próximos aos encontrados por Gorte (2019) analisando a caracterização energética de coprodutos de espécies do gênero *Eucalyptus*, com resultados de 4.430 a $4.588 \text{ kcal.kg}^{-1}$ para o *E. urograndis* e 4.462 a $4.651 \text{ kcal.kg}^{-1}$ para o *E. saligna*. Os resultados citados demonstram que os fatores teor de umidade e teor de cinzas apresentaram maior influência sobre o poder calorífico do que diferentes espécies florestais.

Para a análise de poder calorífico líquido, o mínimo valor encontrado foi igual à 636 kcal.kg^{-1} (Tabela 22), resultante do método de cavaqueamento de martelos com 200 dias de estocagem, resultado este influenciado diretamente pelos altos teores de umidade e de cinzas desta amostra, e máximo igual à $2.212 \text{ kcal.kg}^{-1}$ na amostra cavaqueada pelo método de cavaqueamento de martelos com 40 dias (Tabela 22).

Brand (2014) descreve que o poder calorífico líquido está estreitamente relacionado ao teor de umidade, e quanto maior o teor de umidade, menor o poder calorífico. Assim, os galhos que apresentaram menor teor de umidade tiveram os mais altos valores de poder calorífico líquido, constituindo-se no melhor material para a geração de energia.

Brand (2014) neste mesmo estudo, obteve resultados semelhantes ao da presente pesquisa, tendo resultados de poder calorífico superior entre 4.820 e $5.258 \text{ kcal.kg}^{-1}$ e poder calorífico líquido entre 1.300 e $2.100 \text{ kcal.kg}^{-1}$, com maiores valores nas maiores idades (24 e 16 anos) e no componente galho.

4.2.6 GRANULOMETRIA

A distribuição da biomassa em diferentes classes granulométricas obteve as maiores proporções na classe de 31,4 a 16 mm com resultados médios de 29,25% e 29,20% para os métodos de cavaqueamento de martelos e facas.

As menores proporções em ambos os métodos de cavaqueamento foram resultantes da classe $\geq 31,5$, com resultados de 10,27% para martelos e 10,30% para facas, demonstrando a proximidade entre os resultados dos diferentes métodos de cavaqueamento entre estas classes granulométricas. As maiores diferenças entre os métodos de cavaqueamento nas classes granulométricas de 15,9 a 8 mm e 7,9 a 3,35 mm (Tabela 25).

Tabela 25 – Estatística descritiva das classes granulométricas de biomassa florestal.

Método de cavaq.	Classe	n	Média (%)	Mediana	E (%)	CV (%)	Mín.	Máx.	Curt.	Assim.	p Value
Martelos	≥31,5 mm	21	10,27	10,72	22,74	49,96	2,89	19,58	-0,63	0,32	0,8254*
	31,4 - 16 mm	21	29,25	31,03	11,05	24,27	17,83	45,69	-0,13	0,31	0,9100*
	15,9 - 8 mm	21	22,79	23,39	7,65	16,81	12,26	28,39	1,49	-0,84	0,8514*
	7,9 - 3,35 mm	21	16,78	16,21	7,79	17,11	12,87	22,48	-0,54	0,58	0,8769*
	<3,35 mm	21	20,91	18,32	19,65	43,18	8,92	38,53	-0,54	0,64	0,7040*
Facas	≥31,5 mm	12	10,30	9,68	19,12	30,09	5,19	15,48	-0,59	0,24	0,9950*
	31,4 - 16mm	12	29,20	29,34	5,88	9,26	22,22	33,26	3,92	-1,46	0,6929*
	15,9 - 8 mm	12	26,36	24,86	11,05	17,40	18,77	36,21	0,83	0,61	0,6647*
	7,9 - 3,35 mm	12	14,78	15,07	8,19	12,88	12,38	17,40	-1,74	0,02	0,8324*
	<3,35mm	12	19,35	18,02	13,29	20,92	13,13	25,50	-1,13	0,34	0,7595*

Legenda: n= número de amostras; E (%): erro relativo amostral; CV (%)= coeficiente de variação; Mín= mínimo; Máx= máximo; Curt.= curtose; Assim.= assimetria; p Value= valor do teste de Kolmogorov-Smirnov; *valores significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Conforme demonstrado na Tabela 26, o método de cavaqueamento apresentou efeito significativo nas classes granulométricas de 15,9 a 8 mm e 7,9 a 3,35 mm. O fator tempo de estocagem obteve efeito significativo sobre a menor classe granulométrica (<3,35 mm), sendo esta considerada como finos.

Rackl e Günthner (2016) afirmam que quando as características da biomassa apresentam maior quantidade de finos, poderão proporcionar o travamento da rosca alimentadora e atrito na alimentação do reator da caldeira.

Tabela 26 – Análise de covariância (GLM) relativo ao efeito dos fatores método de cavaqueamento e tempo de estocagem sobre a granulometria.

Granulometria	Método de cavaqueamento	Tempo de estocagem
≥31,5 mm	0,9567	0,2903
31,4 - 16mm	0,9756	0,1014
15,9 - 8 mm	0,0194*	0,1989
7,9 - 3,35 mm	0,0428*	0,9648
<3,35mm	0,4771	0,0073*

*valores significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A baixa influência do efeito tempo de estocagem sobre as proporções de biomassa nas diferentes classes granulométricas, fez com que somente equações que estimam as proporções das classes de 15,9 a 8 mm e 7,9 a 3,35 mm para método de facas e <3,35 mm para martelos e facas fossem ajustadas (Tabela 27).

Tabela 27 – Modelagem das classes granulométricas de biomassa florestal energética.

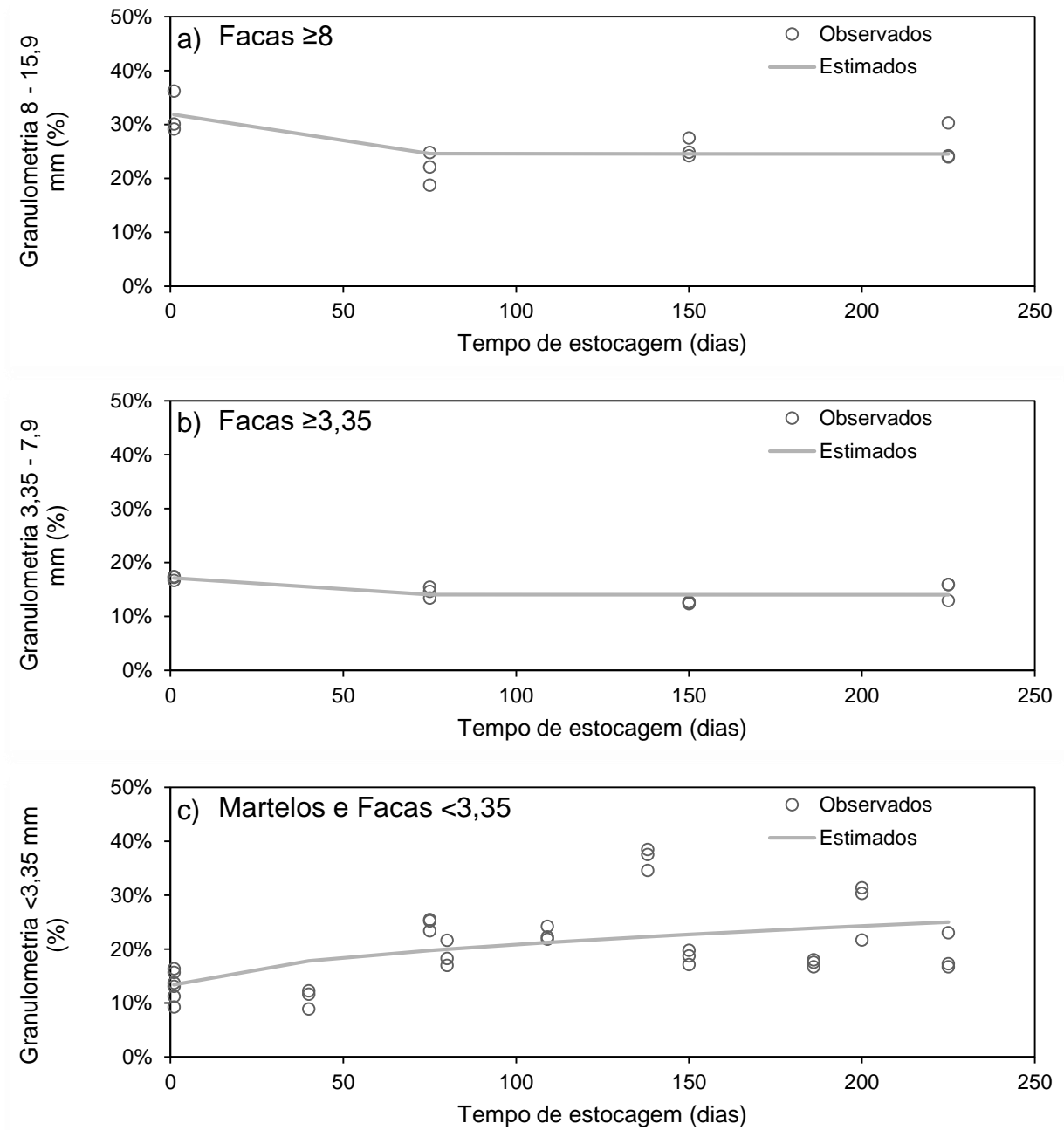
Variável independente	Variável dependente	Método de cavaqueamento	Equação	Syx	F	R ² aj
Tempo de estocagem	Granulometria ≥31,5 mm	Martelos e Facas	-	-	-	-
Tempo de estocagem	Granulometria 31,4 mm - 16 mm	Martelos e Facas	-	-	-	-
Tempo de estocagem	Granulometria 15,9 mm - 8 mm	Martelos	-	-	-	-
Tempo de estocagem	Granulometria 15,9 mm - 8 mm	Facas	$\geq 8 = 24,4846 + 7,33541 \cdot (1/TPC)$	3,35	10,61	0,47
Tempo de estocagem	Granulometria 7,9 mm - 3,35 mm	Martelos	-	-	-	-
Tempo de estocagem	Granulometria 7,9 mm - 3,35 mm	Facas	$\geq 3,35 = 13,9826 + 3,13207 \cdot (1/TPC)$	1,35	11,93	0,50
Tempo de estocagem	Granulometria <3,35 mm	Martelos e Facas	$< 3,35 = 12,5559 + 0,83056 \cdot \sqrt{TPC}$	15,65	199,41	0,77

Onde: ≥ 8 = classe granulométrica de 15,9 a 8 mm (%); $\geq 3,35$ = classe granulométrica de 7,9 a 3,35 mm <3,35 = classe granulométrica menor de 3,35 mm (%); TPC = tempo de estocagem da biomassa florestal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Observa-se na modelagem da granulometria a existência de tendência de queda na proporção das classes de 15,9 a 8 mm e 7,9 a 3,35 mm, utilizando método de facas, ao se aumentar o tempo de estocagem, queda em maiores proporções entre 0 e 75 dias de estocagem. Comportamento contrário é observado na classe <3,35 mm, com métodos de cavaqueamento de martelos e facas, onde o qual apresenta aumento da proporção ao se aumentar o tempo de estocagem do material em campo (Figura 14).

Figura 14 – Resultados observados e estimados das classes diamétricas de 15,9 a 8 mm (a), 7,9 a 3,35 mm (b) e <3,35 mm (c) em função da variável tempo de estocagem.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Spinelli *et al.* (2013) avaliando sistemas de picadores de disco e tambor, concluiu que picadores de disco produziram cavacos de tamanho significativamente mais aceitável (entre 8 e 16 mm) e significativamente menos cavacos pequenos (entre 8 e 3 mm) e finos (<3 mm), quando comparado ao picador de tambor.

4.2.7 COMPOSIÇÃO FÍSICA

Os resultados de estatística descritiva da distribuição dos materiais: material lenhoso, acículas, casca e material contaminante, que compõem a biomassa florestal são demonstrados na Tabela 28 para martelos e na Tabela 29 para facas.

Tabela 28 – Estatística descritiva da composição física das classes granulométricas de biomassa florestal produzida com método de cavaqueamento de martelos.

Classe granulométrica	Material	n	Média (%)	Mediana	E (%)	CV (%)	Mín.	Máx.	Curt.	Assim.
≥31,5 mm	Material lenhoso	21	99,01	99,57	1,58	5,07	96,65	100,00	-0,68	-0,83
≥31,5 mm	Acículas	21	0,54	0,02	66,67	146,47	0,00	2,73	1,51	1,47
≥31,5 mm	Casca	21	0,45	0,18	54,01	118,65	0,00	1,80	0,58	1,18
≥31,5 mm	Material contaminante	21	-	-	-	-	-	-	-	-
31,4 - 16mm	Material lenhoso	21	96,97	98,48	1,41	3,10	90,05	99,83	-0,30	-0,90
31,4 - 16mm	Acículas	21	0,94	0,09	65,75	144,45	0,00	3,70	-0,09	1,24
31,4 - 16mm	Casca	21	1,85	0,81	46,55	102,27	0,12	6,79	0,69	1,18
31,4 - 16mm	Material contaminante	21	0,23	0,00	156,31	343,40	0,00	3,49	14,78	3,78
15,9 - 8 mm	Material lenhoso	21	87,35	88,27	2,99	6,58	77,71	96,34	-1,13	-0,29
15,9 - 8 mm	Acículas	21	2,28	0,55	54,23	119,13	0,00	9,24	0,20	1,00
15,9 - 8 mm	Casca	21	8,48	7,29	22,29	48,96	2,92	16,23	-1,12	0,36
15,9 - 8 mm	Material contaminante	21	1,89	1,50	50,56	111,08	0,00	6,09	-0,62	0,84
7,9 - 3,35 mm	Material lenhoso	21	66,28	66,22	5,48	12,04	50,34	79,82	-0,44	-0,37
7,9 - 3,35 mm	Acículas	21	6,30	3,98	46,49	102,14	0,32	25,41	2,50	1,49
7,9 - 3,35 mm	Casca	21	19,36	19,43	10,56	23,20	9,83	26,41	-0,14	-0,62
7,9 - 3,35 mm	Material contaminante	21	8,05	4,01	50,62	111,20	0,00	25,63	-0,49	1,02
<3,35mm	Material lenhoso	21	-	-	-	-	-	-	-	-
<3,35mm	Acículas	21	82,75	86,76	8,66	19,01	53,56	100,00	-0,73	-0,74
<3,35mm	Casca	21	-	-	-	-	-	-	-	-
<3,35mm	Material contaminante	21	17,25	13,24	41,51	91,20	0,00	46,44	-0,73	0,74

Legenda: n= número de amostras; E (%): erro relativo amostral; CV (%)= coeficiente de variação; Mín= mínimo; Máx= máximo; Curt.= curtose; Assim.= assimetria.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Tabela 29 – Estatística descritiva da composição física das classes granulométricas de biomassa florestal produzida com método de cavaqueamento de facas.

