**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Viabilidade do aproveitamento de resíduos florestais

Bruno Oliveira de Almeida

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Recursos
Florestais. Opção em: Silvicultura e Manejo
Florestal

**Piracicaba
2016**

Bruno Oliveira de Almeida
Engenheiro Florestal

Viabilidade do aproveitamento de resíduos florestais

Orientador:
Prof. Dr. **MARCOS MILAN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Recursos
Florestais. Opção em: Silvicultura e Manejo
Florestal

**Piracicaba
2016**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Almeida, Bruno Oliveira de
Viabilidade do aproveitamento de resíduos florestais / Bruno Oliveira de Almeida. - -
Piracicaba, 2016.
96 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Resíduos florestais 2. Energia de biomassa 3. Sistemas mecanizados
4. Viabilidade econômica e energética I. Título

CDD 634.982
A447v

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

“Disciplina é a ponte que liga nossos sonhos às
nossas realizações”

Pat Tillman

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus pelo dom da vida e por permitir que tudo isso fosse possível.

Ao meu professor, orientador e amigo Marcos Milan, a quem tenho muito respeito e muita admiração por todos os ensinamentos, por todas as discussões ao longo do trabalho e pela confiança depositada em mim.

À minha esposa Tatiana Fernandes por todo apoio, companheirismo, incentivo e pela paciência nos momentos bons e ruins.

À minha família – Paulo, Lílian e Rafael – pelo exemplo e suporte, bem como pela cobrança nos estudos, no trabalho e em qualquer coisa que faço.

À minha segunda família – sogros Roberto e Teresa –, tios Ricardo, Suzy e Régis pelo apoio dado.

À empresa Suzano Papel e Celulose SA pelos testes realizados e pela ajuda na execução dessa empreitada, em especial ao Joaquim Lordelo e Lindenberg Perpetuo pela compreensão e pelo interesse nesses estudos. E também à Débora Romano minha “consultora acadêmica”.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Setor florestal	20
2.2 Cultivo mínimo, preparo de solo e a problemática silvicultural	23
2.3 Resíduos florestais	24
2.3.1 Ciclagem de nutrientes	25
2.3.2 Tocos de eucalipto	25
2.3.3 Características de resíduos para a geração de energia	27
2.4 Dimensionamento operacional e econômico de sistemas florestais	28
2.5 Análise de viabilidade econômica	30
2.6 Setor de energia	31
2.7 Fluxos de energia no sistema	34
3 MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1 Modelo	37
3.2 Análise Operacional	38
3.3 Planejamento para seleção	39
3.4 Plano de Seleção/Aquisição de Máquinas	40
3.4.1 Descrição das operações e equipamentos	41
3.4.2 Obtenção da capacidade de trabalho	46
3.4.3 Ensaio de tempo e movimento	48
3.5 Desempenho econômico	50
3.5.1 Custos fixos	50
3.5.2 Custos variáveis	51
3.5.3 Custos com mão de obra	52
3.5.4 Custos de Administração	52
3.5.5 Custo Total	53
3.5.6 Custo de Operação ou Produção	53

3.5.7 Análise de viabilidade econômica	54
3.6 Desempenho energético	55
3.6.1 Ferramentas de avaliação	56
3.6.2 Caracterização do material	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1 Ensaio de campo e desempenho operacional	59
4.1.1 Destoca.....	61
4.1.1.1 Resultados do Estudo de Tempos e Movimentos.....	62
4.1.2 Baldeio de tocos	63
4.1.3 Processamento dos tocos.....	65
4.1.4 Transporte de cavacos dos tocos	66
4.2 Cenário base	67
4.2.1 Desempenho econômico	68
4.2.1.1 Análise geral do desempenho econômico	70
4.2.1.2 Viabilidade econômica	71
4.2.2 Desempenho energético.....	73
4.2.2.1 Fluxos de energia do sistema (energia de entrada).....	73
4.2.2.2 Caracterização do material (energia de saída)	74
4.2.2.3 Balanço energético do sistema.....	75
4.3 Análise de sensibilidade	77
5 CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS	83
ANEXOS.....	89

RESUMO

Viabilidade do aproveitamento de resíduos florestais

O setor florestal apresenta impacto na economia do Brasil, com valores significativos no PIB, em exportações e geração de empregos. O país possui cerca de 7,74 milhões de hectares de florestas plantadas, o que corresponde a apenas 0,9% do território nacional. Os plantios podem ser realizados em áreas novas ou em áreas que já possuíam eucalipto no ciclo anterior. Neste caso, os tocos remanescentes representam um problema, dificultando o tráfego homogêneo de máquinas e influenciando na qualidade das operações florestais. O aproveitamento dos resíduos, por meio da retirada dos tocos remanescentes, pode contribuir para minimizar esses problemas, trazendo benefícios econômicos e energéticos. Com isso, o objetivo deste trabalho consistiu em analisar a viabilidade operacional, econômica e energética de um sistema mecanizado florestal para o aproveitamento de resíduos florestais (toco). Para tanto, um modelo, em planilha eletrônica, foi desenvolvido. Os dados referentes à capacidade de trabalho dos equipamentos envolvidos foram obtidos por meio de um estudo de tempos e movimentos das operações mecanizadas de destoca, baldeio, processamento e transporte. O modelo foi empregado para avaliação de cenários e identificar variáveis críticas. Os resultados evidenciaram que o sistema mecanizado empregado para a destoca e retirada dos resíduos, tocos e raízes, é viável operacional e economicamente e tem um desempenho energético favorável. As restrições do uso desse sistema referem-se à área mínima e a distância de transporte, e que as variações na produtividade, no preço de venda da biomassa e na capacidade de campo operacional impactam sensivelmente na viabilidade econômica do projeto.

Palavras-chave: Resíduos florestais; Energia de biomassa; Sistemas mecanizados; Viabilidade econômica e energética

ABSTRACT

Viability of the use of forest waste

The forest sector plays an important role in Brazil's economy, with significant share in the GDP, exports and job creation. Brazil has about 7.74 million ha of planted forests, accounting for only 0.9% of the national territory. Plantations may occur in new areas or in areas that already had a previous eucalypt cycle. In this case, the remaining stumps represent a problem hindering the smooth traffic of machinery and affecting forest operations. The use of waste by removing the remaining stumps can help to minimize these problems, bringing economic and energy benefits. Therefore, the aim of this study was to examine the operational, economic and energy viability of a mechanized-harvest forest system for the use of forest waste (stumps). To this end, a model was developed in spreadsheet. The data related to the work capacity of the equipment involved were obtained by means of a time and motion study of mechanized operations of stumps removal, carrying, processing and transportation. The model was used to evaluate scenarios and identify critical variables. The results showed that the mechanized system used for stumps removal, stumps and roots, is operationally and economically viable and has a favorable energy performance. Restrictions of using this system refers to the minimum area and distance of transport. In addition, variations in productivity, selling price of biomass and field operational capacity significantly affect the economic viability of the project.

Keywords: Forest waste; Biomass energy; Mechanized systems; Energy and economic viability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da área de árvores plantadas.	20
Figura 2 – Distribuição das árvores plantadas por Estado.	21
Figura 3 – Distribuição de área de plantios florestais com <i>Eucalyptus</i> das associadas individuais da ABRAF por segmento individual.	22
Figura 4 – <i>Benchmarking</i> mundial de custo de produção de madeira de processo. .	22
Figura 5 - Distribuição da matriz energética brasileira.	31
Figura 6 – Distribuição de usinas termelétricas a base de biomassa no Brasil.	32
Figura 7 – Área plantada das principais culturas energéticas no Brasil.	33
Figura 8 – Matriz energética da indústria de Celulose e Papel de 1970 a 2010.	34
Figura 9 – Fluxograma para dimensionamento operacional e econômico de sistema mecanizado florestal.	37
Figura 10 – Processo de colheita e processamento das operações.	38
Figura 11 – Análise operacional do sistema mecanizado de destoca florestal.	39
Figura 12 – Área de testes na Fazenda Sinimbu, talhão 56I051.	41
Figura 13 – <i>Stump shear</i>	42
Figura 14 – Dimensões da escavadora hidráulica CAT 336D.	42
Figura 15A e B – Enleiramento dos tocos na operação de destoca.	43
Figura 16 – Garra florestal.	44
Figura 17 – Dimensões da escavadora hidráulica CAT 320D.	44
Figura 18 – Caminhão basculante.	45
Figura 19 – Detalhe do picador Vermeer HG 6000TX.	46
Figura 20 – Exemplo de formulário utilizado em campo para coleta dos dados.	48
Figura 21 – Modelo de formulário utilizado para coleta de dados.	49
Figura 22 – Diagrama de energia de um sistema de destoca florestal.	55
Figura 23 – Formulário de um ensaio preenchido na operação de destoca.	59
Figura 24 – Média e desvio padrão dos tempos de cada operação.	60
Figura 25 – Registros fotográficos da operação de colheita de tocos (destoca).	62
Figura 26 – Distribuição da frequência de cada momento da atividade de destoca.	63
Figura 27 – Ilustração do mapa da pilha de tocos nas 3 faces do talhão.	64
Figura 28 – Registros fotográficos da operação de baldeio de tocos.	65
Figura 29 – Registros fotográficos da operação de processamento de tocos.	66

Figura 30 – Exemplo de entrada de dados e obtenção de resultados na planilha desenvolvida.....	67
Figura 31 – Custo do frete variando de acordo com a distância.....	69
Figura 32 – Impacto de cada operação na composição dos custos.	70
Figura 33 – Variação do custo final de biomassa com distância de frete.	72
Figura 34 – Comportamento da viabilidade financeira de acordo com as variações dos parâmetros.	77
Figura 35 – Ordem dos parâmetros que mais impactam a viabilidade do projeto. ...	78
Figura 36 – Variação do balanço energético de acordo com variação nos parâmetros.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações da escavadora hidráulica CAT 336D de acordo com opções de lanças/braços.	43
Tabela 2 – Especificações da escavadora hidráulica CAT 320D de acordo com opções de lanças/braços.	45
Tabela 3 – Classificação e descrição dos momentos da atividade de destoca.	49
Tabela 4 – Resumo geral dos valores considerados para cada operação.	53
Tabela 5 – Índice energético considerado para cada insumo.	57
Tabela 6 – Valores de entrada considerados para cálculo do maquinário.	57
Tabela 7 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos tempos de cada operação.	60
Tabela 8 – Resultados do desempenho operacional de cada operação.	61
Tabela 9 – Resultados do desempenho econômico das operações.	68
Tabela 10 – Análise da variação da área e produtividade no custo.	70
Tabela 11 – Resumo da capacidade de campo e custo de cada operação.	71
Tabela 12 – Indicadores econômicos do projeto.	72
Tabela 13 – VPL (em milhões de R\$) em função da variação da área trabalhada e da distância de transporte.	73
Tabela 14 – Detalhe da CCO e consumos de cada operação.	74
Tabela 15 – Fluxo de material na produção de cavacos de tocos de eucalipto.	74
Tabela 16 – Resultado da análise laboratorial do cavaco de tocos de eucalipto.	75
Tabela 17 – Análise de energia do sistema de produção de destoca florestal.	75
Tabela 18 – Indicadores de eficiência energética do sistema.	76

1 INTRODUÇÃO

O setor florestal do Brasil possui ainda um grande potencial a ser explorado devido a sua grande extensão de áreas, condições edafoclimáticas favoráveis para o desenvolvimento de florestas plantadas, tecnologia silvicultural avançada e materiais genéticos adaptados e com rápido crescimento.

O fornecimento de matéria prima para atender o setor florestal origina-se de florestas plantadas e, em sua maioria, plantios de *Eucalyptus spp.* O setor apresentou em 2014 receita bruta de R\$ 60 bilhões (5,5% do PIB Industrial), exportações de U\$ 8,4 bilhões (3,8% das exportações do País), gerando cerca de 4,2 milhões de empregos diretos, indiretos e resultados do efeito renda da atividade florestal e contará ainda com investimentos na ordem de R\$ 53 bilhões até 2020 (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2015). A maior parte dos plantios no Brasil são utilizados nos segmentos de papel e celulose e de siderurgia, concentrando mais de 90% de toda área plantada.

Os plantios podem ser realizados em áreas novas (implantação) ou em áreas que já possuíam eucalipto no ciclo anterior, podendo-se definir pela condução dos brotos emitidos nas cepas (tocos) recém-cortadas, ou a reforma geral da área, plantando-se um novo ciclo.

Dentre as três opções citadas – implantação, condução e reforma – a reforma da área abrange aproximadamente metade dos casos e os tocos remanescentes do ciclo anterior representam um problema, uma vez que dificultam o tráfego homogêneo de máquinas florestais e causam grandes variações de qualidade operacional, principalmente no espaçamento das linhas de plantio e na aplicação da adubação de base.

A irregularidade causada pelos tocos remanescentes também prejudica o combate às plantas invasoras. Durante a aplicação mecanizada de herbicidas, a irregularidade causa variações na altura da barra do pulverizador ocasionando uma aplicação desuniforme. Destacam-se também as avarias mecânicas que decorrem dos impactos diretos e laterais entre os equipamentos e os tocos, acelerando drasticamente a depreciação mecânica, além de causar danos diretos aos conjuntos rodantes.

Outro grande problema oriundo da presença dos tocos é a diminuição significativa da capacidade de campo operacional das atividades subsequentes, assim como a própria impossibilidade de realizar algumas atividades mecanizáveis.