Classe granulométrica	Material	n	Média (%)	Mediana	E (%)	CV (%)	Mín.	Máx.	Curt.	Assim.
≥31,5 mm	Material lenhoso	12	97,84	98,93	1,73	2,72	91,80	99,97	0,90	-1,30
≥31,5 mm	Acículas	12	1,25	0,44	92,03	144,84	0,00	6,05	4,07	1,93
≥31,5 mm	Casca	12	0,90	0,51	74,20	116,78	0,00	3,26	0,71	1,22
≥31,5 mm	Material contaminante	12	0,01	0,00	220,10	346,41	0,00	0,13	12,00	3,46
31,4 - 16mm	Material lenhoso	12	96,04	97,81	2,20	3,46	87,93	99,06	1,97	-1,41
31,4 - 16mm	Acículas	12	1,02	0,40	93,03	146,41	0,00	4,98	4,24	2,04
31,4 - 16mm	Casca	12	2,69	1,91	46,52	73,22	0,87	7,08	0,89	1,33
31,4 - 16mm	Material contaminante	12	0,25	0,00	220,10	346,41	0,00	3,01	12,00	3,46
15,9 - 8 mm	Material lenhoso	12	88,14	89,85	4,51	7,10	76,49	95,71	0,28	-1,12
15,9 - 8 mm	Acículas	12	2,56	0,48	99,30	156,29	0,08	10,48	0,20	1,42
15,9 - 8 mm	Casca	12	9,08	9,57	19,75	31,08	4,13	14,03	-0,09	0,07
15,9 - 8 mm	Material contaminante	12	0,22	0,00	200,83	316,08	0,00	2,43	11,74	3,41
7,9 - 3,35 mm	Material lenhoso	12	65,99	66,53	5,19	8,17	52,89	72,93	2,40	-1,13
7,9 - 3,35 mm	Acículas	12	8,35	3,72	77,53	122,03	0,48	28,84	0,05	1,32
7,9 - 3,35 mm	Casca	12	23,63	24,87	15,18	23,90	13,20	31,19	-0,45	-0,68
7,9 - 3,35 mm	Material contaminante	12	2,02	0,76	92,73	145,94	0,00	8,71	1,16	1,53
<3,35mm	Material lenhoso	12	-	-	-	-	-	-	-	-
<3,35mm	Acículas	12	90,09	92,99	6,80	10,70	75,85	100,00	-1,89	-0,30
<3,35mm	Casca	12	-	-	-	-	-	-	-	-
<3,35mm	Material contaminante	12	9,91	7,01	61,79	97,26	0,00	24,15	-1,89	0,30

Legenda: n= número de amostras; E (%): erro relativo amostral; CV (%)= coeficiente de variação; Mín= mínimo; Máx= máximo; Curt.= curtose; Assim.= assimetria.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Os resultados de composição física nas diferentes classes granulométricas demonstraram que quanto menor a classe granulométrica, menor proporção de material lenhoso e maiores as proporções de acículas, casca e material lenhoso.

Os maiores valores médios encontrados para cada classe foram: para material lenhoso na classe ≥31,5 mm, acículas na classe <3,35 mm, casca na classe 7,9 a

3,35 mm e material contaminante na classe <3,35 mm, comportamento este esperado, visto que, as partículas de acículas, casca e material contaminante apresentaram menores tamanhos, assim, se enquadrando nas menores classes granulométricas. Gorte (2019) também verificou que, relação inversa entre o material lenhoso e materiais inorgânicos na composição de coprodutos de eucalipto.

Posterior à estatística descritiva, a análise de covariância realizada demonstrou os efeitos significativos das variáveis método de cavaqueamento e tempo de estocagem sobre a composição física da biomassa, dentro das classes granulométricas. Destaca-se nesta análise, a classe granulométrica $\geq 31,5$ mm, onde houve efeito significativo tanto do método de cavaqueamento, quanto do tempo de estocagem sobre os resultados de material lenhoso, acículas e casca (Tabela 30).

Tabela 30 – Análise de covariância (GLM) relativo ao efeito dos fatores do método de cavaqueamento e tempo de estocagem sobre a composição física.

Granulometria	Composição física	Método de cavaqueamento	Tempo de estocagem
$\geq 31,5$ mm	Material lenhoso	0,0052*	0,0000*
	Acículas	0,0285*	0,0000*
	Casca	0,0142*	0,0000*
	Material contaminante	0,1908	0,6172
31,4 - 16 mm	Material lenhoso	0,2449	0,0001*
	Acículas	0,7409	0,0001*
	Casca	0,0838	0,0000*
	Material contaminante	0,9968	0,1119
15,9 - 8 mm	Material lenhoso	0,7314	0,0000*
	Acículas	0,5564	0,0000*
	Casca	0,3637	0,0000*
	Material contaminante	0,0037*	0,0026*
7,9 - 3,35 mm	Material lenhoso	0,9026	0,6853
	Acículas	0,1866	0,0000*
	Casca	0,0251*	0,3111
	Material contaminante	0,0046*	0,0001*
<3,35 mm	Material lenhoso	-	-
	Acículas	0,0952	0,0065*
	Casca	-	-
	Material contaminante	0,0952	0,0065*

*valores significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A modelagem da composição física da biomassa foi realizada através do ajuste de equações para cada material em cada classe granulométrica. Para os materiais da composição física que apresentaram efeito significativo para a variável método de cavaqueamento, ajustaram-se dois modelos, um para o método de martelos e um para o método de facas.

Em materiais que não houve efeito significativo do método de cavaqueamento, ajustou-se somente um modelo para ambos os métodos de cavaqueamento. Os ajustes foram realizados com foco em estimar a porção de material lenhoso, acículas, casca e material contaminante dentro das classes granulométricas $\geq 31,5$ mm (Tabela 31), 31,4 a 16 mm (Tabela 32), 15,9 a 8 mm (Tabela 33), 7,9 a 3,35 mm (Tabela 34) e $< 3,35$ mm (Tabela 35).

Tabela 31 – Modelagem da composição física da classe granulométrica de $\geq 31,5$ mm de biomassa florestal energética.

Granulometria	Variável dependente	Método de cavaqueamento	Equação	Syx	F	R ² aj
$\geq 31,5$ mm	Material lenhoso	Martelos	$ML = 97,6333 + 0,0127739 \cdot TPC$	0,73	29,47	0,59
		Facas	$ML = 93,8185 + 0,435489 \cdot \sqrt{TPC}$	1,23	41,39	0,79
	Acículas	Martelos	$AC = 1,08229 - 0,0000333178 \cdot TPC^2$	0,63	12,52	0,37
		Facas	$AC = 3,78671 - 0,688192 \cdot \log(TPC)$	0,97	28,19	0,71
	Casca	Martelos	$CS = 1,36197 - 0,0965038 \cdot \sqrt{TPC}$	0,33	31,91	0,61
		Facas	$CS = 2,3223 - 0,15385 \cdot \sqrt{TPC}$	0,66	17,90	0,61
	Material contaminante	-	-	-	-	-

Onde: ML= material lenhoso (%); AC= acículas (%); CS= casca (%); MC= material contaminante (%); TPC= tempo de estocagem da biomassa florestal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Tabela 32 – Modelagem da composição física da classe granulométrica de 31,4 a 16 mm de biomassa florestal energética.

Granulometria	Variável dependente	Método de cavaqueamento	Equação	Syx	F	R ² aj
31,4 - 16mm	Material lenhoso	Martelos e Facas	$ML = 93,8365 + 0,0255455 \cdot TPC$	2,48	19,13	0,36
	Acículas	Martelos e Facas	$AC = 2,24928 - 0,011694 \cdot TPC$	1,09	20,94	0,38
	Casca	Martelos e Facas	$CS = 4,01485 - 0,0169653 \cdot TPC$	1,48	23,82	0,42
	Material contaminante	-	-	-	-	-

Onde: ML= material lenhoso (%); AC= acículas (%); CS= casca (%); MC= material contaminante (%); TPC= tempo de estocagem da biomassa florestal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Tabela 33 – Modelagem da composição física da classe granulométrica de 15,9 a 8 mm de biomassa florestal energética.

Granulometria	Variável dependente	Método de cavaqueamento	Equação	Syx	F	R ² aj
15,9 - 8 mm	Material lenhoso	Martelos e Facas	$ML = 81,1362 + 0,0593569 \cdot TPC$	3,85	43,03	0,57
	Acículas	Martelos e Facas	$AC = 7,44113 - 0,539792 \cdot \sqrt{TPC}$	1,93	55,58	0,63
	Casca	Martelos e Facas	$CS = 12,8574 - 0,0379792 \cdot TPC$	2,37	46,42	0,59
	Material contaminante	Martelos	$MC = -0,128404 + 0,0187667 \cdot TPC$	1,69	11,94	0,35
		Facas	-	-	-	-

Onde: ML= material lenhoso (%); AC= acículas (%); CS= casca (%); MC= material contaminante (%); TPC= tempo de estocagem da biomassa florestal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Tabela 34 – Modelagem da composição física da classe granulométrica de 7,9 a 3,35 mm de biomassa florestal energética.

Granulometria	Variável dependente	Método de cavaqueamento	Equação	Syx	F	R ² aj
7,9 - 3,35 mm	Material lenhoso	-	-	-	-	-
	Acículas	Martelos e Facas	$AC = 19,6095 - 1,33965 \cdot \sqrt{TPC}$	4,83	54,90	0,63
	Casca	Martelos	$CS = 17,0013 - 0,00000135869 \cdot TPC^3 + 1,49747 \cdot \log(TPC)$	3,11	11,92	0,52
		Facas	$CS = 15,2999 + 2,25961 \cdot \log(TPC)$	2,53	44,99	0,80
	Material contaminante	Martelos	$MC = -2,02542 + 0,0935491 \cdot TPC$	6,30	21,35	0,50
		Facas	$MC = -0,215001 + 5,89761E^{-7} \cdot TPC^3$	0,93	100,12	0,90

Onde: ML= material lenhoso (%); AC= acículas (%); CS= casca (%); MC= material contaminante (%); TPC= tempo de estocagem da biomassa florestal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Tabela 35 – Modelagem da composição física da classe granulométrica de <3,35 mm de biomassa florestal energética.

Granulometria	Variável dependente	Método de cavaqueamento	Equação	Syx	F	R ² aj
<3,35mm	Material lenhoso	-	-	-	-	-
	Acículas	Martelos e Facas	$AC = 100,356 - 3,82493 \cdot \log(TPC)$	12,23	11,68	0,25
	Casca	-	-	-	-	-
	Material contaminante	Martelos e Facas	$MC = -0,355542 + 3,82493 \cdot \log(TPC)$	12,23	11,68	0,25

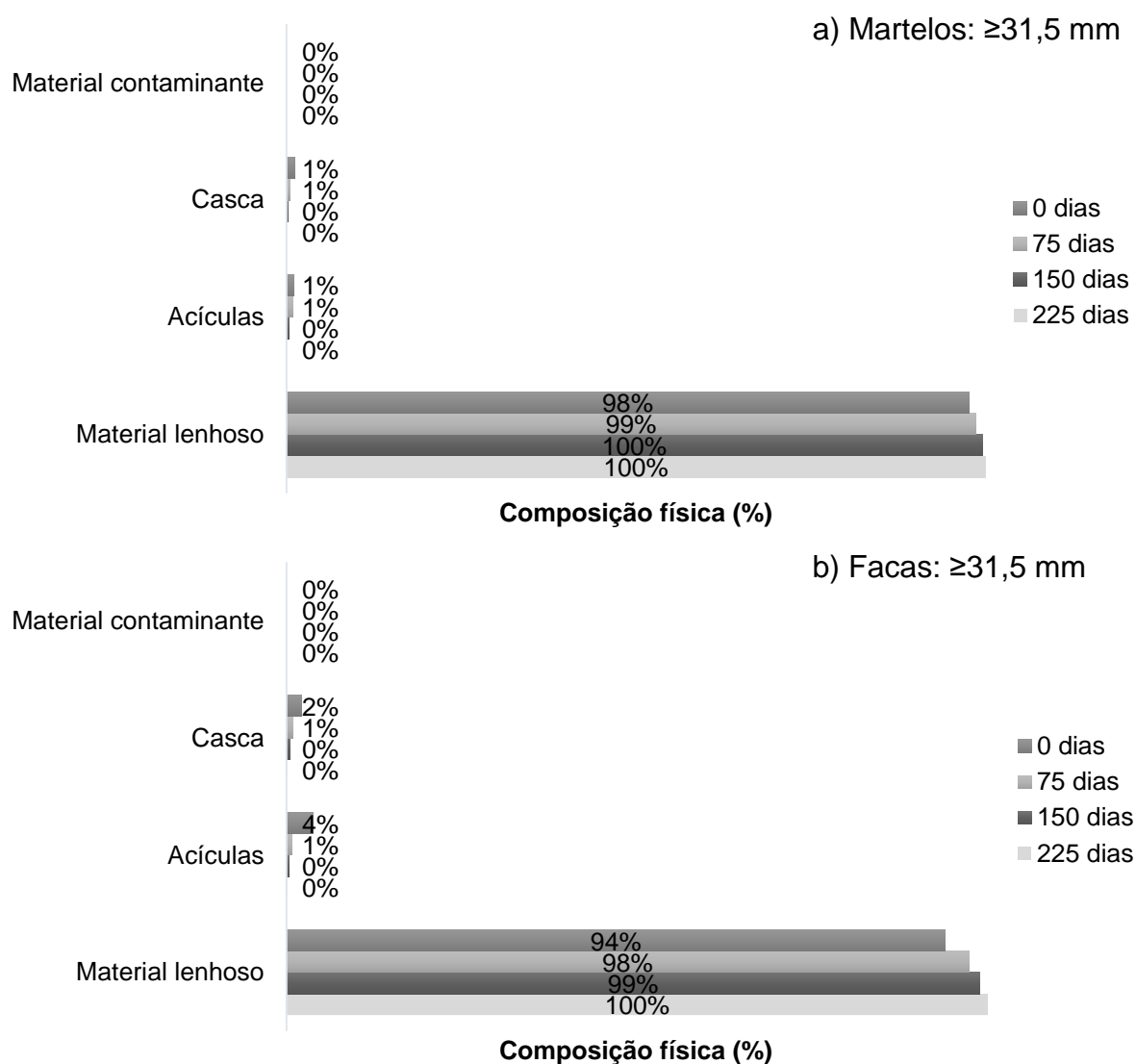
Onde: ML= material lenhoso (%); AC= acículas (%); CS= casca (%); MC= material contaminante (%); TPC= tempo de estocagem da biomassa florestal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Para se observar o efeito do tempo de estocagem sobre a composição física da biomassa florestal, plotou-se graficamente o comportamento dos dados estimados em quatro tempos de estocagem, sendo estes 0, 75, 150 e 225 dias, para todas as classes granulométricas e para ambos os métodos de cavaqueamento.