Os tocos podem ser classificados como um resíduo florestal e, assim como outras partes da planta, possuem características que permitem a sua utilização como fonte alternativa de energia. O plantio de florestas para geração de energia, ou mesmo o aproveitamento de resíduos florestais gerados em plantios para outras finalidades, tem sido cada vez mais comum, com o objetivo de otimizar a geração de receita.

O aproveitamento dos resíduos, por meio da retirada dos tocos remanescentes, pode contribuir para minimizar os problemas referentes à restrição do uso da área em termos do uso das máquinas e da qualidade, trazendo benefícios econômicos e energéticos. Com isso, o objetivo deste trabalho consiste em analisar a viabilidade operacional, econômica e energética de um sistema mecanizado para o aproveitamento de tocos (resíduos florestais).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Brasil possui cerca de 7,74 milhões de hectares de florestas plantadas, o que corresponde a apenas 0,9% do território nacional. Destes quase 8 milhões de florestas 91% da madeira é produzida para fins industriais, enquanto os demais 9% são oriundos de florestas nativas legalmente manejadas. Em 2014, o Produto Interno Bruto (PIB) do setor brasileiro de árvores plantadas cresceu 1,7%, número este que foi baixo quando comparado com o crescimento histórico do setor nos últimos anos (3,8% a.a.), porém excelente resultado (17 vezes maior) quando comparado ao crescimento do PIB brasileiro, que foi de 0,1% (IBÁ, 2015).

Estas florestas plantadas são responsáveis por diversos produtos, tais como: celulose, papel, painéis de madeira, pisos laminados, painéis compensados, móveis, carvão vegetal e outras biomassas para fins energéticos. Os plantios de árvores, além das funções produtivas, também possuem importante papel no quesito ambiental, evitando o desmatamento de habitats naturais, preservando solo e nascentes de rios, recuperando áreas degradadas e reduzindo as emissões de gases do efeito estufa (IBÁ, 2015).

O Brasil se destaca no cenário mundial graças a seus níveis de produtividade cerca de 10 vezes superior quando comparado com países de clima temperado, atingindo valores de 40 a 50 metros cúbicos (m³) de madeira por hectare ao ano (OLIVEIRA JUNIOR; SEIXAS, 2006).

Estima-se que no ano de 2030, o consumo de madeira em toras para indústrias deverá ser de 2,44 bilhões de m³, enquanto que a estimativa de produção das florestas gira em torno de 1,9 bilhão de m³, o que representará de 75 a 80% da demanda por madeira industrial (GARLIPP; FOELKEL, 2009).

Ainda assim, parte da floresta, considerada como resíduos florestais, é descartada no campo, estima-se que cerca de 33% da massa de uma árvore é deixada na floresta por ocasião da colheita (FAO, 1990). Estes resíduos florestais constituem uma potencial fonte de geração de energia e podem atrapalhar, se deixados no campo, as atividades silviculturais, ou ajudar financeiramente se levados do campo e comercializados (CANTO, 2009).

Segundo Goldemberg (1998), o consumo de energia no mundo cresce em ritmo de 2% ao ano e, se as tendências atuais de mantiverem, deverá dobrar em 30 anos. O principal entrave para maior utilização das energias renováveis é de ordem econômica e um dos principais fatores que impactam na utilização de biomassa

como insumo energético não depende da técnica empregada em si, mas do custo da colheita e transporte do material.

2.1 Setor florestal

Em 2014, a área brasileira de plantios para fins industriais totalizou 7,74 milhões de hectares, um crescimento de 1,8% em relação ao indicador de 2013 (Figura 1). Os plantios de *Eucalyptus* ocupam 5,56 milhões de hectares e representa 71,9% do total, principalmente nos Estados de Minas Gerais (25,2%), São Paulo (17,6%) e Mato Grosso do Sul (14,5%). Os plantios de *Pinus* ocupam 1,59 milhão de hectares e representa 20,5% do total, concentrados no Paraná (42,4%) e Santa Catarina (34,1%), conforme Figura 2. Os outros 7,6% são constituídos de outras espécies florestais, como *Acacia mangium*, *Tectona grandis*, *Hevea brasiliensis* e *Shizolobium amazonicum* (IBÁ, 2015).

Figura 1 – Evolução da área de árvores plantadas
Fonte: IBÁ e Pöyry (2014)

Quanto à distribuição geográfica da área plantada por gênero, o *Pinus* predomina nos estados do Sul e o *Eucalyptus* nas demais regiões, com destaque para os Estados de Minas Gerais e São Paulo, os quais possuem a maiores áreas plantadas, 1,4 e 1,2 milhão de hectares respectivamente (Figura 2).

Figura 2 – Distribuição das árvores plantadas por Estado
Fonte: IBÁ e Pöyry (2014)

Segundo relatório anual de 2013 da ABRAF (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS), quanto à distribuição da área total plantada de *Eucalyptus* por segmento industrial, destacam-se as participações dos segmentos de papel e celulose, e siderurgia a carvão vegetal (Figura 3). O segmento de papel e celulose concentra 72,5% da área plantada, seguido pelos segmentos de siderurgia a carvão vegetal (19,5%), painéis de madeira industrializada (7,3%) e produtores independentes (0,7%).

Figura 3 – Distribuição de área de plantios florestais com *Eucalyptus* das associadas individuais da ABRAF por segmento individual
 Fonte: Associadas individuais da ABRAF (2013)

Ainda segundo anuário da ABRAF (2013), no início desta década, o Brasil ostentava o *status* internacional de país com o menor custo de produção de madeira de processo. No entanto, após doze anos, o Brasil já perdeu quatro posições. É mais caro produzir madeira para a indústria de celulose no Brasil do que na Rússia, Indonésia e Estados Unidos (Figura 4).

Figura 4 – *Benchmarking* mundial de custo de produção de madeira de processo
 Fonte: ABRAF 2013 apud IPEA e Pöyry (2012)

2.2 Cultivo mínimo, preparo de solo e a problemática silvicultural

As primeiras práticas silviculturais (até o final da década de 1970) para manejo de resíduos vegetais e o preparo de solo para composição de uma floresta seguia sempre um padrão agrônomo, onde era usual realizar o enleiramento e/ou queima de resíduos e também o revolvimento intenso da camada superficial do solo, por meio de implementos como arado e grade. Sem avaliar previamente as condições edafoclimáticas e material genético a ser implantado, adotava-se uma única recomendação para as plantações florestais (GONÇAVES, 2009).

Ao final da década de 1990, diante das preocupações com a preservação dos recursos naturais, uso de herbicidas e degradação dos solos, proibiu-se em São Paulo, a queima de resíduos vegetais, o que acarretou no aceleração da adoção do sistema de cultivo mínimo, o qual consiste na manutenção dos resíduos vegetais (serapilheira e resíduos da colheita) sobre o solo e realização do preparo localizado do solo nas linhas ou nas covas de plantio (GONÇALVES, 2009; GONÇALVES; STAPE, 2002).

Durante o período de consolidação da nova técnica, houve algumas dificuldades associadas às concepções antigas, alegando-se que o sistema de cultivo mínimo causava desequilíbrio nutricional das plantas, crescimento irregular, favorecia a propagação de “ferrugem” foliar e dificultava controle das formigas saúva e quenquém. Gonçalves (2004), adotando a técnica do cultivo mínimo, observou a recuperação da qualidade do solo, conservando seus atributos estruturais e funcionais dentro de limites normais e em equilíbrios dinâmicos em longo prazo.

Gava (2002) estudando implantação de florestas a partir do cultivo mínimo constatou inúmeras vantagens técnicas, econômicas e ecológicas, destacando: redução da erosão do solo e reinfestação de plantas invasoras, maior controle das atividades e redução dos impactos causados aos organismos do solo.

Segundo Zen et al. (1995) a adoção do sistema de cultivo mínimo em escala comercial começou em 1989 em plantações de eucalipto da Suzano Papel e Celulose na região de Itatinga/SP. Gonçalves (2009) estimou que até o ano de 2009 mais de 85% das plantações sejam desenvolvidas nesse sistema.

Para execução das atividades de preparo de solo os principais implementos utilizados são o subsolador e o coveador mecânico, que é mais utilizado em áreas declivosas ou em áreas de replantio com presença de tocos muito grossos, onde o subsolador não consegue operar (GONÇALVES, 2009).

Para a reforma de uma floresta, muitas vezes opta-se pelo plantio de novas linhas nas entrelinhas da floresta anterior, evitando o encontro com os tocos do ciclo anterior. Após vários ciclos e associado a uma lenta decomposição dos tocos exigirá a tomada de medidas drásticas como o rebaixamento ou arranquio destes tocos (FOELKEL, 2014).

Tocos altos deixados pela colheita causam grandes problemas operacionais durante a execução da reforma da área, além de significar perda de madeira do tronco. Segundo Foelkel (2014), tocos com 5 a 10 cm de altura representam uma perda entre 0,4 a 0,7% do volume útil e comercial do tronco e, acima de 15 cm de altura, pode-se perder até 2% do mesmo volume.

Ainda segundo Foelkel (2014), existem diversas ações para se minimizar ou tentar resolver o problema dos tocos, tais como: abate das árvores com altura mais baixa possível; rebaixamento dos tocos; destocamento do terreno. Atualmente a operação de rebaixamento de tocos é a opção mais comumente utilizada e pode ser feita das seguintes formas: uso de motosserra, cilindros raladores dentados, fresadores, rolos-facas, discos dentados ou serrilhados, tesouras hidráulicas e lâminas afiadas tipo Rome KG.

2.3 Resíduos florestais

Os resíduos florestais podem ser caracterizados como aqueles gerados e deixados na floresta devido às atividades da colheita de madeira. Este conceito engloba todo o material resultante da exploração da madeira e que permanecem sem utilização definida. Como resíduos florestais são considerados os seguintes materiais: casca, galhos, copas, árvores com diâmetro inferior ao mínimo comercial, árvores doentes, mortas, tocos e raízes (SOUZA, 2010).

É possível realizar o aproveitamento dos resíduos (biomassa residual) gerados na floresta e esta quantidade pode atingir cerca de 35% do volume de madeira considerado para fins industriais e em torno de 5% do volume para fins energéticos (MAGOSSÍ, 2007).

A biomassa pode ser definida como um recurso natural renovável e pode ser utilizada na produção de energia devido suas características, podendo ser aproveitada por meio da queima da madeira, produção de carvão ou aproveitamento de resíduos de exploração, óleos e extrativos (COUTO, 2000). As vantagens em relação a outras fontes, como por exemplo os combustíveis fósseis, envolvem o

baixo custo, o menor potencial de gerar poluição, ser renovável e o fato de permitir o reaproveitamento de resíduos que provavelmente não seriam utilizados (CASSELLI, 2013).

Rummer e Seixas (2007) estudando colheita de resíduos florestais nos EUA concluíram que a biomassa florestal resultante da atividade de colheita é a matéria prima de custo mais acessível para a produção de energia, sendo unicamente calculada pelo custo da produção e transporte de cavacos.

Gonçalves e Stape (2002) destacam que o aproveitamento de resíduos da colheita pode ser uma boa solução para geração de energia, entretanto pode representar um problema no processo de ciclagem de nutrientes, devido a extração de resíduos como galhos finos, folhas e cascas.

2.3.1 Ciclagem de nutrientes

A ciclagem de nutrientes é importante no equilíbrio ecológico e por isso tem sido motivo de pesquisas não só no Brasil como no exterior (GRAÇA; CAMPOS, 1986). Os plantios de monoculturas, como do *Eucalyptus* e *Pinus*, são cada vez mais estudados analisando-se os impactos em relação a exportação de nutrientes decorrentes de diversos espaçamentos e idades (HAGG, 1985). Segundo Poggiani (1985), o principal objetivo destes trabalhos tem sido mensurar a reciclagem de nutrientes nas diversas espécies.

Entretanto a bibliografia referente à avaliação das perdas e ganhos dessa reciclagem é bastante escassa, principalmente estudos referentes à extração destes resíduos da área para um aproveitamento energético, impedindo a reciclagem completa dos nutrientes e impactando na queda da produtividade dos sítios florestais (GRAÇA; CAMPOS, 1986).

2.3.2 Tocos de eucalipto

Há algum tempo as raízes não eram consideradas como material a ser aproveitado, devido ao manejo por talhadia (condução da brotação após o corte) utilizada nas florestas (HAKKILA, 1972; HAKKILA, 1989). Atualmente esta técnica não é amplamente utilizada e, como os ciclos de corte estão cada vez menores e as florestas cada vez mais produtivas, a biomassa referente às raízes representa um grande volume de material que pode ser retirado da floresta.

O crescimento e a pressão pelo uso cada vez maior de fonte renováveis de energia representará contínua concorrência para a madeira, principalmente aos setores de painéis de madeira e celulose. Uma das metas é aumentar a conscientização dos proprietários e produtores de energia para o potencial da biomassa florestal como recurso econômico, diversificado e renovável, com destaque para a utilização de tocos de árvores (CASSELLI, 2013).

Atualmente no Brasil, os tocos de árvores não são utilizados comumente como fonte de energia renovável e ainda são considerados como problemas para grandes empresas quanto para pequenos proprietários (FOELKEL, 2014). As grandes empresas usufruem da terra de forma constante com o plantio seguido de vários ciclos. Pequenos produtores analisam antes de formar uma floresta, já que após o corte do primeiro ciclo ainda terão a presença dos tocos, impedindo a utilização da terra para outros usos como o plantio de culturas agrícolas (LOCONTE et al., 2010).

Loconte et al. (2010) estudando sobre o *Eucalyptus grandis*, constataram que a área ocupada por cada toco é de aproximadamente 258 cm², considerando um DAP (diâmetro à altura do peito) médio aos 7 anos de 18,1 cm e 1.500 árvores por hectare, a área ocupada pelos tocos é de cerca de 38,7 m² por hectare, podendo ser considerada perdida dependendo do uso da terra.

Os métodos de extração dos tocos ainda estão em evolução, sendo a prática mais comum o uso de escavadoras sobre esteiras equipadas com ferramentas que removem e quebram os tocos, que são deixados dentro do talhão por cerca de 1 a 3 meses, até serem removidos para a beira da estrada, onde podem permanecer por mais 3 a 12 meses antes de serem transportados para o consumo ou picados no próprio campo. Esta prática é adotada para reduzir umidade e quantidade de solo aderido aos tocos (FOREST RESEARCH, 2009; CASSELLI, 2013).

Karjalainen et al. (2004) estimaram, para a Europa, um potencial de fonte de biomassa de 9 milhões de m³ de cavacos de tocos produzidos todo ano, sendo que um hectare pode produzir um adicional de 100 m³ de lenha, equivalente a 100 MW.

Para uma operação segura, evitando possíveis danos ao ambiente florestal e de forma que os tocos possam ser colhidos de forma sustentável, a Comissão Florestal do Reino Unido desenvolveu uma metodologia para selecionar os locais onde esta operação pode ser realizada. Para esta avaliação vários fatores

relacionados ao solo são avaliados, como: danos, fertilidade, acidificação e perdas de carbono (CASSELLI, 2013).

Recentemente no Brasil, com a crescente valorização da biomassa como fonte de energia renovável, diversas empresas vêm estudando sistemas de extração e processamento dos tocos e suas raízes para comercialização como biocombustível. Ainda existem questionamentos quanto à sustentabilidade dessas operações e da sua viabilidade econômica, quando analisados os custos de arranquio, limpeza dos tocos, cavaqueamento e transporte do material. Uma das vantagens dessa prática está na oportunidade de eliminar a atividade de rebaixamento de tocos (FOELKEL, 2014).

2.3.3 Características de resíduos para a geração de energia

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 em resíduos que serão destinados ao uso energético (SOUZA, 2010).

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

Segundo Cunha et al. (1989) quanto maior o conteúdo de umidade da madeira, menor é o seu poder de combustão, devido ao processo de evaporação da umidade, o qual absorve energia em combustão.

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

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

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

O poder calorífico de um material é também definido como a quantidade de calor liberado durante a combustão da unidade de massa ou de volume e pode ser descrito como poder calorífico inferior ou superior. O poder calorífico superior se refere à quantidade de calor liberado considerando a condensação do vapor de água e arrefecimento dos produtos da combustão até 25°C. Já no poder calorífico inferior é contabilizado o calor de condensação da água formada pela combustão do hidrogênio do combustível (VLASSOV, 2001).

Silva (2001) ressalta que para cálculos térmicos é recomendado utilizar o poder calorífico inferior, pois já representa a quantidade de calor útil que o material irá disponibilizar no processo.

O poder calorífico da madeira pode variar em torno de 3.000 kcal kg⁻¹ até 5.400 kcal kg⁻¹, sendo que Couto et al. (2008) relatam poder calorífico superior de espécies de eucalipto situadas entre 4.312 a 5.085 kcal kg⁻¹.

Rogero (2011) estudando o poder calorífico superior de cavacos de madeira de *Eucalyptus urograndis* encontrou valores médios em torno de 4.684 kcal kg⁻¹ mostrando que a espécie é apta para ser usada em fins energéticos.

2.4 Dimensionamento operacional e econômico de sistemas florestais

O conhecimento do desempenho de máquinas florestais é importante para uma tomada de decisão pelas empresas visando sempre a otimização das operações (SILVA et al., 2007). O dimensionamento das máquinas necessárias para a atividade de mecanização é uma importante ferramenta para executar o trabalho e depende do conhecimento do comportamento da produtividade sob diferentes condições de operação (MALINOVSKI; MALINOVSKI, 1998).

Para auxiliar o dimensionamento operacional e econômico de um sistema pode ser realizado um estudo de tempos e movimentos do trabalho, o qual consiste em medir o tempo total e os tempos parciais de ação para realizar determinada tarefa, sendo possível assim entender quais os fatores exercem influência na atividade que está sendo desenvolvida (BARNES, 1977).

O estudo de tempos e movimentos é uma importante ferramenta para tomada de decisões com relação ao planejamento e execução do trabalho, independentemente do grau de mecanização da atividade. Permitindo também que se faça correções, alterações ou melhorias no processo de produção (BARNES, 1977).

Inicialmente, as aplicações do estudo de tempos eram utilizadas somente na mão-de-obra direta nas fábricas, porém, seus princípios são universais, podendo ser empregados sempre. Diversas formas podem ser usadas para medir o trabalho, como padrões de tempos sintéticos e amostragem do trabalho, mas a cronometragem direta é o método mais empregado (MACHADO, 1984).

O método de *tempo contínuo* caracteriza-se pela medição do tempo sem detenção do cronômetro, isto é, de forma contínua. A leitura do cronômetro é feita cada vez que acontece um ponto de medição, anotando-se o evento sem paralisar o cronômetro. Desta forma, as atividades são apontadas na sequência, de forma cronológica, facilitando a percepção de eventuais erros, bem como a identificação e cronometragem de atividades não previstas.

Outra opção é o método de *multimomento*, o qual trabalha com cronômetros que giram continuamente, sendo as atividades parciais determinadas de acordo com a frequência que ocorrem. Para isto, observa-se, em determinados intervalos, quais atividades parciais estão sendo desenvolvidas e faz-se uma marcação no formulário dos tempos de trabalho (BARNES, 1977).

Leite et al. (2014a), realizando estudo de tempos e movimentos para analisar o desempenho da extração de madeira por *forwarder*, encontraram os melhores resultados de produtividade e custo de produção em ciclo operacional nas menores distâncias, maiores volumes individual das árvores e menor declividade do terreno.

Lopes et al. (2009) concluíram que a produtividade do *skidder* é afetada significativamente pela distância de arraste e que o melhor rendimento energético ($1,3 \text{ g kW m}^{-3}$), para uma floresta de $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, foi encontrado para uma distância de 300 m. Enquanto que o menor custo de produção ($0,55 \text{ US\$ m}^{-3}$) foi atingido na floresta mais produtiva avaliada ($300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e na menor distância de arraste (100 m).

Leite et al. (2014b), analisando o desempenho do *harvester* em diferentes espaçamentos e declividade concluíram que os menores espaçamentos e declividades mais acentuadas influenciam significativamente em um maior consumo

médio de tempo para uma mesma atividade do ciclo operacional, podendo atingir custos 11% maiores do que em áreas planas.

2.5 Análise de viabilidade econômica

A análise econômica por meio de critérios financeiros é fundamental para se definir qual o melhor projeto ou decisão a ser tomada (REZENDE; OLIVEIRA, 2001). Diversos projetos florestais vêm sendo realizados baseados em análises econômicas, utilizando-se critérios como: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), *Payback*, razão Benefício/Custo (B/C), Valor Anual Equivalente (VAE) e Custo Médio de Produção (CMP) (NAUTIYAL, 1988; SILVA et al., 1999).

O VPL é obtido por meio da diferença existente entre as saídas de caixa (investimentos) e as entradas de caixa, descontados a uma determinada taxa de juros, geralmente utiliza-se a taxa mínima de atratividade. Considera-se viável um projeto que possui um VPL igual ou maior do que zero (WERNKE, 2000).

A TIR é a taxa que produz um VPL igual a zero. A TIR tem a função de descontar um valor futuro ou aplicar um determinado fator de juros sobre um valor presente, trazendo o valor do fluxo de caixa para uma data base de comparação, que geralmente é a data de início da operação (momento zero). Para um determinado projeto se mostrar financeiramente atraente, a TIR deve ser maior do que a taxa mínima de atratividade, mostrando que o projeto é interessante (HOJI, 2006).

O *Payback* é um indicador que determina o prazo de recuperação de um determinado investimento. É o tempo decorrido entre o investimento inicial e o momento no qual o lucro líquido acumulado se iguala ao valor desse investimento. O *Payback* pode ser nominal, quando calculado com base no fluxo de caixa com valores nominais, ou presente líquido, quando calculado com base no fluxo de caixa com valores trazidos ao valor presente líquido (MOTTA; CALLÔBA, 2002).

Dal Farra e Esperancini (2005) analisando econômica-energeticamente a utilização de resíduo industrial florestal (casca e pó de madeira de *pinus*) para geração de energia térmica encontrou, dentre diversas alternativas de uso do equipamento e possibilidade de financiamento e uso de capital próprio, um maior VPL de R\$ 6.419.599,48, TIR de 19,57% e *Payback* de 9 meses.

2.6 Setor de energia

A busca mundial por alternativas renováveis de energia é crescente, levando inúmeros países, principalmente na Europa, a promover ações para alterar a composição de suas matrizes energéticas. Neste cenário o Brasil se destaca devido suas características edafoclimáticas privilegiadas. As pressões ambientais pelo uso de fontes renováveis de energia aliado ao rápido crescimento de florestas poderão acarretar um aumento considerável de uso de biomassa para geração de energia, podendo a mesma ser queimada diretamente em fornos e caldeiras (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

O potencial energético da biomassa é enorme, tanto em escala mundial como no Brasil. Ao mesmo tempo, os biocombustíveis poderiam ser uma das soluções para o fornecimento de eletricidade em comunidades isoladas, o que simultaneamente pode constituir um incentivo para o desenvolvimento de atividades extrativas sustentáveis que contribuam para o desenvolvimento destas comunidades (LORA; ANDRADE, 2004).

Conforme o anuário da ABRAF (2013), observa-se como destaque da silvicultura em 2012, a participação da biomassa na geração de energia elétrica no Brasil, a qual representou 7%. As principais biomassas utilizadas para a geração de energia elétrica no Brasil são: o bagaço da cana de açúcar, o licor negro e os resíduos florestais (Figura 5).

Figura 5 - Distribuição da matriz energética brasileira
Fonte: ABRAF (2013)

Analisando a distribuição das usinas termelétricas a base de biomassa no Brasil (Figura 6), e que representa 15,8% de geração de energia elétrica, percebe-se a grande pulverização da biomassa proveniente de resíduos de madeira devido à grande dispersão dos plantios florestais. Por meio da Figura 7 é possível perceber que as regiões Sul e Sudeste concentram a maior parte de plantios florestais e de cana-de-açúcar, consequentemente, maior potencial para geração de energia a partir de biomassa (ABRAF, 2013).

Figura 6 – Distribuição de usinas termelétricas a base de biomassa no Brasil
Fonte: ABRAF (2013) apud Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2013)

A quantidade de energia gerada por resíduos florestais de biomassa é significativa, ainda assim o potencial é muito maior. Anualmente são gerados cerca de 41 milhões de toneladas de resíduos madeiros oriundos da indústria de processamento de madeira e da colheita florestal, quantidade esta que é capaz de gerar energia equivalente a $1,7 \text{ GW ano}^{-1}$.

Figura 7 – Área plantada das principais culturas energéticas no Brasil
 Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2012).

Para diversificação da matriz energética nacional, existem diversas ações do governo brasileiro, sendo uma delas o projeto de lei 3.529/2012 cuja proposta é instituir a política nacional de geração de energia elétrica a partir da biomassa, sendo parte obrigatória na contratação da bioenergia na composição da geração elétrica nacional. Caso aprovada a lei, a participação e demanda por biomassa de fontes renováveis aumentará ainda mais (ABRAF, 2013).

As empresas fabricantes de celulose devem buscar alternativas para o aproveitamento dos resíduos florestais, visto que estas grandes quantidades no campo são vistas como uma perda de potencial energético. Algumas empresas já utilizam parte desta biomassa, como cascas de eucalipto, bem como o licor negro para queima em caldeiras de geração de eletricidade e vapor (Figura 8) (LABATE, 2000).

Figura 8 – Matriz energética da indústria de Celulose e Papel de 1970 a 2010.

Fonte: Associação Brasileira de Celulose e Papel – BRACELPA (2013) apud Balanço Energético Nacional

* Subproduto (Biomassa)

2.7 Fluxos de energia no sistema

Avaliando-se o panorama atual mundial, onde a escassez de recursos é cada vez mais eminente, a questão da maximização da produção agrícola se torna crucial para manutenção e perpetuação da humanidade. Entretanto, há limites cada vez mais próximos para a intensificação do uso de energia no setor agroflorestal devido aos limites biofísicos do ambiente, à degradação dos espaços e da qualidade dos produtos agrícolas (FERRARO JUNIOR, 1999).

A influência direta e indireta dos combustíveis fósseis na formação do custo representa um importante fator para dificultar a obtenção de um nível satisfatório de sustentabilidade, derivado do desenvolvimento de tecnologias que visam o aumento da produtividade agroflorestal (ULBANERE, 1988).

A análise energética quantifica, de maneira estimada, a energia diretamente consumida e/ou indiretamente utilizada (como parte integrante do fluxo energético global), em pontos previamente estabelecidos de um determinado sistema produtivo (HESLES, 1981).