Na classe granulométrica $\geq 31,5$ mm observaram-se comportamentos similares entre métodos de cavaqueamento de martelos e facas, sendo que, ao aumentar o tempo de estocagem da biomassa, há o aumento da proporção de material lenhoso nesta classe (Figura 15).

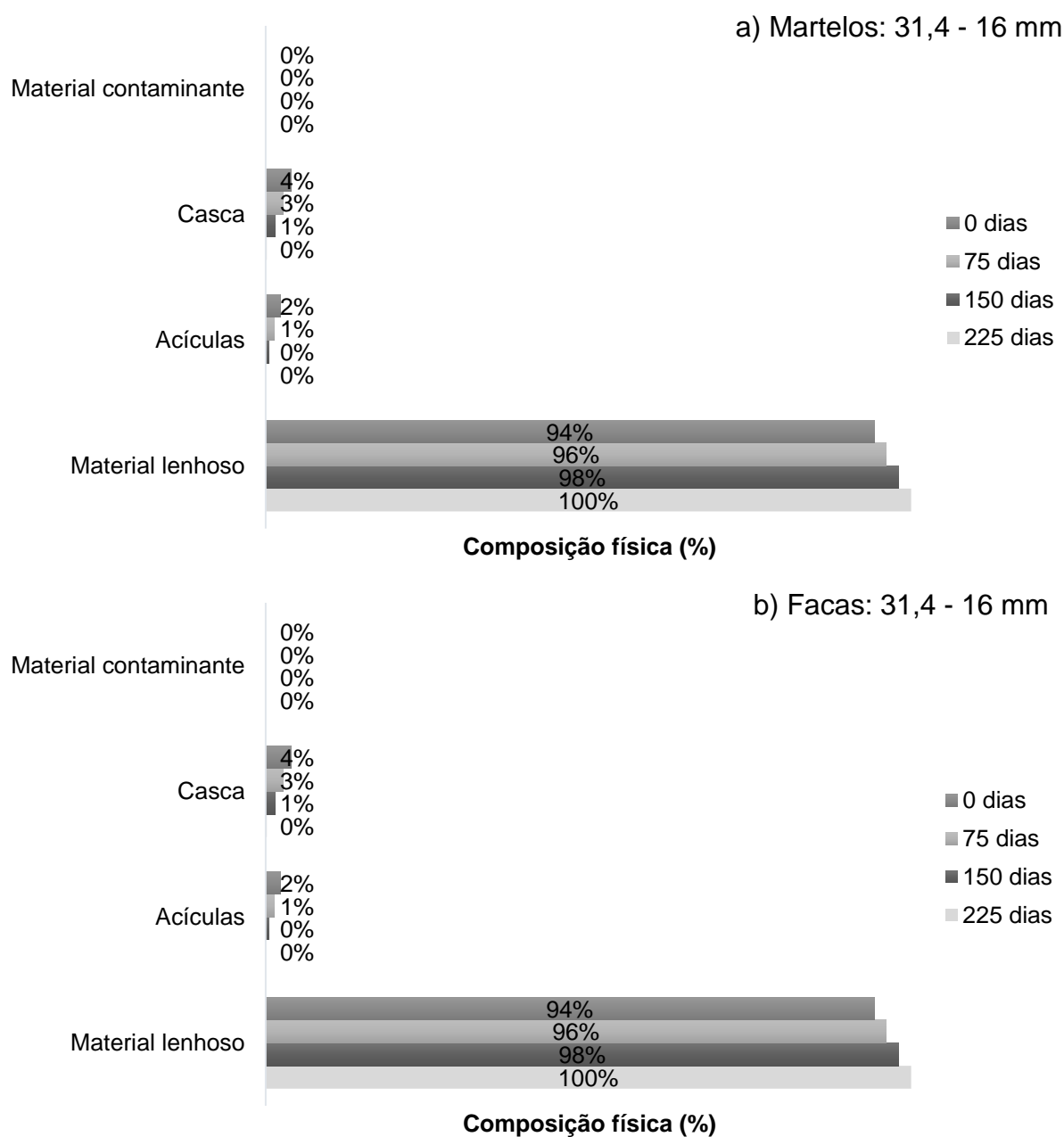
Figura 15 – Resultados estimados da composição física da classe granulométrica $\geq 31,5$ mm da biomassa resultante da operação de biomassa configurada com método de cavaqueamento de martelos (a) e facas (b) para tempos de estocagem de 0, 75, 150 e 225 dias.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Assim como na classe anterior, na classe de 31,4 a 16 mm, ao aumentar o tempo de estocagem, aumentou a proporção de material lenhoso e diminuíram as proporções de casca e acículas (Figura 16).

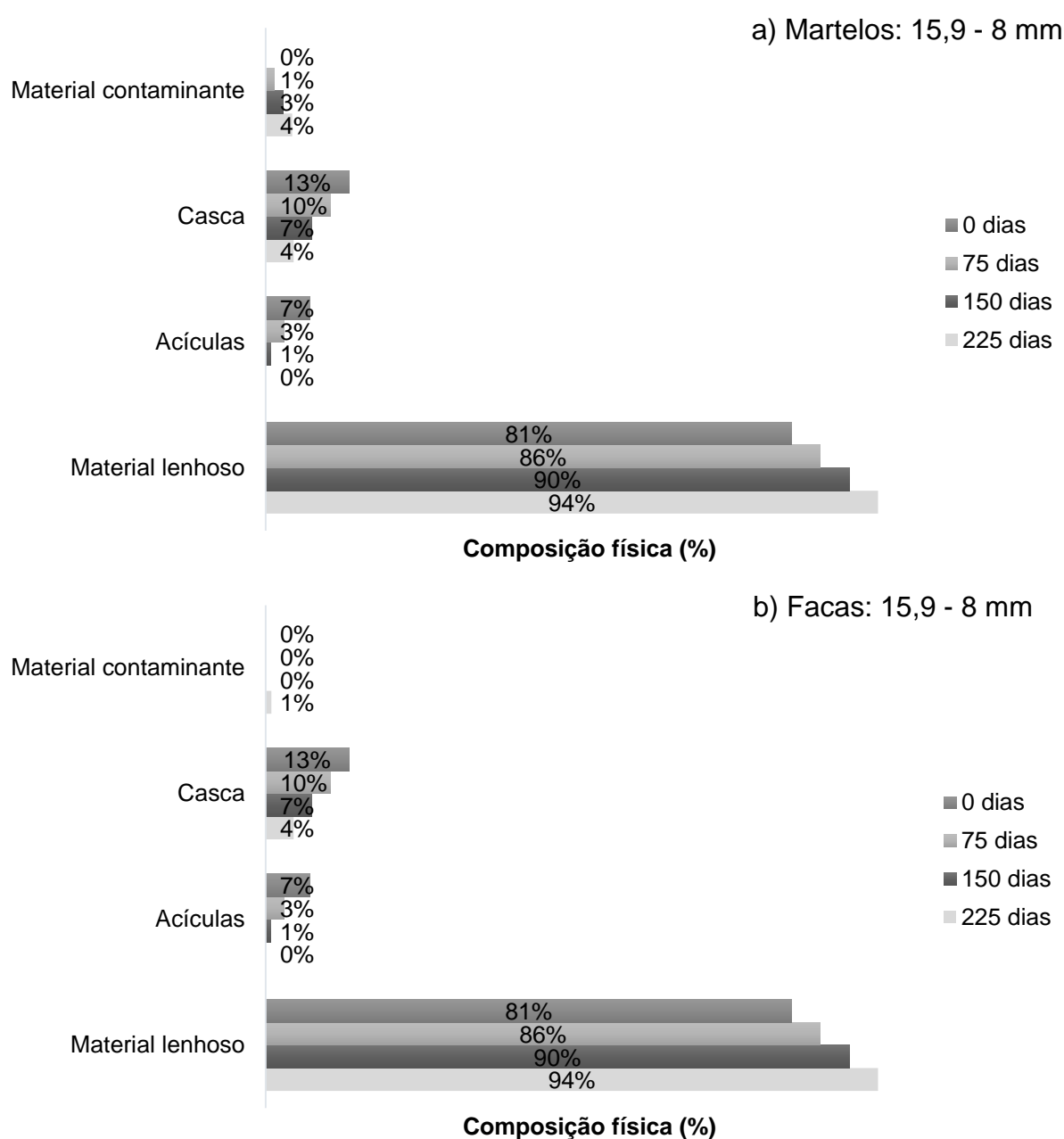
Figura 16 – Resultados estimados da composição física da classe granulométrica de 31,4 a 16 mm da biomassa resultante da operação de biomassa configurada com método de cavaqueamento de martelos (a) e facas (b) para tempos de estocagem de 0, 75, 150 e 225 dias.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Na composição física na classe de 15,9 a 8 mm a proporção de casca e acículas diminuíram ao aumentar o tempo de estocagem. Em contrapartida, comportamento contrário é encontrado nas proporções de material lenhoso e material contaminante (Figura 17).

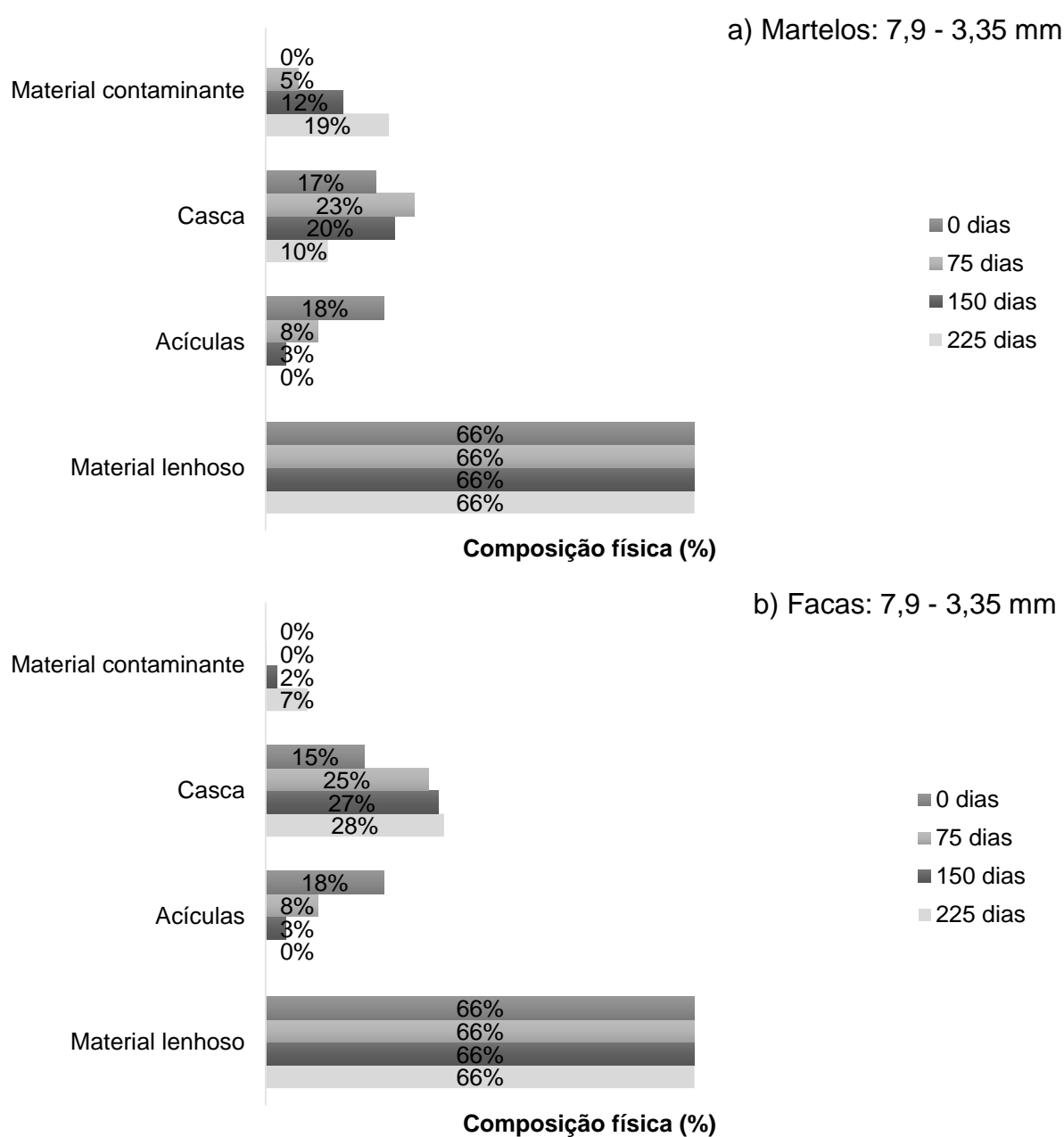
Figura 17 – Resultados estimados da composição física da classe granulométrica de 15,9 a 8 mm da biomassa resultante da operação de biomassa configurada com método de cavaqueamento de martelos (a) e facas (b) para tempos de estocagem de 0, 75, 150 e 225 dias.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Ao aumentar o tempo de estocagem da biomassa florestal, os resultados estimados da classe de 7,9 a 3,35 mm demonstraram acréscimo na proporção de casca e decréscimos nos materiais acículas e material contaminante (Figura 18).