Segundo Schroll (1994), o método do fluxo de energia é uma forma de quantificar partes essenciais do desenvolvimento de sistemas agrícolas. A relação entre saídas/entradas de energia é proposta como um modo mais inclusivo de se avaliar a sustentabilidade de um sistema agropecuário. A quantificação de modelos qualitativos dá condição à identificação de desperdícios de energia, de componentes

que podem ser substituídos por outros de maior eficiência energética ou simplesmente eliminados, ou seja, de interferir na estrutura do sistema para torná-lo mais eficiente energeticamente (MELLO, 1986; SANTOS, 2006).

O balanço energético tem como objetivo estabelecer os fluxos de energia, por meio 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 (SIQUEIRA et al., 1999; ROMANELLI, 2007).

Nas atividades agropecuárias e florestais, novas fontes de energia vêm ganhando cada vez mais importância, como objetivo de racionalizar o uso de energia. A crescente busca por fontes de energia alternativas às fósseis tem levado muitos países à busca do uso da biomassa para essa finalidade (WRIGHT, 2006). Essa fonte de energia é considerada por diversos autores como uma opção com potencial de crescimento para uso como combustível no suprimento futuro de energia (DEMIRBAS et al., 2009).

Segundo Blaschek et al. (2010), em termos mundiais, o uso potencial da biomassa (de todas as formas de resíduos, portanto, excluindo-se somente a biomassa dedicada) é estimado em torno de 80 EJ (exajoule), porém pesquisas são necessárias para a determinação de quanto desse potencial teórico pode ser utilizado de maneira sustentável e econômica.

Um dos fatores que pode impactar no poder de disponibilização de energia é a composição da biomassa, por meio de parâmetros como composição estrutural, elementar e imediata, bem como as cinzas. Na composição estrutural são analisados os teores de celulose, hemicelulose e lignina, esta última de elevada importância e correlação com o poder calorífico (ROMANELLI; RAUCCI, 2011).

Em um sistema de produção agrícola ou florestal é possível determinar a energia de entrada (EE), expressa em termos energéticos, por meio de cálculos com os insumos utilizados e atividades realizadas. Também é possível determinar a energia de saída (ES) de um sistema conhecendo-se as características e processo de conversão do produto final (RATHKE et al., 2007).

O balanço energético (BE) pode ser calculado por meio da subtração da energia consumida no sistema (EE) pela energia disponível no produto final (ES), podendo ser encontrada de acordo com os limites da análise, seja relacionado à

área (MJ ha^{-1}), ao tempo (MJ ano^{-1}), ou até para ambos ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). O EROI, Energy Return Over Investment, é a proporção de energia produzida que é requerida para que ocorra o processo de produção da fonte energética, podendo ser calculado pela razão entre a energia de entrada e energia de saída, fornecendo assim o retorno energético bruto do sistema (ROMANELLI; MILAN, 2010b).

Segundo Bueno e Quintana (2004), avaliando energeticamente o preparo de solo para a cultura do eucalipto, o gasto energético no preparo de solo da implantação de eucalipto é de $3,3 \text{ GJ ha}^{-1}$, sendo a maior parte da energia constituída de fonte industrial (83,41%), energia fóssil (16,54%) e fonte biológica (0,05%).

Moreira (2004), trabalhando com caracterização energética e nutricional do cultivo de eucalipto, obteve demanda energética de 4.387 MJ ha^{-1} para um tratamento com composto e 2.935 MJ ha^{-1} para um tratamento sem composto, mostrando a importância do aproveitamento de resíduos, no caso o composto, para redução da demanda energética em um sistema.

Oliveira et al. (2005) analisando a produção de etanol de cana-de-açúcar encontraram um EROI de 3,7, não considerando uma opção sustentável energeticamente quando comparado com o uso da gasolina.

Campos et al. (2005) estudando a produção de feno de *Cynodon dactylon*, desde sua implantação até a fenação e armazenamento, encontraram um EROI de 4,3, concluindo que é um sistema sustentável do ponto de vista energético.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para atender ao objetivo do trabalho foi desenvolvido um modelo em planilha eletrônica para avaliar o emprego de um sistema mecanizado florestal para a retirada e processamento do resíduo, tocos remanescentes.

As operações mecanizadas previstas são a destoca, retirada do material do talhão (baldeio) e o processamento para posterior transporte. A avaliação energética foi efetuada com base no sistema mecanizado e no potencial energético do resíduo. Os dados necessários para serem incluídos como variáveis de entrada no modelo, referentes ao desempenho operacional do sistema mecanizado, foram obtidos por meio de ensaios realizados a campo.

3.1 Modelo

O modelo para o dimensionamento do sistema mecanizado florestal foi desenvolvido de acordo com as etapas apresentadas na Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma para dimensionamento operacional e econômico de sistema mecanizado florestal

De acordo com Milan e Rosa (2015) o dimensionamento do sistema mecanizado tem início pela necessidade em se adquirir máquinas (1), para atender um novo sistema de produção a ser implementado. As operações a serem

executadas (2) e as respectivas épocas de realização são definidas (3) na análise operacional e essas informações são utilizadas na etapa de planejamento para seleção. No planejamento, determina-se o tempo disponível (4) e o ritmo operacional (5), quantidade de trabalho a ser realizada na unidade de tempo. Com base no ritmo operacional e na capacidade de trabalho da máquina (7), calcula-se o número de conjuntos necessários (6) para atender as condições definidas na análise operacional. A determinação da capacidade de trabalho é realizada com base na quantidade de trabalho (8) que a máquina pode realizar na unidade de tempo (9), adequando-se a potência disponível, por exemplo, do motor do equipamento com a potência requerida (11) pelo implemento e a eficiência da operação (10). A associação entre a capacidade operacional e os custos diretos e indiretos (12) determina o custo operacional (13). Se o resultado se mostrar adequado, encerra-se o processo (14), caso contrário, as alternativas para viabilizar o sistema devem ser reavaliadas.

3.2 Análise Operacional

A análise operacional define o sistema de produção a ser adotado. No caso do sistema mecanizado de destoca florestal foram previstas três operações, colheita de tocos (destoca), baldeio e processamento, além do transporte do material para o local de utilização (Figura 10).

Figura 10 – Processo de colheita e processamento das operações

Onde:

- Processo
- Equipamentos utilizados

Na Figura 11 é possível observar que a operação de destoca florestal pode ocorrer durante todo o ano, sem nenhuma restrição edafoclimática, assim como as operações subsequentes de baldeio de tocos e processamento. Entretanto, trinta dias de intervalo são necessários entre cada uma das operações.

Operação	Mês											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Destoca florestal	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Baldeio de tocos	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Processamento	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Transporte	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Figura 11 – Análise operacional do sistema mecanizado de destoca florestal

3.3 Planejamento para seleção

Esta etapa envolve o cálculo do tempo disponível para realizar as operações, o ritmo operacional e o número de conjuntos. A estimativa do tempo disponível é calculada com base na equação 1:

$$TD = \{[NT - (NDF + NDUI)] \times (JT \times EG)\} \quad (1)$$

Em que:

TD = Tempo disponível para realizar cada operação, em horas (h);

NT = Número de dias total no período previsto para a realização da operação;

NDF = Número de domingos e feriados previstos para ocorrer no período;

NDUI = Número de dias úteis impróprios ao trabalho das máquinas;

JT = Jornada de trabalho adotada, em horas (h);

EG = Eficiência gerencial ou administrativa, em decimal.

Na equação (1), NT refere-se ao número total de dias no período previsto para realizar a operação, 365 dias. Desse total, subtrai-se o número de domingos e feriados (NDF) no período (52 dias) e o número de dias úteis impróprios (NDUI) no período (13 dias), o qual considera onze feriados nacionais, mais um feriado municipal e um estadual. A jornada de trabalho diária (JT) é de 8 horas e 2 turnos. A

eficiência gerencial (EG), leva em conta os tempos perdidos associados às atividades administrativas, sendo considerado 77%. As informações de NDF, NDUI, JT e EG foram todas baseadas segundo informações operacionais da Suzano Papel e Celulose SA.

O ritmo operacional (RO) é calculado como a razão entre a área a ser realizada por cada uma das operações e o tempo disponível, equação 2:

$$RO = At / TD \quad (2)$$

Em que:

RO = Ritmo operacional em ha h⁻¹;

At = Área a ser trabalhada por operação, em ha;

TD = Tempo disponível, em horas (h).

O cálculo do número de conjuntos foi realizado pela razão entre o ritmo operacional e a capacidade de campo operacional, equação 3:

$$NC = RO / CCO \quad (3)$$

Em que:

NC = Número de conjuntos;

RO = Ritmo operacional, em ha h⁻¹ ou em t h⁻¹;

CCO = Capacidade de Campo Operacional, em ha h⁻¹ ou em t h⁻¹.

A capacidade de trabalho expressa a quantidade de trabalho que uma máquina ou um conjunto (trator-implemento) é capaz de realizar na unidade de tempo. A quantidade de trabalho pode ser medida em termos de área, volume ou massa.

3.4 Plano de Seleção/Aquisição de Máquinas

A tomada de decisão quanto à seleção/aquisição de uma determinada máquina florestal está associada às suas características técnicas e a necessidade

de potência para a realização das operações. Para o trabalho em questão foram realizadas três operações distintas e subsequentes, sendo o número de equipamentos dimensionado de acordo com a capacidade de campo de cada operação, constituindo um módulo operacional. Posteriormente a essas atividades ocorreu o transporte dos cavacos para o destino final, onde foi consumido em caldeira para geração de calor.

Para obter a capacidade de trabalho realizou-se um estudo no município de Itirapina, estado de São Paulo, na Fazenda Sinimbu, localizada na Estrada SP369, Latitude 22°18' e Longitude 47°52', propriedade da empresa Suzano Papel e Celulose SA.

Escolheu-se o talhão 56I051 (Figura 12), com área de 44,94 ha, material genético *Eucalyptus urograndis*, plantado em espaçamento de 3,0 x 2,2 m (6,6 m², 1.515 plantas ha⁻¹), em terceiro ciclo e terreno plano com inclinação inferior a 3%. O volume médio sem casca da floresta destinada para celulose foi 371 m³ ha⁻¹ (Fonte: Suzano Papel Celulose SA).

O clima da região foi caracterizado como Cwa de acordo com o sistema de classificação climática de Köppen, temperatura anual média de 20,8°C e precipitação anual média de 1450,1 mm (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura – CEPAGRI, 2015).

Figura 12 – Área de testes na Fazenda Sinimbu, talhão 56I051

3.4.1 Descrição das operações e equipamentos

A primeira operação (destoca) foi realizada por meio de um implemento, *stump shear* (Figura 13), acoplado a uma escavadora hidráulica de esteiras (Figura

14). A escavadora da marca Caterpillar, modelo CAT 336D, é equipada com um motor CAT C9 com potência de 200 kW (268 cv) e massa de 36.498 kg. As dimensões principais da escavadora são apresentadas na Tabela 1. O implemento foi desenvolvido pela empresa OperFlora em parceria com a Paraná Equipamentos (PESA), exclusivamente para este tipo de operação.

Figura 13 – *Stump shear*

Figura 14 – Dimensões da escavadora hidráulica CAT 336D
Fonte: Catálogo Caterpillar

Tabela 1 – Especificações da escavadora hidráulica CAT 336D de acordo com opções de lanças/braços

Dimensão		Unidade	Valor
Número*	Descrição		
1	Altura de transporte	mm	3.350 a 3.630
2	Comprimento de transporte	mm	10.910 a 11.200
3	Raio de giro da cauda	mm	3.500
4	Comprimento entre os centros da roda-guia e roda motriz	mm	4.040
5	Comprimento da esteira	mm	5.020
6	Altura livre sobre o solo	mm	450
7	Bitola	mm	2.590
8	Largura de transporte	mm	3.290 a 3.440
9	Cabine	mm	3.140
10	Espaço contrapeso	mm	1.220

*Nota: os números correspondem à Figura 14

A operação de destoca consiste na retirada de tocos pelo conjunto escavadora-implemento em três linhas simultâneas. Os tocos retirados foram enleirados na terceira linha, assim como os tocos da passagem subsequente, Figuras 15A e 15B. Portanto, o enleiramento consiste do material retirado das seis linhas.

Figura 15A e B – Enleiramento dos tocos na operação de destoca. **A: esquema. B: vista da operação**

* o número corresponde a linha trabalhada.

A segunda operação, baldeio dos tocos, foi realizada por meio de um implemento, garra florestal (Figura 16), acoplada em uma escavadora hidráulica (Figura 17) e com um caminhão basculante (Figura 18). A escavadora hidráulica utilizada nesta operação também é da marca Caterpillar, modelo CAT 320D,

equipada com motor CAT C6.4 com potência de 103 kW (138 cv) e massa de 21.570 kg. As dimensões principais da escavadora são apresentadas na Tabela 2. A garra florestal foi desenvolvida pela empresa OperFlora em parceria com a Paraná Equipamentos (PESA), exclusivamente para este tipo de operação.

Figura 16 – Garra florestal

Figura 17 – Dimensões da escavadora hidráulica CAT 320D
Fonte: Catálogo Caterpillar

Tabela 2 – Especificações da escavadora hidráulica CAT 320D de acordo com opções de lanças/braços

Dimensão		Unidade	Valor
Número*	Descrição		
1	Altura de transporte	mm	3.030 a 3.440
2	Comprimento de transporte	mm	9.050 a 12.680
3	Raio de giro da cauda	mm	2.750
4	Comprimento entre os centros da roda-guia e roda motriz	mm	3.265 a 3.650
5	Comprimento da esteira	mm	4.075 a 4.455
6	Altura livre sobre o solo	mm	450
7	Bitola	mm	2.200 a 2.380
8	Largura de transporte	mm	2.800 a 3.180
9	Cabine	mm	2.950

*Nota: os números correspondem à Figura 17

Figura 18 – Caminhão basculante

O baldeio consiste na coleta de tocos que estão depositados no talhão, por meio do conjunto garra-escavadora, e posterior carregamento no caminhão basculante. Os tocos são transportados para a borda do talhão onde são descarregados e processados.

Para a terceira operação, processamento dos tocos, utilizou-se um picador com opção de rolo faca ou martelo alimentado por uma garra florestal acoplada em uma escavadora hidráulica, mesmo conjunto citado na operação de baldeio. O picador utilizado foi da marca Vermeer, modelo HG 6000TX (Figura 19), motor CAT C18 Tier 3 com 469,8 kW (630 cv) e massa de 25.401 kg.

Figura 19 – Detalhe do picador Vermeer HG 6000TX

O processamento (picagem) dos tocos foi realizado na borda do talhão, onde o picador recebia o material, o qual passava por um processo de trituração, gerando como produto cavacos de madeira. Por meio da esteira do picador ocorria o descarregamento direto no caminhão responsável pelo transporte.

A operação de transporte dos cavacos não foi controlada, sendo apenas contratado um caminhão com piso móvel e com capacidade para 110 m³, a um custo de R\$ 0,12 km⁻¹ m⁻³.

3.4.2 Obtenção da capacidade de trabalho

A capacidade de trabalho dos equipamentos envolvidos foi determinada por meio da capacidade de campo, efetiva e operacional, e a capacidade de produção operacional. A capacidade de campo efetiva foi obtida por meio da equação 4:

$$CCE = At / TP \quad (4)$$

Em que:

CCE = Capacidade de campo, ou de produção, efetiva, em ha h⁻¹ ou em t h⁻¹;

At = Área trabalhada ou produção por operação, em ha ou t;

TP = Tempo de produção, em horas (h).

A capacidade de campo operacional foi calculada de acordo com a equação 5:

$$CCO = At / TM \quad (5)$$

Em que:

CCO = Capacidade de campo, ou produção, operacional, em ha h⁻¹ ou em t h⁻¹;

At = Capacidade de campo efetivo, em ha h⁻¹ ou t h⁻¹;

TM = Tempo de máquina, em horas (h).

Onde, o tempo de máquina é calculado como a somatória dos tempos de produção, tempo de interrupção e tempo de preparo, equação 6:

$$TM = TP + TI + TPr \quad (6)$$

Em que:

TM = Tempo de Máquina, em horas (h);

TP = Tempo de produção, em horas (h);

TI = Tempo de interrupção, em horas (h);

TPr = Tempo de preparo, em horas (h).

O tempo de produção (TP) é aquele destinado efetivamente ao trabalho para qual a máquina foi projetada. O tempo de interrupção (TI) é aquele gasto com as interrupções inerentes ao trabalho, como: manobras de cabeceira, desembuchamentos, reabastecimento e lubrificações. Por fim, o tempo de preparo (TPr) é aquele gasto no preparo da máquina para entrar em operação, envolvendo os seguintes tempos: acoplamento, desacoplamento, deslocamento para a área de trabalho, controle e manutenção.

A capacidade de produção foi calculada de acordo com a equação 7:

$$CPr = CCO \times Prod \quad (7)$$

Em que:

CPr = Capacidade de produção, em t h⁻¹;

CCO = Capacidade de campo operacional, em ha h⁻¹;

Prod = Produtividade dos tocos, em t ha⁻¹.

3.4.3 Ensaio de tempo e movimento

A avaliação do uso de tempo das máquinas foi realizada por meio do estudo de tempo *contínuo* para definição dos indicadores de produção das operações. Para esse ensaio foi considerado um ciclo de sete horas produtivas e uma hora de almoço, com início às 7h e término às 15h.

A medição do tempo ocorreu de forma contínua, sendo anotado o horário indicado no relógio junto ao nome da atividade parcial recém-concluída. O tempo requerido para cada trabalho parcial foi calculado por meio da subtração entre o horário em que terminou a atividade parcial e o horário em que se iniciou.

Os formulários (Figura 20) foram feitos antes da coleta de dados, contendo espaços para descrição das atividades parciais, data e hora de início e término de coleta. A coleta de dados foi efetuada durante todo o turno de trabalho, com os mesmos operadores em cada atividade. As condições climáticas se mantiveram estáveis ao longo do levantamento, clima seco.

Data:		Fazenda:	
Operação:		Talhão:	
Operador:			

	Atividade	Hora início	Hora término	Tempo (h)	OBS	Classificação do Tempo
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						

Figura 20 – Exemplo de formulário utilizado em campo para coleta dos dados

Especificamente para a operação de colheita de tocos foi realizado outro estudo de tempos e movimentos, sendo utilizado o método de *multimomento*. O tempo foi registrado de forma contínua por meio de um cronômetro, medindo-se a frequência com que os movimentos (momentos) da máquina ocorriam. Os dados foram anotados em um formulário, Figura 21.

PLANILHA DE ESTUDOS DE TEMPOS E MOVIMENTOS - DESTOCA			
ASSUNTO:		OPERADOR:	
SITUAÇÃO DO TRABALHO: 2 LINHAS () 3 LINHAS () 4 LINHAS ()		ESPAÇAMENTO:	
HORA INICIAL:		DATA:	
HORA FINAL:		FAZENDA:	
MÁQUINA:		UP:	
TEMPO: 30 MINUTOS () 1 HORA ()		CONVERSÃO:	
ITEM	MOVIMENTOS - AMOSTRA 1	VALOR	%
1	Deslocamento máquina		
2	Movimentação da lança		
3	Limpeza e/ou procura do toco		
4	Retirando o toco		
5	Enleiramento		
6	Acabamento		
7	Retorno para coleta de toco		
Nº de movimentos			
Nº de tocos retirados			-
ITEM	MOVIMENTOS - AMOSTRA 2	VALOR	%
1	Deslocamento máquina		
2	Movimentação da lança		
3	Limpeza e/ou procura do toco		
4	Retirando o toco		
5	Enleiramento		
6	Acabamento		
7	Retorno para coleta de toco		
Nº de movimentos			
Nº de tocos retirados			
ITEM	MOVIMENTOS - AMOSTRA 3	VALOR	%
1	Deslocamento máquina		
2	Movimentação da lança		
3	Limpeza e/ou procura do toco		
4	Retirando o toco		
5	Enleiramento		
6	Acabamento		
7	Retorno para coleta de toco		
Nº de movimentos			
Nº de tocos retirados			
1	Deslocamento Máquina: Do momento que a máquina de esteira se desloca dentro da UP até realizar outro movimento.		
2	Movimentação da lança: Do momento que a máquina movimenta a lança em busca do toco.		
3	Limpeza e/ou procura do toco: Momento que mexe a pinça a procura do toco, ou faz limpeza da região.		
4	Retirada do toco: Do momento que a lança abaixa para coletar o toco até o momento que içar o toco do solo.		
5	Enleiramento: Do momento que o toco foi içado do solo até a colocação dele na linha enleirada.		
6	Acabamento: Do momento que a pinça terminou de enleirar, ou de içar o toco e retorna a um buraco para ajeita-lo.		
7	Retorno para coleta de toco: Do momento que a pinça terminou de enleirar, ou de içar o toco e retorna para coletar restos do toco retirado previamente.		

Figura 21 – Modelo de formulário utilizado para coleta de dados

Sendo assim, foi possível classificar a operação em 7 momentos distintos, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação e descrição dos momentos da atividade de destoca

Classificação dos momentos		Descrição
Número	Momento	
1	Deslocamento Máquina	Do momento que a máquina de esteira se desloca dentro do talhão até realizar outro movimento.
2	Movimentação da lança	Do momento que a máquina movimenta a lança em busca do toco.
3	Limpeza e/ou procura do toco	Momento que mexe o <i>stump shear</i> a procura do toco ou faz limpeza da região (afastando resíduos no entorno).
4	Retirada do toco	Do momento que a lança abaixa para coletar o toco até o momento que içar o toco do solo.
5	Enleiramento	Do momento que o toco foi içado do solo até a colocação dele na linha enleirada.
6	Acabamento	Do momento que o <i>stump shear</i> terminou de enleirar, ou de içar o toco e retorna a um buraco para um acabamento.
7	Retorno para coleta de toco	Do momento que o <i>stump shear</i> terminou de enleirar ou de içar o toco e retorna para coletar restos do toco.

Três tomadas de tempo de 30 minutos foram realizadas contabilizando cada momento após 15 segundos passados, ou seja, 120 momentos ao final de cada tomada (totalizando 360 momentos). Os dados obtidos encontram-se no ANEXO A.

3.5 Desempenho econômico

O desempenho econômico do sistema de destoca envolve o cálculo dos custos operacionais que foram estimados pela metodologia proposta pela FAO (FERNANDES et al., 2013; MACHADO; MALINOVSKI, 1988; SESSIONS, 1987), onde são subdivididos em: custo do equipamento (custos fixos e variáveis), custos de pessoal (mão de obra) e custos de administração.

3.5.1 Custos fixos

Os custos fixos independem do uso da máquina, englobando a depreciação, juros, seguro e taxas.

Para o cálculo do custo fixo utilizou-se a metodologia da American Society of Agricultural Engineering - ASAE (1998), em que para o cálculo são necessários o preço inicial, valor final e a vida útil do equipamento, taxa de juros, alojamento, seguro e taxas, equação 8.

$$CF = \frac{V_i \times [(1 - V_f) + \left(\frac{1 + V_f}{2}\right) \times i + AST]}{\left(\frac{V_{uh}}{V_{ua}}\right)} \quad (8)$$

Em que:

CF = Custo fixo anual, em R\$ h⁻¹;

V_i = Valor inicial do sistema mecanizado, em R\$;

V_f = Valor final do sistema mecanizado, em decimal;

i = taxa de juros, em decimal;

AST = alojamento, seguros e taxas, em decimal;

V_{uh} = Vida útil dos equipamentos, em horas (h);

V_{ua} = Vida útil dos equipamentos, em anos.

3.5.2 Custos variáveis

Os custos variáveis oscilam de acordo com a produção e refletem os gastos com combustível, lubrificantes, reparos e manutenção, equação 9.

$$CV = CCI + Crm \quad (9)$$

Em que:

CV = Custo variável anual, em R\$ h⁻¹;

CCI = Custos do insumo (combustível ou lubrificante), em R\$ h⁻¹;

Crm = Custo com reparo e manutenção, em R\$ h⁻¹.

Os custos com insumos, como combustível e lubrificantes, variam de acordo com a potência do motor, tipo do combustível ou lubrificante, local de trabalho, habilidade do operador, regulagem da máquina, preço do litro, entre outros, equação 10.

Os consumos médios, de combustível e lubrificantes, foram obtidos diretamente por meio dos registros da empresa referente ao ensaio realizado.

$$CCI = Ci \times Pi \quad (10)$$

Em que:

CCI = Custos do insumo (combustível ou lubrificante), em R\$ h⁻¹;

Ci = Consumo do insumo, em L h⁻¹;

Pi = Preço do litro do insumo, em R\$ L⁻¹.

Os custos com reparos e manutenção são essenciais para garantir o desempenho e confiabilidade de um equipamento, envolvendo os gastos referentes as peças e mão de obra para reparo do equipamento. A ASAE (1998) propõe uma porcentagem em relação ao valor inicial que o equipamento vai despendar ao longo da vida útil, equação 11.

$$Crm = (Vi \times Frm) / Vuh \quad (11)$$

Em que:

V_i = Valor inicial do equipamento, em R\$;

F_{rm} = Fator de reparos e manutenção, em decimal;

V_{uh} = Vida útil estimada do equipamento, em horas (h).

Para o equipamento escavadora hidráulica adotou-se um fator de reparos e manutenção de 0,50, para o caminhão basculante 0,30 e para o picador 0,70. Estes valores foram baseados em operações similares utilizadas pela empresa.

3.5.3 Custos com mão de obra

Os custos com mão de obra são formados pelos custos diretos e indiretos com o operador da máquina, representado pela equação 12.

$$CMO = 12 \times S_m (1 + e) / H_{ef} \quad (12)$$

Em que:

CMO = Custo com mão de obra, em R\$ h^{-1} ;

S_m = Salário mensal, em R\$ $mês^{-1}$;

e = Fator de encargos sociais (80%);

H_{ef} = Horas efetivas de uso anual, em horas (h).

3.5.4 Custos de Administração

Os custos com administração são custos indiretos relacionados com a administração do trabalho como, por exemplo, equipe para supervisionar a operação, saúde e segurança do trabalho, entre outros, equação 13.

$$CAD = CMO \times K \quad (13)$$

Em que:

CAD = Custo com administração, em R\$ h^{-1} ;

K = coeficiente de administração, em decimal (0,10).

3.5.5 Custo Total

O custo total obtido é o somatório dos custos de equipamento (fixos e variáveis), pessoal (mão de obra) e de administração em horas efetivas, obtidas pela equação 14.

$$CT = CF + CV + CMO + CAD \quad (14)$$

Em que:

CT = Custo Total, em R\$ h⁻¹.