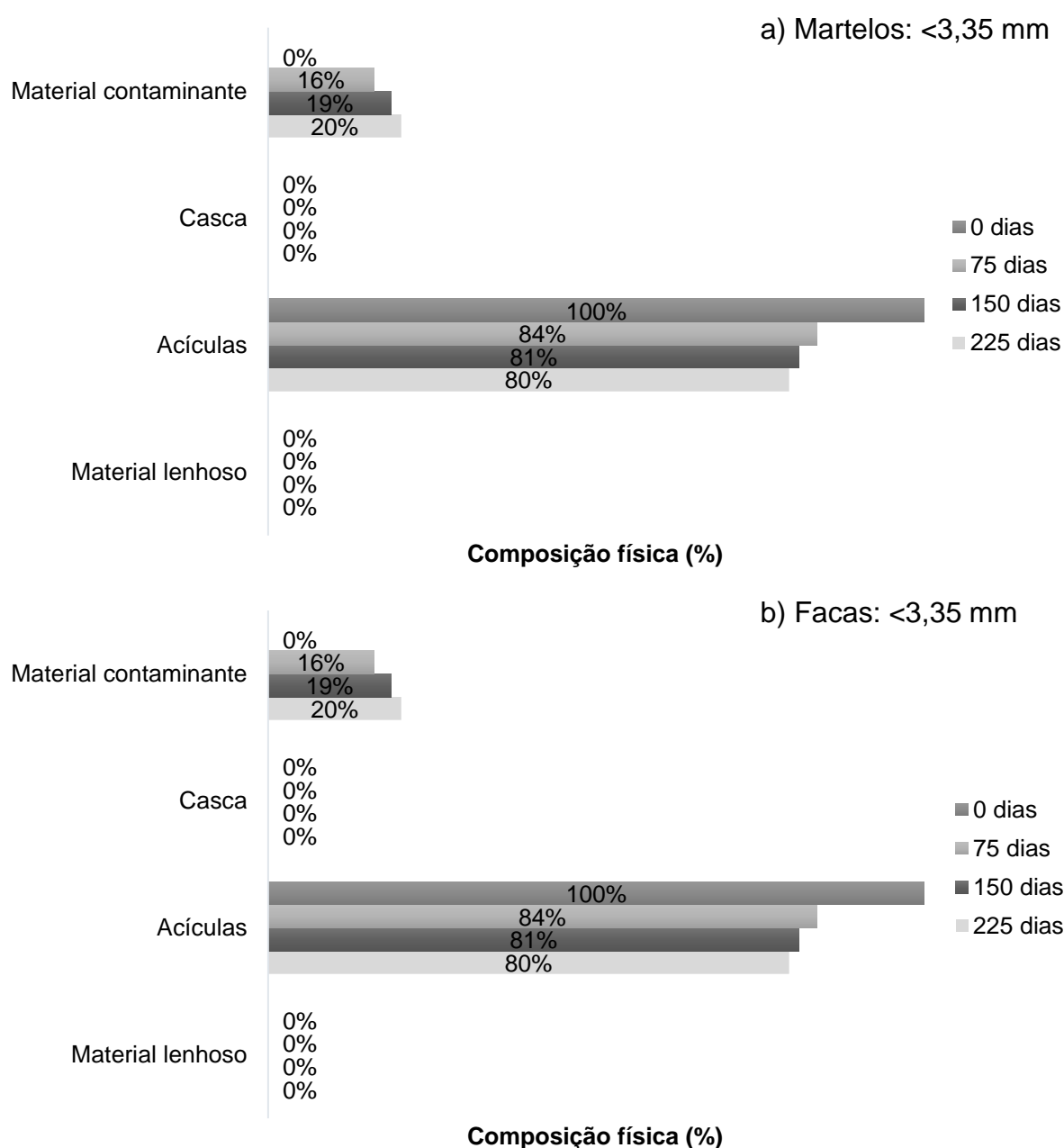
Figura 18 – Resultados estimados da composição física da classe granulométrica de 7,9 a 3,35 mm da biomassa resultante da operação de biomassa configurada com método de cavaqueamento de martelos (a) e facas (b) para tempos de estocagem de 0, 75, 150 e 225 dias.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

A classe <3,35 mm, que é distribuída em dois materiais, acículas e material contaminante, demonstrou tendência de incremento na proporção de material contaminante e queda na proporção de acículas ao se aumentar o tempo de estocagem do material (Figura 19).

Figura 19 – Resultados estimados da composição física da classe granulométrica <3,35 mm da biomassa resultante da operação de biomassa configurada com método de cavaqueamento de martelos (a) e facas (b) para tempos de estocagem de 0, 75, 150 e 225 dias.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Baker, Dale Greene e Wilson (2012) realizando a caracterização dos combustíveis de cavacos de pinus de árvores inteiras no EUA encontraram 12% de casca e 1,5% de folhagem. Resultados semelhantes aos encontrados por Spinelli *et al.* (2011), que relatou 10% de casca (e galhos) e 2% outros (folhagem e poeira). Quando comparamos ao presente trabalho, este apresentou proporções médias entre 0,45% (classe granulométrica $\geq 31,5$ mm; martelos) a 23,63% (classe granulométrica 7,9 a 3,35 mm; facas) para casca e entre 0,54% (classe granulométrica $\geq 31,5$ mm; martelos) e 90,09% para acículas (classe granulométrica $< 3,35$ mm; facas).

As proporções de casca e acículas do presente trabalho foram maiores quando comparadas aos resultados de Baker, Dale Greene e Wilson (2012) e Spinelli *et al.* (2011), resultado este motivado pela biomassa florestal energética apresentar maiores proporções de casca e acículas quando comparada à árvores inteiras.

Em relação ao tempo de estocagem, percebe-se que quanto maior o tempo de estocagem menores as proporções de acículas e casca nas classes granulométricas de maiores dimensões, sendo esta tendência resultado da decomposição física destes componentes, fazendo com que o seu tamanho seja alterado, aumentando assim, a proporção de material fino na composição da biomassa florestal. Além disso, ao se aumentar o tempo de estocagem, há também o aumento da proporção de material contaminante.

A Tabela 36 demonstra os resultados de coeficiente de Pearson, descrevendo a relação entre tempo de estocagem, características físicas, químicas e energéticas da biomassa. Destacaram-se as correlações significativas do tempo de estocagem sobre a densidade aparente (12% umidade), teor de cinzas, poder calorífico superior e classe granulométrica $< 3,35$ mm.

A análise dos coeficientes da correlação de *Pearson* reforçam a tese de influência das menores classes granulométricas sobre a densidade aparente, sendo que houveram correlações positivas significativas entre densidade aparente e classe granulométrica de 7,9 a 3,35 mm e densidade aparente (12% umidade) e classe de $< 3,35$ mm.

Tabela 36 – Coeficientes de Correlação de *Pearson* das características físicas, químicas, energéticas e tempo de estocagem da biomassa florestal.

	Tempo de estocagem	Teor de umidade	Densidade aparente	Densidade aparente (12%)	Teor de cinzas	Poder calorífico superior	Poder calorífico líquido	≥31,5 mm	31,4 - 16 mm	15,9 - 8 mm	7,9 - 3,35 mm	<3,35 mm
Tempo de estocagem	1,00											
Teor de umidade	-0,12 ^{ns}	1,00										
Densidade aparente	0,29 ^{ns}	0,35*	1,00									
Densidade aparente (12%)	0,84*	-0,22 ^{ns}	0,28 ^{ns}	1,00								
Teor de cinzas	0,51*	-0,13 ^{ns}	0,51*	0,52*	1,00							
Poder calorífico superior	-0,49*	0,079 ^{ns}	-0,55*	-0,52*	-0,98*	1,00						
Poder calorífico líquido	-0,32 ^{ns}	-0,34 ^{ns}	-0,63*	-0,30 ^{ns}	-0,81*	0,85*	1,00					
≥31,5 mm	-0,19 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	-0,29 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	-0,53*	0,55*	0,56*	1,00				
31,4 - 16 mm	-0,29 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	-0,30 ^{ns}	-0,62*	0,58*	0,63*	0,38*	1,00			
15,9 - 8 mm	-0,20 ^{ns}	0,45*	-0,10 ^{ns}	-0,31 ^{ns}	-0,44*	0,41*	0,10 ^{ns}	-0,24 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	1,00		
7,9 - 3,35 mm	-0,00 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,37*	-0,01 ^{ns}	0,63*	-0,63*	-0,66*	-0,58*	-0,54*	0,04 ^{ns}	1,00	
<3,35 mm	0,45*	-0,17 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,55*	0,83*	-0,79*	-0,64*	-0,53*	-0,76*	-0,40*	0,37*	1,00

*correlação significativa ao nível de 5% de probabilidade; ^{ns} correlação não significativa

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

4.3 RENDIMENTO E BALANÇO ENERGÉTICO

4.3.1 RENDIMENTO ENERGÉTICO

Os resultados de consumo médio de diesel para os métodos de cavaqueamentos de martelos e facas foram de 119,1 l.PMH⁻¹ e 110,1 l.PMH⁻¹, perfazendo produtividades médias do cavaqueador de 83,31 gt.PMH⁻¹ para martelos e 81,37 gt.PMH⁻¹ para facas.

Os resultados de estatística descritiva de rendimento energético demonstram que o método de cavaqueamento de martelos apresenta um maior consumo de

combustível para produzir uma tonelada verde de biomassa florestal, comparado ao método de cavaqueamento de facas, com resultados médios de $1,46 \text{ l.gt}^{-1}$ e $1,43 \text{ l.gt}^{-1}$ respectivamente (Tabela 37).

Tabela 37 – Estatística descritiva do rendimento energético da operação de biomassa florestal.

Método de cavaqueamento	N	Média (l.gt ⁻¹)	Mediana	E (%)	CV (%)	Mín.	Máx.	Curt.	Assim.
Martelos	249	1,46	1,46	1,94	15,53	1,05	2,20	0,1776	0,5115
Facas	136	1,43	1,38	2,20	13,00	1,14	1,89	-0,3493	0,8177

Legenda: n= número de amostras; E (%): erro relativo amostral; CV= coeficiente de variação; Mín= mínimo; Máx= máximo; Curt.= curtose; Assim.= assimetria.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Este resultado foi reflexo do menor consumo de diesel do sistema quando se aplicado o método de cavaqueamento de facas, sendo que, a maior diferença entre consumos é encontrada no cavaqueador móvel, o qual apresenta resultados médios de $59,6 \text{ l.h}^{-1}$ para o método de cavaqueamento de martelos e $51,2 \text{ l.h}^{-1}$ para o de facas.

Oro (2015) obteve resultado médio de rendimento energético semelhantes aos apresentados, tendo valor médio igual à $1,1 \text{ gKw.t}^{-1}$, valor mínimo de $0,7 \text{ gKw.t}^{-1}$ e máximo $1,5 \text{ gKw.t}^{-1}$, com amplitude igual à $0,8 \text{ gKw.t}^{-1}$. Ainda segundo Oro (2015), esta grande variação encontrada nos resultados de rendimento energético é motivada pela inconstância na produtividade do cavaqueador, ficando evidente a influência de algumas variáveis, como a logística de transporte, as paradas para manutenção e os deslocamentos das máquinas do sistema.

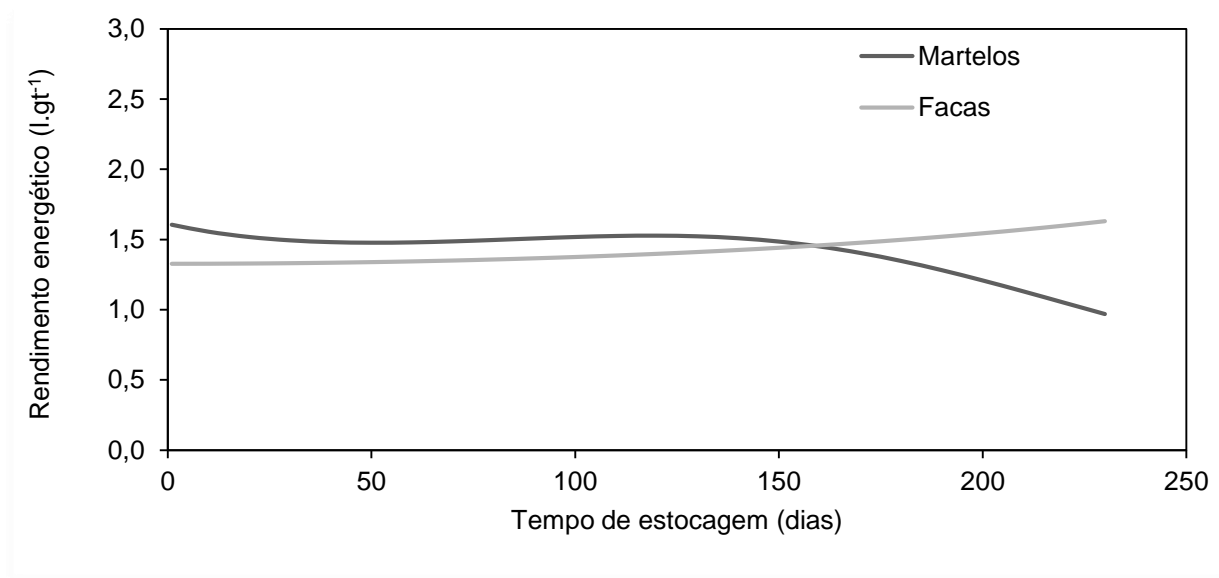
Esta tendência ficou explícita através da relação negativa entre o aumento na produtividade do cavaqueador móvel florestal e decréscimo nos resultados de rendimento energético, comportamento este observado em ambos os métodos de cavaqueamento.

Os resultados de rendimento energético demonstraram inexistência de efeito significativo do método de cavaqueamento sobre o rendimento energético da operação de biomassa florestal, com valor de p igual à 0,1733 na análise de covariância. Em contrapartida, o tempo de estocagem demonstrou efeito significativo sobre o rendimento energético desta operação com resultado de valor de p de 0,0006, onde, ao aumentar o tempo de estocagem, menor foi o rendimento energético do

sistema de cavaqueamento de biomassa florestal para o método de martelos e maior o rendimento para o método de facas.