3.5.6 Custo de Operação ou Produção

A Tabela 4 apresenta um resumo geral dos valores considerados para cada equipamento em cada operação. Estes valores foram baseados em informações de mercado sobre os equipamentos, preços de insumos praticados na região e informações da empresa. Todas essas informações foram utilizadas nas equações citadas anteriormente para cálculo dos custos fixos, variáveis, mão de obra e administração, que posteriormente geram o custo total.

Tabela 4 – Resumo geral dos valores considerados para cada operação

Item	Unidade	Valores considerados para as operações				
		Destoca	Baldeio		Processamento	
		Escavadora + stump shear	Escavadora + garra florestal	Caminhão basculante	Escavadora + garra florestal	Picador
Valor Inicial	R\$	950.000	840.000	100.000	840.000	2.300.000
Valor Residual	%	20	20	10	20	20
Vida Útil Equipamento	h	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000
Fator de Repar. e Manut.	%	50	50	30	50	70
Preço combustível	R\$ L ⁻¹	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52
Consumo combustível	L h ⁻¹	28,0	20,0	4,5	20,0	62,9
Preço lubrificantes	R\$ L ⁻¹	15,00	15,00	7,00	15,00	15,00
Consumo lubrificantes	L h ⁻¹	0,56	0,24	0,23	0,24	0,23
Taxa de juros	%	10	10	10	10	10
Seg., Licença e Taxas	%	5	5	5	5	5
Salário Operador	R\$ mês ⁻¹	2.600	2.600	2.600	2.600	2.600
Nº de operadores/turno	#	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Encargos Sociais	%	80	80	80	80	80
Administração	%	10	10	10	10	10

O custo de operação ou produção é obtido pela divisão dos custos totais (R\$ h⁻¹) pela capacidade de campo ou produção operacional (CCO, em ha h⁻¹ ou t h⁻¹), equação 15:

$$CO = CT / CCO \quad (15)$$

Em que:

CO = Custo operacional, ou produção, em R\$ ha⁻¹ ou em R\$ t⁻¹;

CT = Custo total, em R\$ h⁻¹;

CCO = Capacidade de campo, ou produção, operacional, em ha h⁻¹ ou em t h⁻¹.

3.5.7 Análise de viabilidade econômica

Para analisar a viabilidade econômica do projeto foram utilizados os seguintes parâmetros: Valor Presente Líquido (VPL), *Payback* (ou tempo de recuperação do capital investido) e Taxa Interna de Retorno (TIR).

O Valor Presente Líquido (VPL) representa a diferença positiva entre receitas e custos, atualizado de acordo com determinada taxa de desconto. O projeto será economicamente viável quando o VPL for maior do que zero, equação 16.

$$VPL = - C_0 + \sum_{i=1}^T \frac{C_i}{(1+r)^i} \quad (16)$$

Em que:

VPL = Valor Presente Líquido, em R\$;

C₀ = Fluxo de caixa no período 0, em R\$;

C_i = Fluxo de caixa no período i, em R\$;

i = período, em anos;

r = taxa de desconto, em decimal.

O *Payback* indica o tempo necessário para que se iguale o valor inicial do investimento com o lucro líquido acumulado. O *Payback* deve ser positivo para o projeto ser viável e quanto menor o seu número, mais rápido o retorno é praticado.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa aplicada a um fluxo de caixa para trazer os valores das despesas em valor presente. O projeto será economicamente

atrativo quando a TIR for maior do que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Neste trabalho adotado como 10,20%, equação 17.

$$VPL = 0 = Invest. Inicial + \sum_{t=1}^N \frac{C_i}{(1+TIR)^i} \quad (17)$$

Em que:

TIR = Taxa Interna de Retorno, em decimal ou porcentagem.

3.6 Desempenho energético

A floresta em questão foi projetada originalmente para produção de madeira para celulose, portanto as operações convencionais, desde a produção de mudas até a colheita florestal, já haviam ocorrido (processo convencional). Desse modo, o balanço energético gerado na produção desta floresta não deve ser levado em consideração, evitando-se *double counting* (contagem dupla). Para os cálculos de eficiência energética baseou-se na metodologia utilizada por Romanelli (2007).

Apenas as atividades extras descritas neste trabalho (destoca florestal) foram consideradas na quantificação dos fluxos de energia, ilustradas no diagrama da Figura 22.

Figura 22 – Diagrama de energia de um sistema de destoca florestal

3.6.1 Ferramentas de avaliação

Para avaliação dos fluxos de energia foram considerados os seguintes indicadores: EROI (*Energy Return Over Investment*), Balanço de Energia (BE) e Intensidade Energética (IE), equações 18, 19 e 20 respectivamente.

$$EROI = (ES - EE) / EE \quad (18)$$

Em que:

EROI = retorno em energia sobre energia investida, em MJ MJ⁻¹;

EE = energia de entrada, em MJ ha⁻¹;

ES = energia de saída, em MJ ha⁻¹.

$$BE = ES - EE \quad (19)$$

Em que:

BE = balanço de energia, em MJ ha⁻¹.

$$IE = EE / Prod \quad (20)$$

Em que:

IE = intensidade energética, em MJ t⁻¹;

Prod = produtividade dos tocos, t ha⁻¹.

Para a quantificação das entradas de energia (EE) considerou-se as características das máquinas, desempenho em cada operação, com o maquinário e com mão de obra, além do consumo de combustível e lubrificante em cada atividade do empreendimento florestal (Equação 21).

$$EE = Atividade_i * Ind_i \quad (21)$$

Em que:

Atividade_i = quantidade da i-ésima atividade (kg ha⁻¹, L ha⁻¹);

Ind_i = conteúdo energético da i-ésima atividade (MJ kg⁻¹, MJ L⁻¹).

Os valores dos índices de energia de cada insumo foram baseados em Romanelli (2007) e são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Índice energético considerado para cada insumo

Insumos	Fluxo de material	
	Índice energético	Unidade
Combustível	38,6	MJ l ⁻¹
Maquinário	68,9	MJ kg ⁻¹
Mão de obra	2,2	MJ h ⁻¹
Lubrificantes	38,6	MJ l ⁻¹

Para cálculo da energia de entrada com maquinário considerou-se a razão da massa total de cada equipamento, em quilogramas, pela vida útil, em horas. Para combustível e lubrificante considerou-se o consumo horário de cada equipamento, assim como para a mão de obra onde considerou-se a capacidade de campo operacional obtida em cada equipamento.

A Tabela 6 apresenta a base dos valores de entrada para o maquinário. Para combustível, lubrificante e mão de obra, os valores foram baseados nos resultados encontrados com o ensaio e podem ser vistos nos resultados.

Tabela 6 – Valores de entrada considerados para cálculo do maquinário

Operação	Equipamento	Depreciação		
		Massa (kg)	Vida Útil (h)	Maquinário (kg h ⁻¹)
Destoca	Escav. + <i>Stump shear</i>	36.000	25.000	1,44
Baldeio	Escav. + Garra florestal	20.000	25.000	0,80
Baldeio	Caminhão basculante*	16.500	75.000	0,22
Processamento	Escav. + Garra florestal	20.000	25.000	0,80
Processamento	Picador	25.000	25.000	1,00
Transporte	Caminhão	20.661	25.000	0,83

*Nota: foram considerados três caminhões basculantes

3.6.2 Caracterização do material

Para a quantificação da energia de saída (ES) do sistema considerou-se a produção (em toneladas) de cavacos de tocos de eucalipto que foi produzida na área (Equação 22).

$$ES = Prod * Ind \quad (22)$$

Em que:

Ind = conteúdo energético dos tocos (MJ m^{-3}).

O conteúdo energético dos cavacos de tocos foi obtido por meio de análise laboratorial, realizada após o processamento. Quatro amostras foram coletadas e enviadas para o Laboratório BioEP – LQCE/LCF/ESALQ/USP – Piracicaba, SP, para as seguintes determinações: teor de umidade, densidade a granel, poder calorífico, granulometria e contaminantes. A análise laboratorial completa encontra-se no ANEXO B.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios realizados em campo, baseados no estudo de tempos e movimentos, foram utilizados para calcular o desempenho operacional, com as capacidades de campo operacionais e de produção de cada operação. A partir desses resultados operacionais encontrados o modelo foi alimentado gerando um cenário base para avaliação do desempenho econômico e energético do sistema. Após isso, realizou-se análise de sensibilidade para mensurar os impactos de cada variável alterada no modelo.

4.1 Ensaio de campo e desempenho operacional

Para realização do experimento no talhão selecionado (44,94 ha) as operações duraram 54 dias de atividade. Ao todo 32 ensaios de tempo e movimento foram realizados para a atividade de destoca florestal, 10 ensaios para o baldeio de tocos e 12 ensaios para o processamento dos tocos. A Figura 23 ilustra um formulário de um ensaio preenchido. Um resumo dos tempos obtidos em cada operação encontra-se no ANEXO C.

Data:	24/09/2013	Fazenda:	Sinimbu (Itirapina)
Operação:	Destoca	Talhão:	56I051
Operador:	Cristiano		

	Atividade	Hora início	Hora término	Tempo (h)	OBS	Classificação do Tempo
1	Check lista da máquina	06:57	07:01	00:04	Todos itens ok	Preparo
2	Operação	07:01	10:37	03:36		Produção
3	Abastecimento e lubrificação	10:37	10:48	00:11	153L diesel e 5L 15W40	Interrupção
4	Operação	10:48	11:31	00:43		Produção
5	Almoço	11:31	12:35	01:04		
6	Operação	12:35	13:26	00:51		Produção
7	Manutenção	13:26	14:09	00:43	Solda da pinça	Preparo
8	Turno encerrado	14:09	14:09	00:00		
9						
10						

Figura 23 – Formulário de um ensaio preenchido na operação de destoca

A massa média de tocos obtida foi de 35,12 t ha⁻¹, ou seja, cerca de 23 kg para cada toco. O talhão do estudo da fazenda apresentou, para colheita da floresta, um volume com casca de 325,7 m³ ha⁻¹, assim como um incremento médio anual (IMA) de 53 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (Fonte: inventário pré corte da Suzano Papel e Celulose SA). Portanto, pode-se considerar uma relação de 107,8 kg de toco para cada metro cúbico com casca da floresta.

A Tabela 7 apresenta os resultados referentes ao experimento na área total (44,94 ha), com média, desvio padrão e coeficiente de variação para cada operação realizada.

Tabela 7 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos tempos de cada operação

Operação	Área (ha)	Tempo (h)								
		Produção			Interrupção			Preparo		
		Média	Desv. Pad.	Coef. Var.	Média	Desv. Pad.	Coef. Var.	Média	Desv. Pad.	Coef. Var.
Destoca	44,94	5,49	0,24	4,3%	0,14	0,04	26,8%	0,63	0,15	24,0%
Baldeio	44,94	5,17	0,14	2,7%	0,22	0,02	8,9%	0,58	0,09	15,2%
Processamento	44,94	5,06	0,09	1,8%	0,19	0,02	11,9%	1,24	0,10	7,8%

Na Figura 24 é possível observar que a operação de destoca teve o maior tempo de produção e também os maiores coeficientes de variação entre as operações. Assim como o processamento obteve o maior tempo de preparo, devido as paradas por manutenção do equipamento (picador). O tempo de interrupção obteve os menores valores nas três operações, impactando não mais do que 3,8% nos tempos das operações.

Figura 24 – Média e desvio padrão dos tempos de cada operação

Após conhecimento dos tempos de cada operação foram calculadas as capacidades de campo efetiva (CCE), operacional (CCO) e produtiva (CPr) de cada operação e a Tabela 8 resume os resultados.

Tabela 8 – Resultados do desempenho operacional de cada operação

Operação	Desempenho Operacional		
	CCE ha h ⁻¹	CCO ha h ⁻¹	CPr t h ⁻¹
Destoca	0,25	0,22	7,80
Baldeio	0,87	0,75	26,41
Processamento	0,74	0,58	20,30
Transporte*		0,17	6,14

*Nota: considerando-se uma distância de 34 km

4.1.1 Destoca

Analisando ainda a Figura 24 é possível observar que durante a operação de destoca, houve pouco tempo de perda (com interrupção ou preparo), visto que 88% do tempo da máquina estava destinado a produção, atingindo os valores de capacidade de campo efetiva e operacional de 0,25 e 0,22 ha h⁻¹, respectivamente (Tabela 8). Considerando-se um número de tocos por hectare de 1.515 (espaçamento de 3,0 m x 2,2 m) obteve-se uma média aproximada de 4 minutos para remoção de cada toco do solo.

Figura 25 – Registros fotográficos da operação de colheita de tocos (destoca)

4.1.1.1 Resultados do Estudo de Tempos e Movimentos

Após a coleta dos 360 momentos realizou-se análise dos dados para diagnosticar o processo e propor melhorias na operação, visando redução do tempo produtivo e, conseqüentemente, aumento da capacidade de campo.

Na Figura 26 é possível observar que o momento que toma o maior tempo (33%) é o '4-Retirando o toco', que é justamente o principal momento da atividade, onde ocorre de fato a extração dos tocos.

De todos os momentos classificados, três ('3-Limpeza e/ou procura do toco', 6-Acabamento e 7-Retorno para coleta de toco') podem ser considerados como ineficiência da operação, pois poderiam deixar de existir em uma operação otimizada, ao contrário dos outros quatro momentos que impreterivelmente fazem parte da operação. Somando-se estes três momentos citados têm-se um total de 27%, quantidade de tempo equivalente a 1,48 horas do tempo produtivo que poderia

ser melhorada com adoção de práticas visando otimização da operação. Eliminando todo esse tempo de ineficiência a capacidade de campo operacional poderia chegar a 0,29 ha h⁻¹, valor 31,8% maior do que o atual.