Os resultados de rendimento energético foram calculados utilizando as equações ajustadas para se estimar a produtividade do cavaqueador móvel florestal para martelos e facas (Tabela 13) e o consumo médio de diesel do sistema de cavaqueamento, resultando nos valores de rendimento energético para ambos os métodos de cavaqueamento, conforme demonstrado na Figura 20.

Figura 20 – Resultados estimados do rendimento energético da operação de biomassa com métodos de cavaqueamento de martelos e facas em função da variável tempo de estocagem.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Com uso do método de martelos, verificou-se queda no rendimento energético do sistema de cavaqueamento ao se aumentar o tempo de estocagem, assim, consumindo menor volume de combustível para a produção da biomassa florestal energética.

No método de facas, houve incremento do rendimento energético ao se aumentar o tempo de estocagem, sendo este resultado reflexo da queda da produtividade deste método ao se aumentar o tempo de estocagem da biomassa em campo.

4.3.2 BALANÇO ENERGÉTICO

Os resultados de produções energéticas obtiveram como médias 117,62 Gcal.h⁻¹ e 100,37 Gcal.h⁻¹ para os métodos de cavaqueamento de martelos e facas, respectivamente. Os consumos energéticos médios foram iguais a 1,08 Gcal.h⁻¹ para martelos e 1,04 Gcal.h⁻¹ para facas.

Os resultados de produções e consumos energéticos demonstraram melhor comportamento energético da biomassa quando utilizado o método de cavaqueamento de martelos, com balanço energético médio igual a 108,40, ou seja, a cada 1 kcal consumida para a produção de 1 tonelada verde de biomassa, essa mesma 1 tonelada verde de biomassa produz 108,40 kcal de energia.

O método de cavaqueamento de facas, também, apresentou resultados positivos no balanço energético, com média de 97,80 (Tabela 38), com variação entre métodos de cavaqueamento igual à 10,6, resultando na significância do efeito método de cavaqueamento sobre os resultados de balanço energético.

Tabela 38 – Estatística descritiva do balanço energético da operação de biomassa florestal.

Método de cavaqueamento	n	Média	Mediana	E (%)	CV (%)	Mín.	Máx.	Curt.	Assim.
Martelos	249	108,40	119,15	5,11	40,94	45,06	207,74	-1,20	0,13
Facas	136	97,80	92,63	4,30	25,38	64,96	157,81	0,32	1,12

Legenda: n= número de amostras; E (%): erro relativo amostral; CV= coeficiente de variação; Mín= mínimo; Máx= máximo; Curt.= curtose; Assim.= assimetria.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

Os dados resultantes de balanço energético do presente estudo são semelhantes aos obtidos por Oro (2015), o qual obteve balanço energético igual à 116 avaliando a operação de um cavaqueador móvel florestal. A pequena diferença encontrada entre os resultados da presente pesquisa e de Oro (2015), são explicadas pelo fato de que no presente trabalho foi considerado o consumo energético de todo o sistema de cavaqueamento da biomassa florestal, o qual apresentou resultados de balanços energéticos iguais à 108,40 e 97,80 para os métodos de cavaqueamento de martelos e facas, respectivamente.

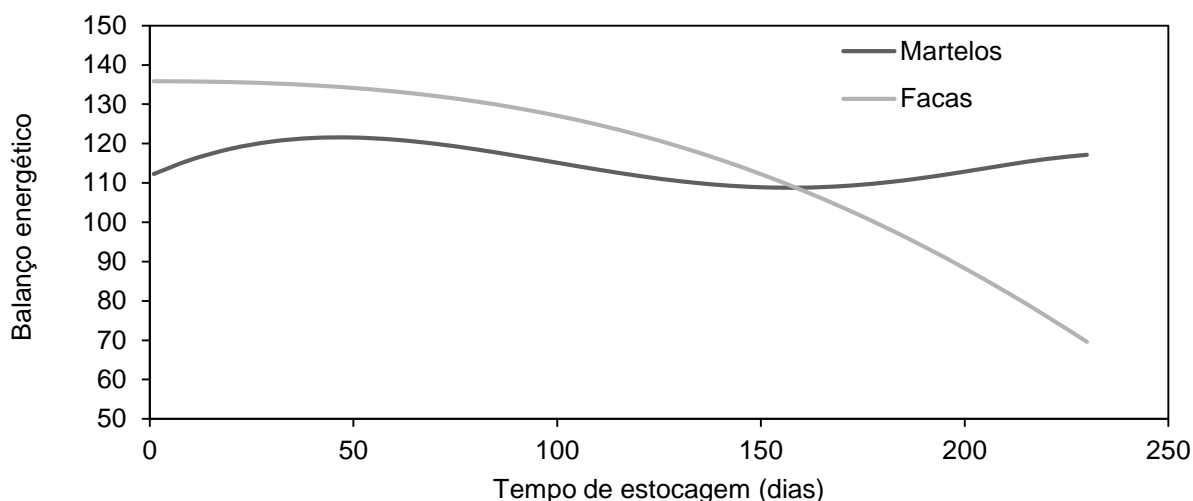
Canto (2011) avaliando um sistema de cavaqueamento utilizando picador equipado com método de cavaqueamento por facas, apresentou resultados de

balanço energético próximos aos encontrados na presente pesquisa, entre 94 e 162, resultados estes oscilando conforme os resultados de poder calorífico contido na biomassa.

Os resultados da análise de covariância ao nível de 5% de probabilidade demonstraram a existência de efeito significativo do método de cavaqueamento e tempo de estocagem sobre o balanço energético, com resultados de valor de p iguais à 0,0002 e 0,0000, respectivamente.

Assim como no rendimento energético, os resultados de balanço energético foram resultantes das equações ajustadas para cálculo da produtividade do cavaqueador móvel florestal (martelos e facas), poderes caloríficos líquidos (martelos e facas) e consumo médio de diesel do sistema de cavaqueamento de biomassa florestal, que resultaram nas curvas de balanço energético para os métodos de cavaqueamento de martelos e facas (Figura 21).

Figura 21 – Resultados estimados do balanço energético da operação de biomassa configurada com métodos de cavaqueamento de martelos e facas em função da variável tempo de estocagem.



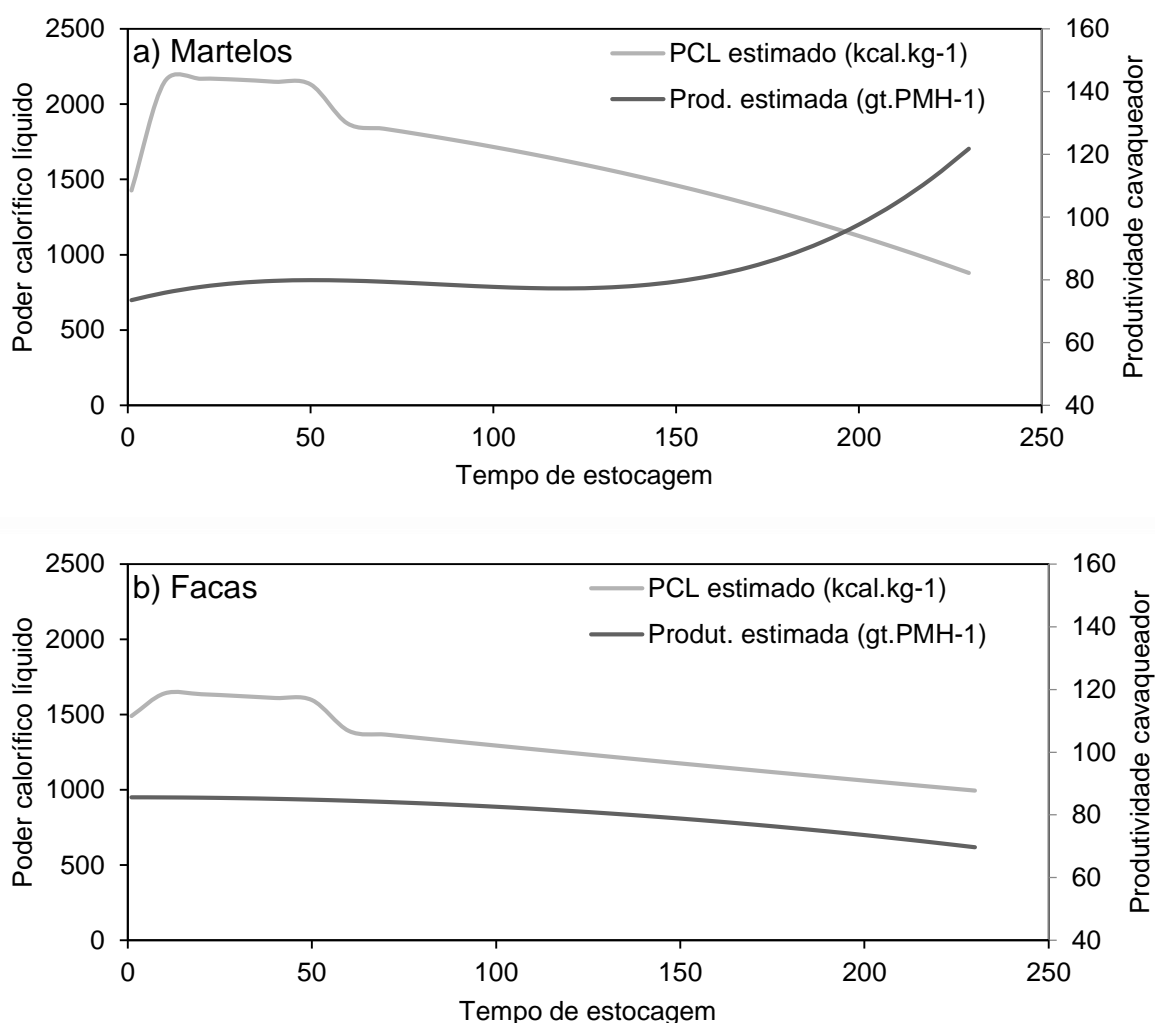
Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

O comportamento do balanço para o método de martelos apresentou uma certa variação ao se aumentar o tempo de estocagem, tendo no tempo de estocagem igual à 50 dias o máximo balanço energético do sistema de biomassa florestal, com resultado de 207,74. O comportamento da estimativa do balanço energético para o método de cavaqueamento de facas obteve o seu maior resultado com 0 dias de

estocagem, com resultado de balanço energético igual à 157,81, sendo que, para o método de cavaqueamento de facas, o aumento do tempo de estocagem acarreta na diminuição nos resultados de balanço energético.

As variações nos resultados de balanço energético da biomassa florestal ao se aumentar o tempo de estocagem, são explicadas pelo decréscimo do poder calorífico líquido, sendo este fortemente afetado pelo aumento do teor de cinzas da biomassa e comportamento da produtividade estimada do cavaqueador móvel florestal, a qual apresenta acréscimo no método de martelos e decréscimo no método de facas (Figura 22).

Figura 22 – Comportamento do poder calorífico líquido da biomassa florestal estimado e produtividade do cavaqueador estimada para os métodos de cavaqueamento de martelos (a) e facas (b).



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

5 CONCLUSÕES

O método de cavaqueamento apresentou efeito significativo sobre a disponibilidade mecânica do cavaqueador móvel florestal e sobre os resultados de produtividade do cavaqueador móvel florestal e escavadeira cavaqueamento, com melhores resultados operacionais no método de cavaqueamento de martelos. O tempo de estocagem apresentou efeito significativo sobre as produtividades de todas as máquinas do sistema de cavaqueamento, com correlação positiva na produtividade do cavaqueador móvel florestal e correlações negativas com as demais máquinas do sistema de cavaqueamento.

O método de cavaqueamento demonstrou efeito significativo sobre o teor de umidade e proporções de biomassa nas classes granulométricas de 15,9 a 8 mm, 7,9 a 3,35 mm de biomassa florestal de *Pinus taeda* L., onde no método de martelos obtivemos os menores resultados de teor de umidade e menor proporção na classe de 15,9 a 8 mm. O método de facas apresentou menor proporção no resultado de análise granulométrica na classe de 7,9 a 3,35 mm. O tempo de estocagem apresentou efeito significativo sobre os resultados de densidade aparente, densidade aparente a 12% de umidade, teor de cinzas, proporção de biomassa da classe <3,35 mm, sendo que, ao se aumentar o tempo de estocagem, aumentam os resultados destas características da biomassa florestal energética. Ainda, o tempo de estocagem apresentou efeito significativo sobre o poder calorífico superior, onde ao se aumentar o tempo de estocagem, há decréscimo nos resultados de poder calorífico superior.

O balanço energético do sistema de cavaqueamento se mostrou positivo em ambos os métodos estudados e em todos os tempos de estocagem, demonstrando a viabilidade energética do sistema. Os resultados de balanço energético foram influenciados significativamente pelos métodos de cavaqueamento e tempo de estocagem ocasionados pelos diferentes comportamentos dos resultados de produtividade, poder calorífico líquido e consumo de combustível nos diferentes métodos e tempos de estocagem, tendo como tempo de estocagem ótimo visando a maximização do balanço energético: 50 dias para o método de martelos e 0 dias para o método de facas. O tempo de estocagem também apresentou efeito significativo sobre o rendimento energético, o qual obteve os melhores resultados nos tempos de estocagem de 230 dias para martelos e 0 dias para facas.

A modelagem da produtividade para o sistema de cavaqueamento e das características físicas, químicas e energéticas da biomassa florestal foram realizadas com ênfase, contando com bons ajustes, possibilitando assim a predição destes parâmetros através de variáveis independentes de fácil obtenção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira – Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C.** Rio de Janeiro, 4p., 2017.

ACKERMAN, P.; GLEASURE, E.; ACKERMAN, S.; SHUTTLEWORTH, B. **Standards for time studies for the South African forest industry.** South African: ICFR/FESA, 2014.

ALMEIDA, B. O. **Viabilidade do aproveitamento de resíduos florestais.** 2016. Dissertação (Mestrado em Silvicultura e Manejo Florestal) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

ALMEIDA, N. F., CAMARGO, D. T., ARRIEL, D. A. A., MORI, F. A. Avaliação das propriedades dos resíduos de *Pinus patula* em diferentes períodos de armazenamento visando a cogeração de energia. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 2, p. 269-274, abr./jun. 2010.