Figura 26 – Distribuição da frequência de cada momento da atividade de destoca

Outro ponto importante a se destacar é a baixa frequência (apenas 1%) do momento '6-Acabamento', o qual representa o retorno do *stump shear* ao buraco de onde o toco saiu para reparar o possível dano causado. Portanto, pode-se concluir que, do ponto de vista operacional da atividade nas condições testadas, apresenta baixo impacto ao solo.

4.1.2 Baldeio de tocos

O tempo do ciclo do baldeio, a uma distância média de 250 metros, foi de 17 minutos, sendo 5 minutos para carregamento e 12 minutos para o deslocamento e descarregamento. Como o carregamento do caminhão deve ser feito com auxílio da escavadora hidráulica e o descarregamento não (por ser basculante), a proporção de caminhões por escavadora hidráulica deve ser 3:1.

A atividade de baldeio de tocos foi composta por apenas uma escavadora hidráulica e um caminhão basculante, entretanto todos os resultados apresentados foram calculados baseados na composição de três caminhões basculantes e uma

escavadora hidráulica, pois esta proporção está diretamente associada à distância média do ciclo e o formato do talhão, que irá guiar a rota do baldeio.

Outro ponto importante que impacta diretamente no ciclo do baldeio é a questão de acesso de estradas que orientará em quais lados do talhão poderá ser empilhada a madeira e/ou toco. Para o ensaio, por questões de acesso de estradas, utilizou-se três lados do talhão conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Ilustração do mapa da pilha de tocos nas 3 faces do talhão

A operação de baldeio de tocos apresentou uma capacidade de campo produtiva de $26,41 \text{ t h}^{-1}$ (Tabela 8). Atuando em uma faixa com largura de 18 metros (6 linhas de tocos) e apresentando uma capacidade de campo 3,4 vezes maior do que a atividade de colheita de tocos. Este resultado deve-se a alguns fatores que diferem as atividades, primeiramente devido a concentração dos tocos em linhas com 18 metros de largura, ou seja, há um menor deslocamento do maquinário dentro do talhão. Outro ponto favorável para uma maior capacidade de campo é a capacidade de carga da garra florestal, sendo possível carregar cerca de 10 tocos, enquanto que a operação de colheita de tocos é feita de forma individual, um por vez.

Figura 28 – Registros fotográficos da operação de baldeio de tocos

4.1.3 Processamento dos tocos

A atividade de processamento dos tocos funcionou de forma semi-estacionária, deslocando-se na borda do talhão de acordo com as pilhas de tocos formadas. A capacidade de campo produtiva foi de $20,30 \text{ t h}^{-1}$, apresentando maior capacidade do que a atividade de colheita de tocos e menor do que a de baldeio de tocos (Tabela 8).

Para a operação de picagem é necessário que existam caminhões disponíveis para o carregamento de cavacos, evitando que haja contato dos cavacos com o chão, para que não ocorra contaminação por sílica do material e para que seja feito o carregamento direto dos caminhões.

Figura 29 – Registros fotográficos da operação de processamento de tocos

4.1.4 Transporte de cavacos dos tocos

O transporte dos cavacos de tocos gerados teve como destino uma usina de cana de açúcar a 34 km de distância da fazenda onde realizou-se o teste. Ao todo foram realizadas 77 viagens com média de 20,7 toneladas em cada caminhão, apresentando uma densidade a granel do material de $187,83 \text{ kg m}^{-3}$.

Por meio dessa distância aliada à capacidade de carga do caminhão (20,7 t), a velocidade média de viagem (60 km/h), mais o tempo de carregamento e descarregamento do caminhão (2,23 h), foi possível calcular o tempo médio de viagem (3,36 h) e, conseqüentemente, a capacidade de campo operacional (CCO) na mesma base das outras operações (em h ha^{-1}).

4.2 Cenário base

Após a coleta dos dados nos ensaios utilizou-se da planilha eletrônica desenvolvida (Excel) para estabelecer as relações entre as variáveis envolvidas. Os valores encontrados no ensaio foram utilizados como entrada de dados para se obter os resultados do desempenho operacional e econômico. A Figura 30 exemplifica a inserção de dados e os resultados obtidos na planilha desenvolvida.

MODELO DE DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA MECANIZADO FLORESTAL - RESET DE ÁREAS

Atividade: Destoca (Colheita de tocos)
Equipamento: Escavadora CAT 336 + Stump shear

ENTRADA DE DADOS

Variáveis relacionadas à Cultura		
Variável	Unidade	Valor
Área trabalhada	ha	10.000
Espaçamento	m	3
Produtividade	t ha ⁻¹	35,12
Nº de Equipamentos	#	1

Variáveis relacionadas à Administração		
Variável	Unidade	Valor
Horas p/ o trabalho	h	45.000
Jornada de Trabalho	ha dia ⁻¹	8
Tempo de parada/turno	h	1
Nº turnos/dia	#	3
Dias p/ o trabalho	#	2.143
Dispon. Mec. Equip.	%	88

Variáveis relacionadas à Operação		
Variável	Unidade	Valor
Tempo de Produção	h	39.491
Tempo de Interrupção	h	999
Tempo de Preparo	h	4.511
Largura de atuação	m	9

Variáveis relacionadas ao Equipamento		
Variável	Unidade	Valor
Valor Equipamento Inicial	R\$	950.000
Valor Residual	%	20
Valor Esteiras Novas	R\$	35.500
Fator de Reparos e Manut.	%	50
Preço combustível	R\$ L ⁻¹	2,52
Consumo combustível	L h ⁻¹	28,00
Preço lubrificantes	R\$ L ⁻¹	15,00
Consumo lubrificantes	L h ⁻¹	0,56
Taxa de juros	% a.a.	12,00
Alojam., Seguros e Taxas	% a.a.	10,00

Variáveis relacionadas à Mão de Obra		
Variável	Unidade	Valor
Salário Operador	R\$ mês ⁻¹	2.600,00
Nº de operadores/turno	#	1,2
Encargos Sociais	%	80,00
Custo de Administração	%	10,00

RESULTADOS

Resultados relacionados à Atividade			
Sigla	Variável	Unidade	Valor
HT/turno	Horas trabalhadas/turno	h	6,16
HT/dia	Horas trabalhadas/dia	h	18,48
HT/ano	Horas Trabalho/Ano	h	39.600
EG	Eficiência Gerencial	%	77,00
TD	Tempo Disponível	h	4.851
NHT	Número Horas Total	h	4.500

Indicadores Operacionais			
Sigla	Variável	Unidade	Valor
RO	Ritmo Operacional	ha h ⁻¹	2,06
CCE	Capac. Campo Efetiva	ha h ⁻¹	0,25
CCO	Capac. Campo Oper.	ha h ⁻¹	0,22
CPr	Capac. de Produção	t h ⁻¹	7,80
NC	Número de Conjuntos	#	10
TM	Tempo Máquina	h ha ⁻¹	4,50
VU	Vida Útil Prevista	anos	5

Custos relacionados à Atividade			
Sigla	Variável	Unidade	Valor
CF	Custo do Equipamento	R\$ h ⁻¹	192,11
CV	Custo da Operação	R\$ h ⁻¹	97,96
CMO	Custo de Mão de Obra	R\$ h ⁻¹	13,89
CAD	Custo de Administração	R\$ h ⁻¹	1,39
CUSTO TOTAL			R\$ h ⁻¹ 305,35
CUSTO OPERACIONAL			R\$ ha ⁻¹ 1374,09
CUSTO DE PRODUÇÃO			R\$ t ⁻¹ 39,13

Figura 30 – Exemplo de entrada de dados e obtenção de resultados na planilha desenvolvida

Os resultados a seguir são referentes a um cenário base com uma área disponível de trabalho de 10.000 hectares no ano e produção de 35,12 t ha⁻¹, sendo apresentados de forma separada de acordo com cada atividade.

O tempo disponível no ano calculado para todas as três atividades (colheita, baldeio e processamento dos tocos) foi de 4.851 horas, considerando-se uma jornada de trabalho de oito horas diárias (1 hora de almoço) e regime de três turnos por dia. O ritmo operacional das atividades encontrado foi de 2,1 ha h⁻¹ ou 72,4 t h⁻¹.

4.2.1 Desempenho econômico

Após definição das premissas do cenário base e inserção na planilha calculou-se a quantidade de equipamentos necessária para execução da operação e os resultados de desempenho econômico (Custo Total, Operacional e Produtivo) do projeto, apresentados na Tabela 9. São necessários dez conjuntos para a operação de destoca, três para o baldeio de tocos e quatro para o processamento.

Tabela 9 – Resultados do desempenho econômico das operações

Operação	Equipamento	Desempenho Econômico			
		NC	Custo Total (R\$ h ⁻¹)	Custo Operacional (R\$ ha ⁻¹)	Custo Produtivo (R\$ t ⁻¹)
Destoca	Escav. + <i>Stump shear</i>	10	305,35	1.374,09	39,13
Baldeio	Escav. + Garra flor.	3	258,50	343,81	9,79
	Caminhão bascul.		99,80	132,74	3,78
Processamento	Escav. + Garra flor.	4	262,82	454,68	12,95
	Picador		725,52	1.255,15	35,74
Transporte*	Caminhão			762,87	21,72
TOTAL			1.651,99	4.323,34	123,10

*Nota: considerando distância de 34 km

NC: número de conjuntos

Casselli (2013) estudando remoção de tocos com sistema de serra tubular, chegou a um custo de R\$ 8.159,65 por hectare com serra tubular e R\$ 1.178,87 com escavadora com pinça acoplada. O custo da serra tubular está bem acima (5,9 vezes maior) do que o resultado encontrado com o implemento *stump shear*, enquanto que o valor da pinça acoplada aproximou-se mais, 15% menor. Estes resultados corroboram a similaridade das atividades que atuam com o mesmo princípio de remoção de tocos.

Martins et al. (2009) estudando o impacto na colheita de diferentes espaçamentos e arranjos de plantio de eucalipto, chegaram a um custo de U\$ 113,28 por hora efetiva trabalhada, resultado semelhante ao encontrado por Fernandes et al. (2013), que avaliaram o desempenho de um *harvester* sob diferentes condições de terreno e produtividade, encontraram um custo de U\$ 116,49 a uma taxa de conversão de 2,033, ou seja, um custo de R\$ 236,82, cerca de 22% mais barato quando comparado à atividade de colheita de tocos.

A atividade de baldeio de tocos é composta por dois equipamentos (escavadora hidráulica e caminhão basculante) enquanto a extração de madeira é

realizada com apenas um equipamento, o *forwarder*, implicando custo maior quando comparadas.

O custo horário da operação de baldeio de tocos foi de R\$ 358,31, valor cerca de 3,5 vezes maior do que o custo encontrado por Leite et al. (2014a), que avaliaram o desempenho da extração de madeira pelo *forwarder*, e encontraram um custo da atividade de R\$ 100,44 h⁻¹.

Quanto ao transporte, baseado no custo contratado de R\$ 0,12 km⁻¹ m⁻³ e na densidade a granel, o custo de frete do caminhão com capacidade de 110 m³ (ou 20,7 t) foi de R\$ 21,72 por tonelada (Tabela 9). O frete é muito sensível a distância adotada, podendo viabilizar ou não o projeto. A variação do custo de transporte de acordo com a distância adotada é apresentada na Figura 31.

Figura 31 – Custo do frete variando de acordo com a distância

Rangel et al. (2008) analisando o frete de cana de açúcar no Rio de Janeiro, com um caminhão de 80 m³ e uma distância de 31 a 35 km, consideraram um custo de R\$ 5,72 por tonelada transportada. Valor este que é quase quatro vezes menor do que o encontrado no transporte de cavacos de toco de eucalipto.

Canto et al. (2011) estudando um sistema de cavaqueamento de ponteiros de eucalipto para aproveitamento energético, consideraram um preço de frete de R\$ 0,88 por tonelada transportada por quilômetro, ou seja, 38% maior do que o transporte de cavacos de tocos de eucalipto, considerando as premissas citadas, chegando a R\$ 0,64 por tonelada por quilômetro.

4.2.1.1 Análise geral do desempenho econômico

Após a geração do cenário base e considerando o custo FOB (*Free On Board*) da biomassa gerada, realizou-se uma análise geral observando-se que a atividade mais cara do processo é o processamento dos tocos, devido ao alto valor de aquisição do equipamento (picador) e consumo de combustível. A atividade de processamento representa 48% dos custos gerais com a operação de remoção dos tocos (Figura 32).

Figura 32 – Impacto de cada operação na composição dos custos

Se alterarmos as variáveis produtividade e área na planilha eletrônica criada é possível analisar o impacto no custo final das atividades, que está diretamente ligado ao número de conjuntos necessários para execução das atividades, conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Análise da variação da área e produtividade no custo

Produtividade (t ha ⁻¹)	Custo de Produção (R\$ t ⁻¹)			
	Área (ha)			
	100	1.000	10.000	100.000
29	1.693,49	207,62	122,77	116,01
31	1.584,23	194,23	114,85	108,53
33	1.488,22	182,46	107,89	101,95
35	1.403,18	172,03	101,73	96,12
37	1.327,33	162,73	96,23	90,93
39	1.259,26	154,39	91,29	86,27

É possível observar que a partir de áreas acima de 10.000 hectares não há aumento significativo do custo final das operações, visto que é possível dimensionar adequadamente sem desperdícios de conjuntos ociosos. A ociosidade de equipamentos ocorre em áreas menores, como a de 100 hectares, o que implica em um aumento no custo operacional devido aos custos fixos dos equipamentos.