AMAN, A. L.; BAKER, S. A.; DALE GREENE, W. Productivity and Product Quality Measures for Chippers and Grinders on Operational Southern US Timber Harvests. **International Journal of Forest Engineering**, v. 22, n. 2, p. 7-14, jul. 2011.

BAKER, S. A.; DALE GREENE, W.; WILSON, A. Fuels characteristics of woods-run whole tree Southern pine chips. **Biomass and Bioenergy**, v.37, n.1, p. 67-72, 13 jan. 2012.

BONAZZA, M. **Alternativas operacionais no desbaste e corte final em florestas de *Pinus taeda*.** 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

BRAND, M. A., STAHELIN, T. F. S., FERREIRA, J. C., NEVES, M. D. Produção de biomassa para geração de energia em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes idades. **Revista Árvore**, Viçosa v. 38, n. 2, p. 353-360, mar./abr. 2014.

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

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

BRAND, M. A.; COSTA, V. J. da; DURIGON, A.; AMORIM, M. **Determinação das propriedades energéticas de resíduos de madeira em diferentes períodos de armazenamento:** Relatório de pesquisa. Lages/SC: UNIPLAC, 2005.

BRIDGWATER, T. Review Biomass for energy, **Journal of the Science of Food and Agriculture**, n. 86, p. 1755-1768, 01 set. 2006.

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

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, 31 out. 2011.

CANTO, J. L. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia**. 2009. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

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, 12 set. 2006.

CEN – European Committee for Standardization. **EN 14774 Solid Biofuels – Determination of moisture content – oven dry method**. 2009.

CEN - European Committee for Standardization. **EN 15149 - 1 Determinación de la distribución de tamaño de partícula**. Parte 1: Método del tamiz oscilante con abertura de malla igual o superior a 1 mm. Madrid, Espanha. 2011.

CEN - European Committee for Standardization. **EN 15149 - 2 Determinación de la distribución de tamaño de partícula**. Parte 2: Método del tamiz vibrante con abertura de malla inferior o igual 3,15 mm. Madri, Espanha. 2011.

CEN - European Committee for Standardization. **EN 15103 Solid biofuels. Determination of bulk density**. Germany, 2009.

CORTEZ, L. A., LORA, E. E. S., GÓMEZ, E. O. **Biomassa Para Energia**. São Paulo: Editora Unicamp, 2008.

CHRISTOPHERSON, N.; STOKES, B.; WISELOGEL, A.; WOODFINS, S.; ZERBE, J. Harvesting and handling fuelwood. In: FAZIO, J. R. (Ed.). **Trees for fuelwood: a step toward energy diversity**. Nebraska: The Arbor Day Institute, 1993. p. 34-44.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN. **DIN 51900: 2 Determining the Gross Calorific Value of Solid and Liquid Fuels Using the Isoperibol or static-jacket Calorimeter, and Calculation of Net Calorific Value**. Berlin, 2003.

EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina S.A. **Zoneamento Agroecológico e Socioeconômico do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis, 1998.

FERREIRA, J. C.; STÄHELIN, T. S. F.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. Qualificação da biomassa em povoamentos florestais de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 46, n. 2, p. 269-276, Curitiba, 13 mai. 2016.

GARSTANG, J.; WEEKES, A.; POULTER, R.; BARTLETT, D. **Identification and characterisation of factors affecting losses in the large-scale, non-entilated bulkstorage of wood chips and development of best storage practices.** FES B/W2/00716/RESP.DTI/Pub urn 02/1535. United Kingdom. 116p, 2002.

GAZZONI, D. L.; FELICI, P. H. N.; CORONATO, R. M.; RALISCH, R. Balanço energético das culturas de soja e girassol para produção de biodiesel. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 4, p. 259-265, 9 mar. 2007.

GORTE, E. P. **Capacidade Produtiva e Potencial Energético de Coprodutos na Colheita de Povoamentos Clonais de Eucalipto.** 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2019.

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, fev. 2005.

HAKKILA, P. **Developing technology for large-scale production of forest chips.** Helsinki: Wood Energy Technology Programme, 2004.

HAKKILA, P. **Utilization of residual forest biomass.** Berlin/Germany: Springer-Verlag (Springer Series in Wood Science), 1989.

HANSEN U. E.; NYGAARD I. Sustainable energy transitions in emerging economies: The formation of a palm oil biomass waste-to-energy niche in Malaysia 1990–2011. **Energy Policy**, v. 66, p. 666-676, 2014.

HOAGLIN, D. C.; MOSTELLER, F.; TUKEY, J.W. **Análisis exploratória de dados: Técnicas robustas, un guía.** Lisboa: Salamandra, 1983.

KALLIO, M; LEINONEN, A. **Production technology of forest chips in Finland.** Jyväskylä/Finland: VTT, 2005.

KANAWATY, G. **Introduction to Work Study.** Ed. 4, Geneva: International Labour Office, 1992.

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

MAGAGNOTTI, N.; SPINELLI, R. **Good practice guidelines for biomass production studies.** Via Madonna del Piano, Sesto Fiorentino/FI/Italy: CNR IVALLSA, 2012.

MAGOSSI, D. C. **A produção florestal e a industrialização de seus resíduos na região de Jaguariaíva – Paraná.** 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

MBANZE, A. A.; SILVA, D. A.; TETTO, A. F.; PEREIRA, J. F.; BATISTA, A. C. Potencial energético de combustíveis florestais em cultivos de *Pinus elliottii* no sul do Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 4, p. 1640-1650, out./dez. 2018.

MOLA-YUDEGO, B.; PICCHI, G.; RÖSER, D.; SPINELLI, R. Assessing chipper productivity and operator effects in forest biomass operations. **Silva Fennica**, v. 49 n. 5, 14p., 2 jul. 2015.

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

MURPHY, G. Determining sample size for harvesting cost estimation. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 35, n. 2/3, p. 166-169, 1 jan. 2005.

NOGUEIRA, M. F. M. **Biomassa Energética: Caracterização da Biomassa**. Palestra Proferida na I Escola de Combustão, Florianópolis, 2007.

ORO, D. **Análise técnica de um cavaqueador e caracterização energética de cavacos de biomassa da colheita de madeira**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2015.

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**. 2011, Tese (Doutorado em Ciências de Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

POTTIE, M. A.; GUIMIER, D. Y. **Preparation of forest biomass for optimal conversion**. Canada: FERIC/IEA, 1985.

RACKL, M.; GÜNTNER, W. A. Experimental investigation on the influence of different grades of wood chips on screw feeding performances. **Biomass and Bioenergy**, v. 88, p. 106–115, 28 mar. 2016.

RANTA, T.; RINNE, S. The profitability of transporting uncomminuted raw materials in Finland. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, p. 231-237, 2006.

RANTA, T.; HALONEN, P.; ALAKANGAS, E. **Production of forest chips in Finland**. Finland: OPET Finland/VTT Energy, 2001.

REGAZZI, A.J.; LEITE, H.G. **Análise de regressão: teoria e aplicações em manejo florestal**. Viçosa/MG: SIF. 1993.

ROMANELLI, T. L. **Sustentabilidade energética de um sistema de produção da cultura de eucalipto**. 2007. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SILVA, C. B.; SANT'ANNA, C. M.; MINETTE, L. J. Avaliação ergonômica do "Feller-buncher" utilizado na colheita de eucalipto. **Revista Cerne**, Lavras, v. 9, n. 1, p. 109-118, 2003.

SOARES, T. S.; CARNEIRO, A. C. O.; GONÇALVES, E. O., LELLES, J. G. Uso da biomassa florestal na geração de energia. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, Garça, n. 8, p. 1-9, ago. 2006.

SOUZA, M. M. **Caracterização e viabilidade econômica do uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda* L.** 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SPINELLI, R.; CAVALLO, E.; ELIASSON, L., FACELLO, A. Comparing the efficiency of drum and disc chippers. **Silva Fennica**, v. 47, n. 2, 11p., 11 abr. 2013.

SPINELLI, R.; NATI, C.; SOZZI L.; MAGAGNOTTI, N. PICCHI, G. Physical characterization of commercial woodchips on the Italian energy market. **Fuel**, Amsterdam, v. 90, n. 1, p. 2198-2202, 17 fev. 2011.

SPINELLI, R.; HARTSOUGH, B. A survey of Italian chipping operations, **Biomass and Bioenergy**, v. 21, p. 433-444, 15 jun. 2001.

TUKEY, J. W. **Exploratory data analysis**. 1. ed. Massachusetts: Reading, 1977.

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

WATSON, W. F.; SABO, R. F.; STOKES, B. J. Productivity of in-woods chippers processing understory biomass. In: COUNCIL ON FOREST ENGINEERING, 1986, Mobile, AL, US. **Improving Productivity through Forest Engineering**. Proceeding. Mobile: Council on Forest Engineering, 1986. p. 69-72.

APÊNDICE A – MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DA ESCAVADEIRA ENLEIRAMENTO.

Tambor	Variável independente	Variável dependente	Equação	Syx	f	R ² _{aj}
Martelos e Facas	Tempo de estocagem	Produtividade (gt.PMH ⁻¹)	Prod (gt.PMH ⁻¹)= 13.429,1 - 396,064*TPC + 0,573638*TPC ² - 0,000612975*TPC ³ - 21841,9*(1/TPC) + 8858,83*√TPC - 14604,5*(log(TPC))	7,14	134,42	0,68
		Produtividade (dt.PMH ⁻¹)	Prod (dt.PMH ⁻¹)= 51,3632 - 0,262058*TPC + 0,00000307487*TPC ³ - 30,0493*(1/TPC)	3,38	349,81	0,74
	Teor de umidade	Produtividade (gt.PMH ⁻¹)	Prod (gt.PMH ⁻¹)= 37134,5 - 136684,0*TU ² + 88129,8*TU ³ + 17254,5*(1/TU) + 69854,2*(log(TU))	10,94	33,15	0,26
		Produtividade (dt.PMH ⁻¹)	Prod (dt.PMH ⁻¹)= 21132,3 - 78089,8*TU ² + 50837,6*TU ³ + 9642,57*(1/TU) + 39262,6*(log(TU))	5,87	25,43	0,21

Onde: Prod (gt.PMH⁻¹)= produtividade em tonelada verde; Prod (dt.PMH⁻¹)= produtividade em tonelada seca; TPC= tempo de estocagem da biomassa florestal; TU= teor de umidade da biomassa florestal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

APÊNDICE B – MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DA PÁ CARREGADEIRA.

Tambor	Variável independente	Variável dependente	Equação	Syx	f	R ² _{aj}
Martelos e Facas	Tempo de estocagem	Produtividade (gt.PMH ⁻¹)	$\text{Prod (gt.PMH}^{-1}\text{)} = 80,3002 - 2,78314 \cdot \text{TPC} + 0,0127254 \cdot \text{TPC}^2 - 0,0000246043 \cdot \text{TPC}^3 + 16,1558 \cdot \sqrt{\text{TPC}}$	10,94	84,27	0,46
		Produtividade (dt.PMH ⁻¹)	$\log(\text{Prod (gt.PMH}^{-1}\text{)}) = 17,2567 - 0,0668911 \cdot \text{TPC} - 16,3757 \cdot 1/\text{TPC} + 2,83915 \cdot \sqrt{\text{TPC}} - 7,65423 \cdot (\log(\text{TPC}))$	1,17	97,69	0,50
	Teor de umidade	Produtividade (gt.PMH ⁻¹)	$\text{Prod (gt.PMH}^{-1}\text{)} = 1669,83 - 7928,45 \cdot \text{TU}^2 + 8670,46 \cdot \text{TU}^3 - 353,132 \cdot (1/\text{TU})$	14,35	11,81	0,08
		Produtividade (dt.PMH ⁻¹)	$\log(\text{Prod (gt.PMH}^{-1}\text{)}) = 21,9161 - 92,56 \cdot \text{TU}^2 + 99,9323 \cdot \text{TU}^3 - 3,89585 \cdot (1/\text{TU})$	1,22	27,98	0,17

Onde: Prod (gt.PMH⁻¹)= produtividade em tonelada verde; Prod (dt.PMH⁻¹)= produtividade em tonelada seca; TPC= tempo de estocagem da biomassa florestal; TU= teor de umidade da biomassa florestal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

APÊNDICE C – MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DO CAVAQUEADOR MÓVEL FLORESTAL.

Tambor	Variável independente	Variável dependente	Equação	Syx	F	R ² _{aj}
Martelos	Tempo de estocagem	Produtividade (gt.PMH ⁻¹)	Prod (gt.PMH ⁻¹)= 73,1667 + 0,306074*TPC - 0,00429539*TPC ² + 0,0000168816*TPC ³	9,61	74,29	0,46
		Produtividade (dt.PMH ⁻¹)	Prod (dt.PMH ⁻¹)= 44,1307 - 13,3922*(1/TPC)	5,63	78,43	0,23
	Teor de umidade	Produtividade (gt.PMH ⁻¹)	Prod (gt.PMH ⁻¹)= 112,917 + 40,4849*(log(TU))	10,58	52,51	0,17
		Produtividade (dt.PMH ⁻¹)	Prod (dt.PMH ⁻¹)= 49,5326 - 53,1521*TU ³	6,02	36,42	0,12
Facas	Tempo de estocagem	Produtividade (gt.PMH ⁻¹)	Prod (gt.PMH ⁻¹)= 85,6403 - 0,000301427*TPC ²	4,18	237,68	0,65
		Produtividade (dt.PMH ⁻¹)	Prod (dt.PMH ⁻¹)= 39,307 - 5,86844E-7* TPC ³ - 2,66506*(1/TPC)	2,03	104,61	0,61
	Teor de umidade	Produtividade (gt.PMH ⁻¹)	Prod (gt.PMH ⁻¹)= 179,323 - 53,4026*(1/TU)	6,84	7,57	0,05
		Produtividade (dt.PMH ⁻¹)	-	-	-	-

Onde: Prod (gt.PMH⁻¹)= produtividade em tonelada verde; Prod (dt.PMH⁻¹)= produtividade em tonelada seca; TPC= tempo de estocagem da biomassa florestal; TU= teor de umidade da biomassa florestal.

Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

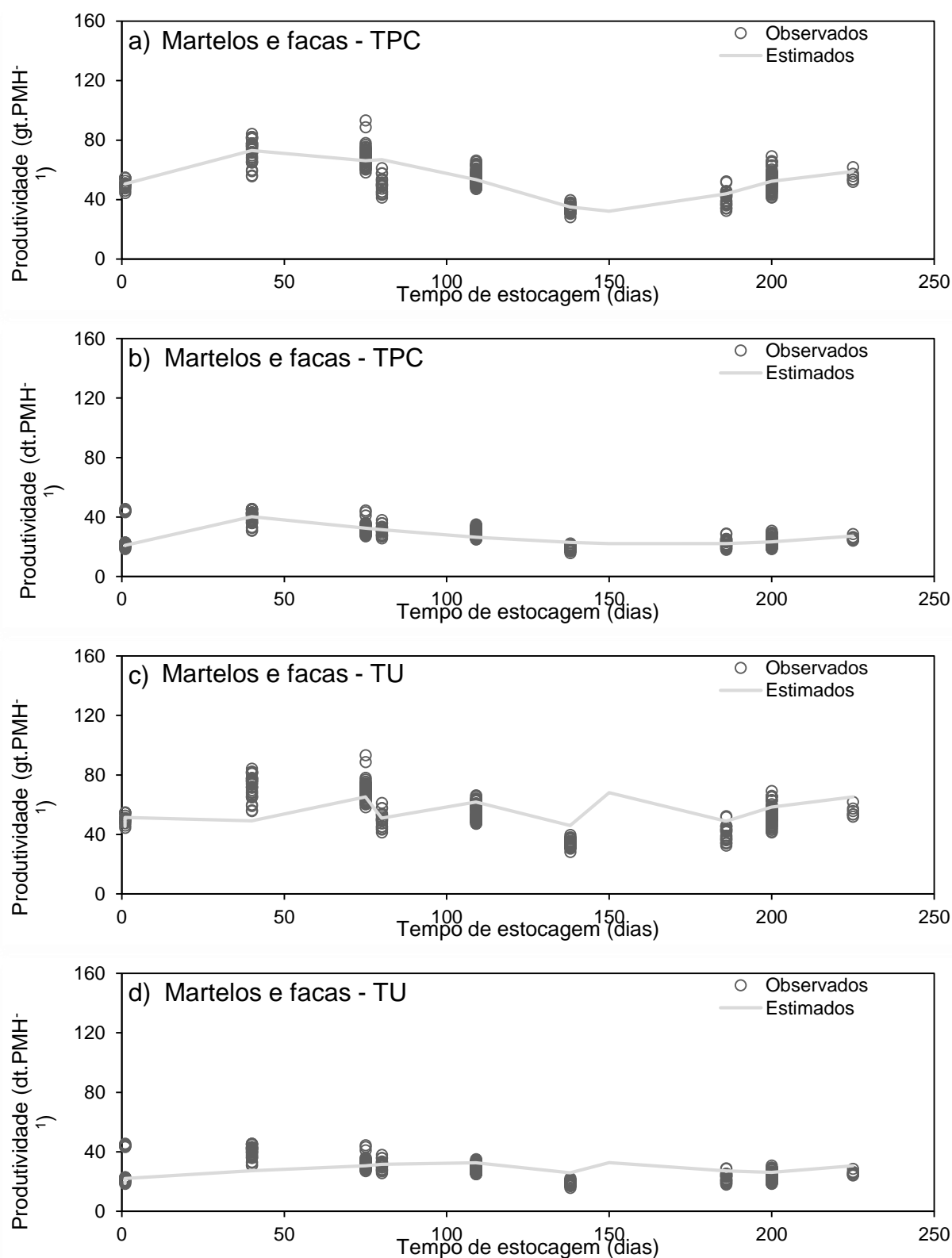
APÊNDICE D – MODELAGEM DA PRODUTIVIDADE DA ESCAVADEIRA CAVAQUEAMENTO.

Tambor	Variável independente	Variável dependente	Equação	Syx	f	R ² aj
Martelos	Tempo de estocagem	Produtividade (gt.PMH-1)	$\text{Prod (gt.PMH}^{-1}\text{)} = -518,338 + 0,0000234473 \cdot \text{TPC}^3 + 726,908 \cdot 1/\text{TPC} - 95,3682 \cdot \sqrt{\text{TPC}} + 333,575 \cdot \log(\text{TPC})$	10,44	189,57	0,75
		Produtividade (dt.PMH-1)	$\log(\text{Prod (dt.PMH}^{-1}\text{)}) = 322,829 - 10,9273 \cdot \text{TPC} + 0,0173883 \cdot \text{TPC}^2 - 0,0000208183 \cdot \text{TPC}^3 - 543,003 \cdot (1/\text{TPC}) + 234,936 \cdot \sqrt{\text{TPC}} - 374,166 \cdot (\log(\text{TPC}))$	0,10	193,96	0,82
	Teor de umidade	Produtividade (gt.PMH-1)	-	-	-	-
		Produtividade (dt.PMH-1)	$\log(\text{Prod (dt.PMH}^{-1}\text{)}) = 2,81303 + 0,504926 \cdot (1/\text{TU})$	1,23	91,43	0,26
	Facas	Produtividade (gt.PMH-1)	$\text{Prod (gt.PMH}^{-1}\text{)} = 79,7455 - 1,90638 \cdot (\log(\text{TPC}))$	4,48	47,48	0,26
		Produtividade (dt.PMH-1)	$\text{Prod (dt.PMH}^{-1}\text{)} = 35,1689 + 0,001241 \cdot \text{TPC}^2 - 0,00000474494 \cdot \text{TPC}^3 - 0,840452 \cdot \sqrt{\text{TPC}}$	1,76	29,22	0,39
	Teor de umidade	Produtividade (gt.PMH-1)	$\text{Prod (gt.PMH}^{-1}\text{)} = -5271,57 + 8076,89 \cdot \text{TU}^3 + 2197,75 \cdot (1/\text{TU})$	4,01	46,13	0,41
		Produtividade (dt.PMH-1)	-	-	-	-

Onde: Prod (gt.PMH⁻¹)= produtividade em tonelada verde; Prod (dt.PMH⁻¹)= produtividade em tonelada seca; TPC= tempo de estocagem da biomassa florestal; TU= teor de umidade da biomassa florestal.

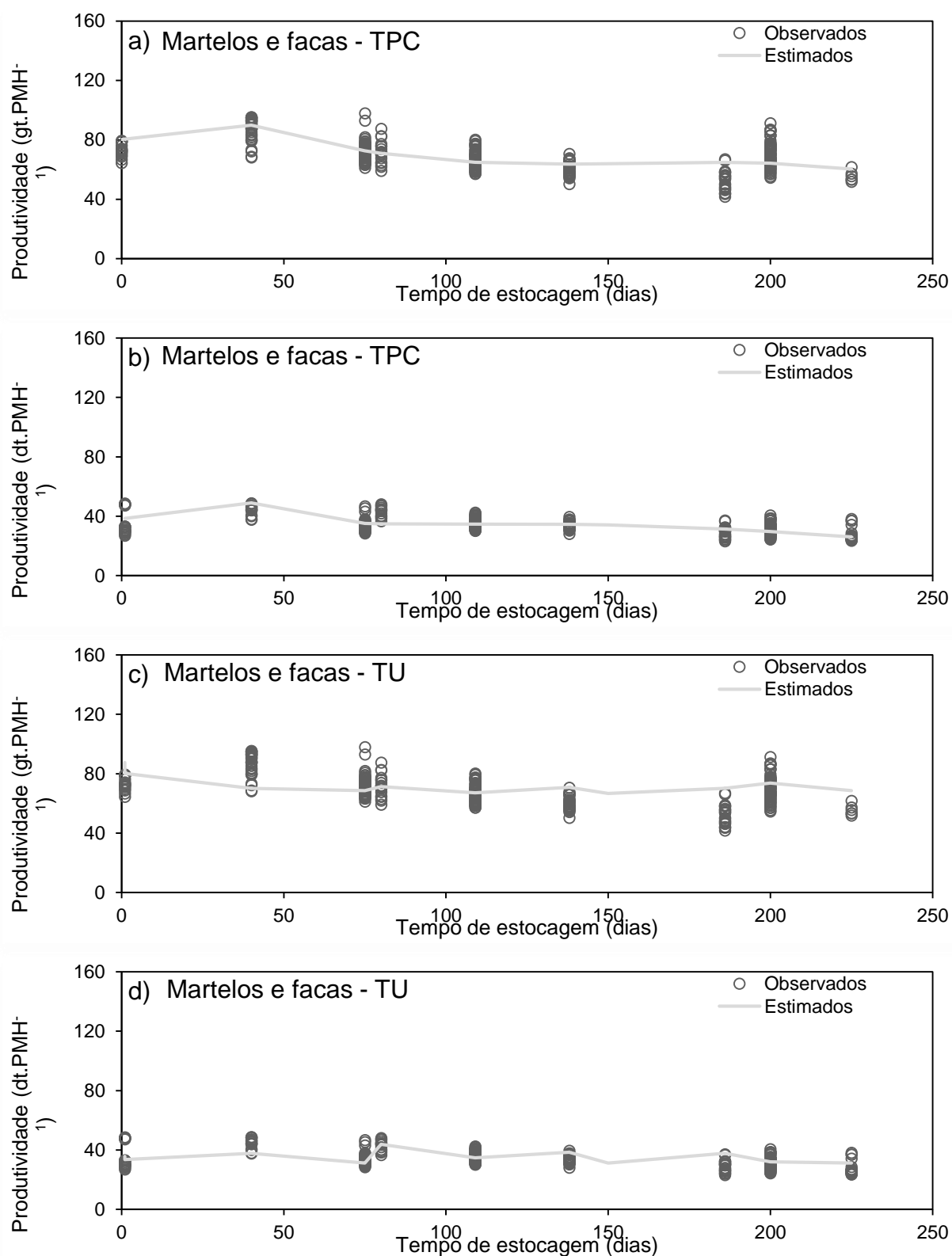
Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

APÊNDICE E – PRODUTIVIDADES OBSERVADAS E ESTIMADAS (gt.PMH^{-1} e dt.PMH^{-1}) DA ESCAFADEIRA ENLEIRAMENTO EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS TEMPO DE ESTOCAGEM E TEOR DE UMIDADE.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

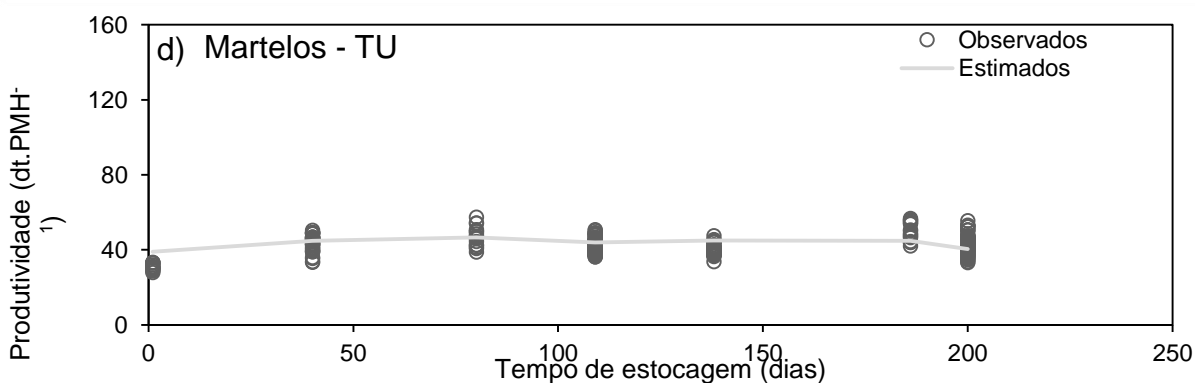
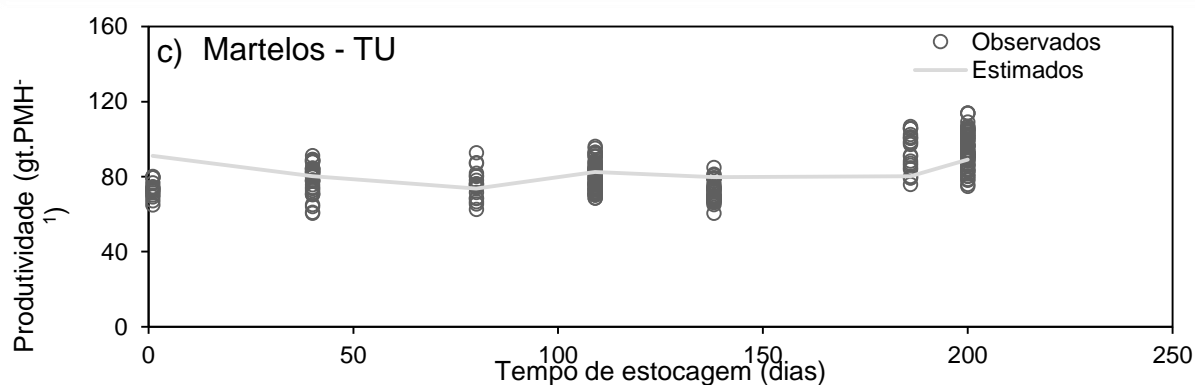
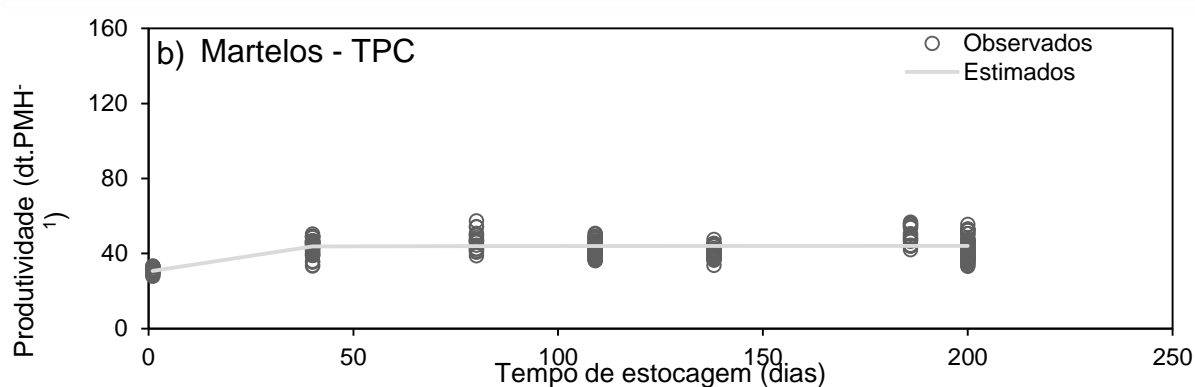
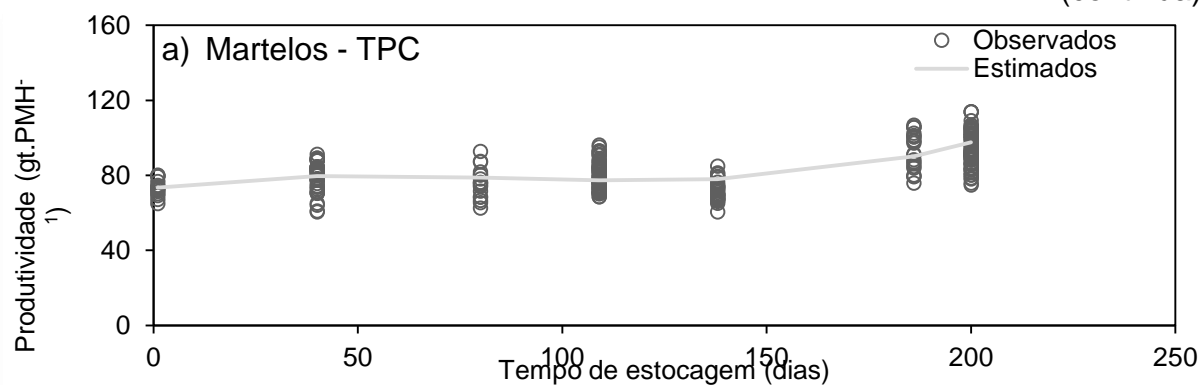
APÊNDICE F – PRODUTIVIDADES OBSERVADAS E ESTIMADAS (gt.PMH⁻¹ e dt.PMH⁻¹) DA PÁ CARREGADEIRA EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS TEMPO DE ESTOCAGEM E TEOR DE UMIDADE.



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

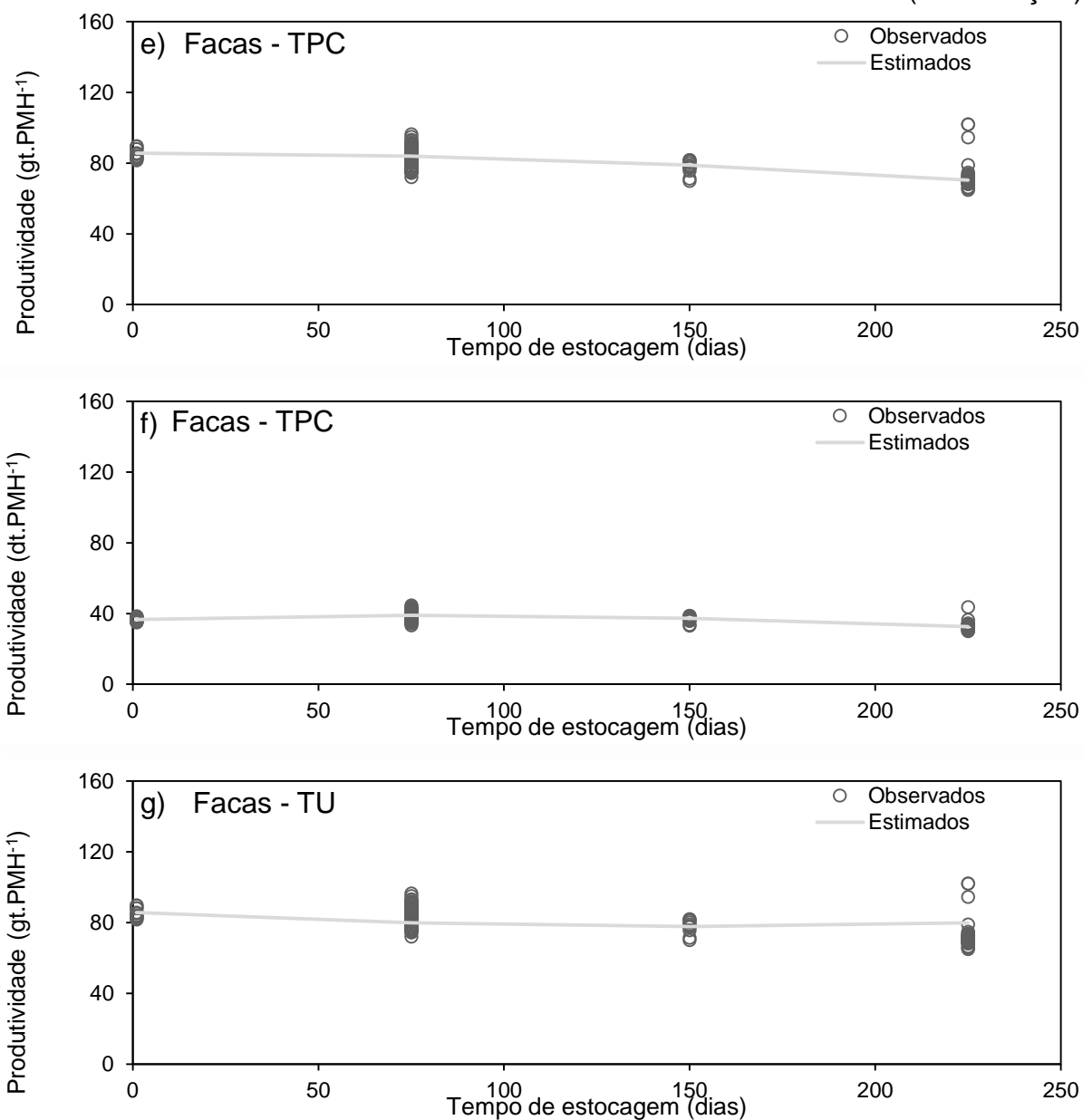
APÊNDICE G – PRODUTIVIDADES OBSERVADAS E ESTIMADAS (gt.PMH⁻¹ e dt.PMH⁻¹) DO CAVAQUEADOR MÓVEL FLORESTAL EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS TEMPO DE ESTOCAGEM E TEOR DE UMIDADE.

(continua)



APÊNDICE G – PRODUTIVIDADES OBSERVADAS E ESTIMADAS (gt.PMH⁻¹ e dt.PMH⁻¹) DO CAVAQUEADOR MÓVEL FLORESTAL EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS TEMPO DE ESTOCAGEM E TEOR DE UMIDADE.

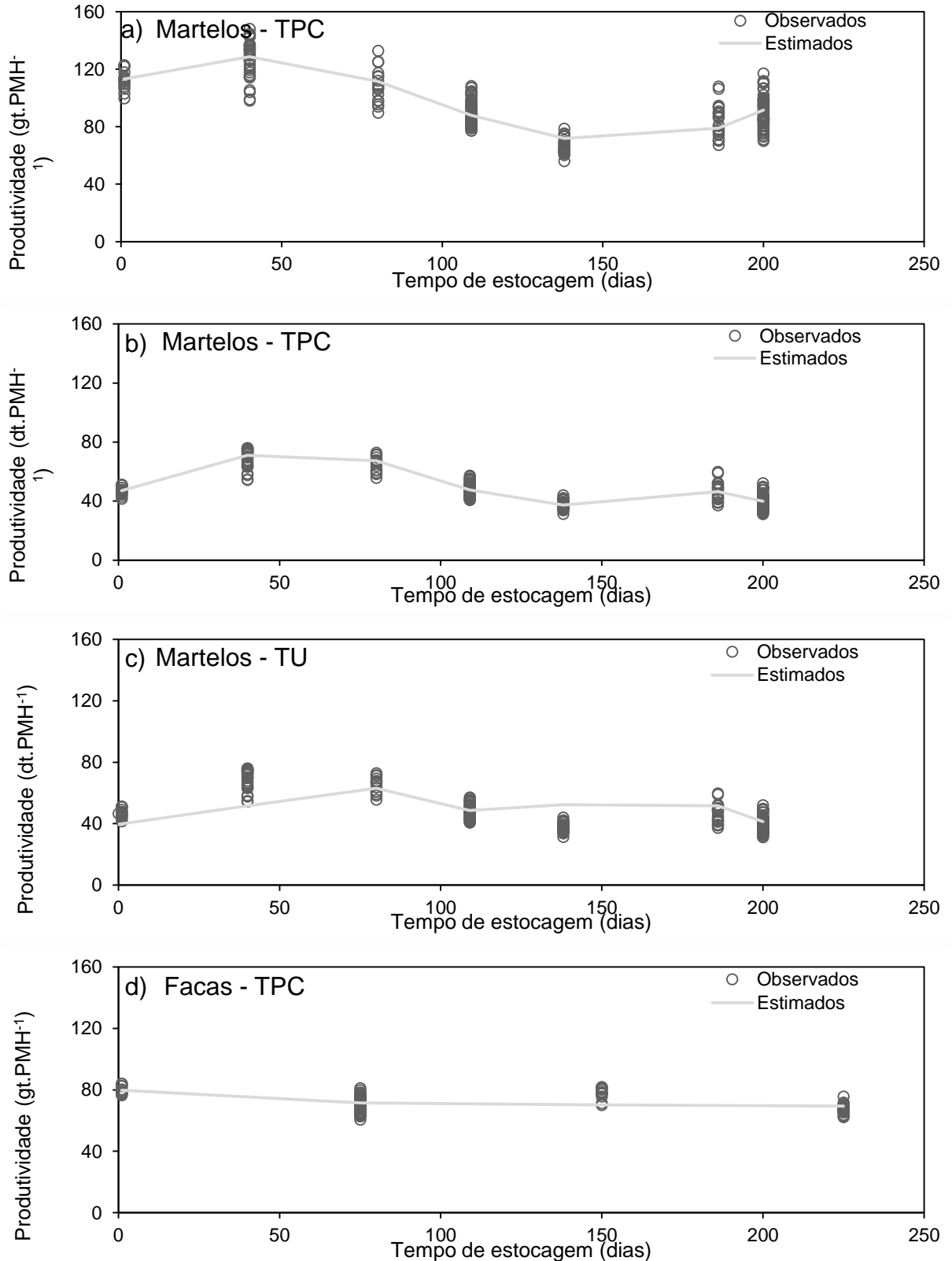
(continuação)



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).

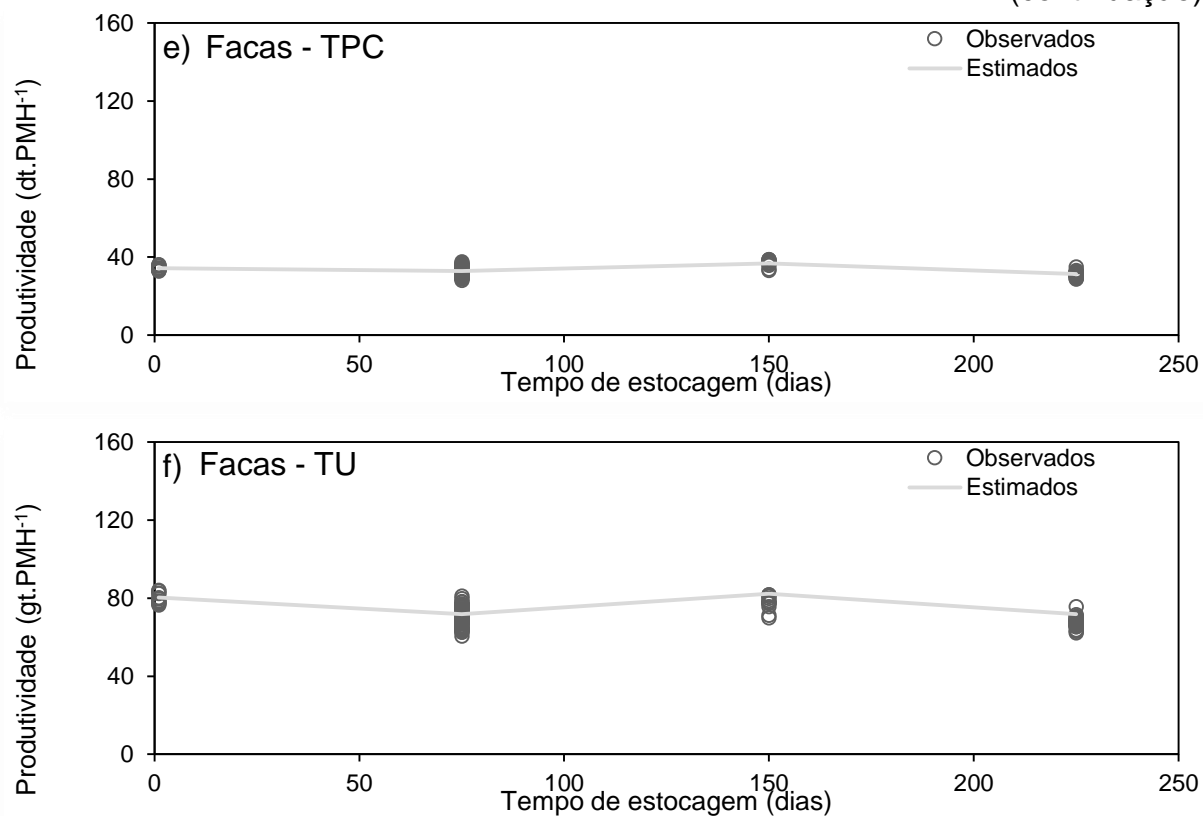
APÊNDICE H – PRODUTIVIDADES OBSERVADAS E ESTIMADAS (gt.PMH⁻¹ e dt.PMH⁻¹) DA ESCAVADEIRA CAVAQUEAMENTO EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS TEMPO DE ESTOCAGEM E TEOR DE UMIDADE.

(continua)



APÊNDICE H – PRODUTIVIDADES OBSERVADAS E ESTIMADAS (gt.PMH⁻¹ e dt.PMH⁻¹) DA ESCAVADEIRA CAVAQUEAMENTO EM FUNÇÃO DAS VARIÁVEIS TEMPO DE ESTOCAGEM E TEOR DE UMIDADE.

(continuação)



Fonte: Elaborada pelo autor (2021).