Vale ressaltar que todo o trabalho foi desenvolvido com foco em resolver um problema silvicultural existente que é a presença de tocos, por isso a variável considerada é área, em hectares, a ser trabalhada. Caso o foco seja geração de biomassa de tocos de eucalipto é possível considerar a demanda, em toneladas, a ser comercializada como uma variável.

Analisando-se o custo final da biomassa gerada, acrescida da operação de transporte, chegou-se a um valor de R\$ 123,10 por tonelada (Tabela 11). Este valor é inferior aos R\$ 130,00 por tonelada praticados pela usina de cana-de-açúcar para compra de biomassa.

Tabela 11 – Resumo da capacidade de campo e custo de cada operação

Operação	Capacidade de Campo				Custo	
	ha h ⁻¹	t h ⁻¹	ha ano ⁻¹	t ano ⁻¹	R\$ ha ⁻¹	R\$ t ⁻¹
Destoca	0,22	7,80	10.780	378.594	1.374,09	39,13
Baldeio	0,75	26,41	10.942	384.286	476,55	13,57
Processamento	0,58	20,30	11.216	393.908	1.709,84	48,69
Transporte					762,87	21,72
TOTAL			10.780	378.594	4.323,34	123,10

4.2.1.2 Viabilidade econômica

Considerando o custo final de produção de uma tonelada de cavacos de tocos de eucalipto, que foi de R\$ 123,10, e o preço praticado pela usina de cana-de-açúcar, que é de R\$ 130,00 por tonelada, obtêm-se uma economia de R\$ 6,90 para cada tonelada consumida. De acordo com uma produção anual de 378.594 toneladas (Tabela 11), taxa de juros de 10,20%, valor de investimento dos equipamentos e horizonte de análise de 5 anos (tempo da vida útil dos equipamentos), calculou-se os indicadores econômicos do projeto, os quais podem ser vistos na Tabela 12.

Tabela 12 – Indicadores econômicos do projeto

Indicadores econômicos		
VPL	R\$	8.601.606,64
TIR		48%
Payback		2 anos

O projeto apresentou resultados econômicos positivos, com VPL na ordem de R\$ 8,6 milhões, TIR de 48% e um *Payback* para 2 anos. Vitale e Miranda (2010) estudando a viabilidade econômica de um plantio de *Eucalyptus dunnii* encontraram um VPL de R\$ 38 milhões, valor 4,4 vezes maior do que o encontrado neste trabalho. Lembrando que a geração de madeira é o primeiro objetivo da floresta de eucalipto e a utilização dos tocos para geração de energia é um aproveitamento de resíduo.

Cabe salientar que a distância até o destino final se torna um ponto chave no processo, o que pode inviabilizar ou não a sua comercialização. Na Figura 33 é possível analisar o custo final da biomassa gerada variando de acordo com a distância adotada, utilizando-se o valor de R\$ 130,00 por tonelada como o ponto de equilíbrio.

Figura 33 – Variação do custo final de biomassa com distância de frete

É possível observar que a economia praticada ocorre apenas para distâncias menores do que 44,8 km, ponto na Figura onde o custo final atinge o ponto de equilíbrio (R\$ 130,00 t⁻¹), mas ainda sem retornar o valor investido nos equipamentos. Analisando ainda o VPL do projeto, a distância máxima para que o projeto seja positivo é de 40 km. Acima desta distância, o projeto não é viável.

Na Tabela 13 é possível observar o indicador de viabilidade econômica do projeto em relação à distância do campo ao destino e o tamanho da área. O valor em destaque corresponde ao cenário base.

Tabela 13 – VPL (em milhões de R\$) em função da variação da área trabalhada e da distância de transporte

Distância (km)	VPL (em milhões de R\$)					
	Área (ha)					
	1.000	5.000	10.000	50.000	100.000	1.500.000
10	-14,8	14,0	39,3	253,6	513,5	7.890,9
20	-16,1	7,6	26,5	193,6	394,3	6.108,2
30	-17,4	1,2	13,7	133,6	275,2	4.325,5
34	-17,9	-1,4	8,6	109,6	227,5	3.612,5
40	-18,7	-5,2	0,9	73,7	156,1	2.542,8
50	-19,9	-11,6	-11,9	13,7	36,9	760,1
60	-21,2	-18,0	-24,7	-46,3	-82,2	-1.022,6
70	-22,5	-24,4	-37,5	-106,3	-201,3	-2.805,3

Com o emprego do modelo, o valor mínimo de área para viabilidade financeira é de 3.120 hectares, independente da distância adotada. A mesma análise é feita com o valor máximo de distância que é de 53 km, independentemente do tamanho da área trabalhada, limitando o uso dessa fonte alternativa de biomassa a um raio curto. Desta forma, é possível conhecer os limites de viabilidade financeira do projeto para embasar as tomadas de decisão acerca do empreendimento.

4.2.2 Desempenho energético

Para análise do desempenho energético do sistema considerou-se: as energias de entrada, decorrentes dos resultados operacionais obtidos e índices energéticos de cada parâmetro; energia de saída, proveniente da caracterização energética do material gerado (cavaco de tocos). Após cálculo das energias, realizou-se o balanço energético para se conhecer os indicadores de eficiência energética do sistema, confirmando sua viabilidade ou não.

4.2.2.1 Fluxos de energia do sistema (energia de entrada)

Considerando-se os resultados encontrados para cada operação (Tabela 14) foram determinados os fluxos de material demandados na produção da biomassa oriunda de cavacos de tocos de eucalipto. Na operação de transporte utilizou-se a

distância de 34 km (68 km ida e volta), considerando a origem da produção de cavaco no campo até o destino final.

Tabela 14 – Detalhe da CCO e consumos de cada operação

Operação	Consumo diesel (l h⁻¹)	Consumo lubrificante (l h⁻¹)	CCO (h ha⁻¹)
Destoca	28,00	0,56	4,50
Baldeio	33,50	0,92	1,33
Processamento	82,88	0,47	1,73
Transporte	4,00	-	5,72
Total	148,38	1,95	13,28

Para análise dos fluxos de material os insumos considerados como fatores de produção no sistema foram: combustível, depreciação energética do maquinário, mão de obra e lubrificantes. Esses fatores de produção foram utilizados em todas as operações, sendo posteriormente somados para indicar o seu consumo total (Tabela 15).

Tabela 15 – Fluxo de material na produção de cavacos de tocos de eucalipto

Operação	Valores dos fluxos de material			
	Combustível (l ha⁻¹)	Maquinário (depreciação) - kg ha⁻¹	Mão de obra (h ha⁻¹)	Lubrificante (l ha⁻¹)
Destoca	126,0	6,5	4,5	2,5
Baldeio	44,6	1,4	1,3	1,2
Processamento	143,4	3,1	1,7	0,8
Transporte	22,9	4,7	5,7	-
Total	336,8	15,7	13,3	4,6

4.2.2.2 Caracterização do material (energia de saída)

Após o processamento dos tocos, coletou-se quatro amostras de cavacos provenientes de tocos de eucalipto que foram enviados para análise laboratorial. Na Tabela 16 observa-se a característica do material baseado na média das amostras coletadas.

Tabela 16 – Resultado da análise laboratorial do cavaco de tocos de eucalipto

AMOSTRA	Umidade (%)	Poder Calorífico Superior (kcal kg ⁻¹)	Poder Calorífico Inferior (kcal kg ⁻¹)	Poder Calorífico Útil (kcal kg ⁻¹)
1	24,8	4.538	4.224	3.027
2	23,1	4.512	4.508	3.097
3	21,7	4.308	4.004	3.005
4	24,6	4.579	4.275	3.075
MÉDIA	23,55	4.484	4.253	3.051 (12.774 MJ t⁻¹)

Gomez et al. (2014) caracterizando física e quimicamente tocos de eucalipto encontraram um poder calorífico superior de 4.466 kcal kg⁻¹ e teor de umidade de 17%, valores estes que foram similares a este trabalho, onde apresentou-se 4.484 kcal kg⁻¹ e teor de água de 23%.

Do início das operações de destoca até o processamento levou-se de 90 a 110 dias. Um maior período de secagem está ligado a um menor teor de água e, conseqüentemente, maior poder calorífico material. Entretanto, entende-se que a secagem feita ao tempo compete com a necessidade de liberação da área para reforma silvicultural, onde sempre é visado um menor período de tempo visando reduzir a ociosidade da terra.

4.2.2.3 Balanço energético do sistema

Os valores dos fluxos de material agrupados por tipo de insumo e seus respectivos índices de energia encontram-se na Tabela 17, apresentando-se também em base anual (considerando um ciclo de 7 anos para o eucalipto) para facilitar comparativos com sistemas de produção de biomassa em períodos de rotação distintas.

Tabela 17 – Análise de energia do sistema de produção de destoca florestal

Insumos	Energia de entrada					
	Quantidade	Unid.	Índice energ.	Total	Anualizado	%
	Unid ha ⁻¹		MJ unid ⁻¹	MJ ha ⁻¹	MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	
Combustível	336,8	L	38,6	13.000,7	1.857,2	91,0
Maquinário	16,1	kg	68,9	1.080,0	154,3	7,6
Mão de obra	13,3	h	2,2	29,2	4,2	0,2
Lubrificante	4,6	L	38,6	175,6	25,1	1,2
TOTAL				14.285,6	2.040,8	
Energia de saída						
Biomassa	35,1	t	12.773,9	448.620,3	64.088,6	

Somando-se os fatores de produção para cada operação, obteve-se a energia de entrada (EE) total do sistema, que foi de 14.285,6 MJ ha⁻¹. Oliveira Júnior (2005) obteve 17.995,60 MJ ha⁻¹ de investimento energético das atividades de silvicultura mecanizada, sendo o maior investimento energético encontrado na atividade de transplante, devido à baixa produtividade da operação.

Nas entradas de energia, analisando-se as participações de cada insumo, conclui-se que o combustível, com 91%, é a atividade com maior impacto no investimento energético total. Valor este que é semelhante ao encontrado por Oliveira Junior e Seixas (2006) analisando dois sistemas mecanizados de colheita em eucalipto, onde 93,3% da demanda energética foi devida ao consumo de combustível.

Para determinar a energia de saída (ES), utilizou-se análise laboratorial da biomassa realizada (Tabela 16), que apontou um poder calorífico útil (PCU) de 3.051 kcal kg⁻¹ do material, a uma umidade de 23,55%, ou seja, 448.620,3 MJ ha⁻¹, afirmando que o balanço energético do sistema é positivo.

Sendo assim, os indicadores de fluxos de energia do sistema (Tabela 18), EROI (30,4), balanço de energia (434.335 MJ ha⁻¹) e intensidade energética (406,8 MJ t⁻¹) foram calculados. Os dois primeiros, EROI e balanço de energia, foram anualizados para efeitos comparativos.

Tabela 18 – Indicadores de eficiência energética do sistema

Indicadores	Valor	Unidade
EROI	30,4	-
EROI anualizado	4,3	ano ⁻¹
BE	434,3	GJ ha ⁻¹
BE anualizado	62,0	GJ ha ⁻¹ ano ⁻¹
IE	406,8	MJ t ⁻¹

Os resultados obtidos ilustram que o balanço energético do sistema é positivo, portanto pode-se dizer que do ponto de vista energético as operações são viáveis.

O EROI anualizado obtido no sistema mecanizado de destoca florestal foi de 4,3. Campos et al. (2005) e Oliveira et al. (2005) estudando culturas agrícolas, produção de feno de *Cynodon dactylon* e produção de etanol de cana-de-açúcar, encontraram valores de EROI similares, 4,3 e 3,7, respectivamente. Já Romanelli

(2007) trabalhando com um sistema de produção de eucalipto obteve um EROI de 8,4, quase 2 vezes a mais que o obtido neste trabalho com destoca florestal.

4.3 Análise de sensibilidade

Após os resultados do cenário base realizou-se uma análise de sensibilidade por meio da variação dos principais fatores relevantes ao processo, alterando os indicadores de viabilidade financeira e energética do sistema. Esta análise foi realizada no molde *ceteri-paribus*, onde cada parâmetro variou em intervalo de 20% para mais e para menos enquanto os outros parâmetros se mantiveram constantes. A análise avalia quais os parâmetros possuem maior impacto sobre o VPL do projeto (Figura 34).

Figura 34 – Comportamento da viabilidade financeira de acordo com as variações dos parâmetros

Observa-se na Figura 34 que as variáveis ‘Preço de venda da biomassa’ e ‘Produtividade’ são os fatores que mais influenciam na viabilidade econômica da atividade, destacando-se como pontos de atenção pelo gestor do empreendimento. Além destes dois parâmetros citados, nota-se que a variação em -10% dos parâmetros de ‘Valor do equipamento’ e ‘CCO’ são suficientes para deixar o VPL do projeto negativo.

A ordem dos parâmetros que mais afetam os resultados do VPL pode ser observada na Figura 35.

Figura 35 – Ordem dos parâmetros que mais impactam a viabilidade do projeto

Observa-se que dos sete parâmetros analisados, três deles ('Consumo do combustível', 'Custo de reparos e manutenção' e 'Custo de mão de obra') mesmo com reduções de 20% nos valores base não inviabilizam financeiramente o projeto. O VPL do cenário base (na ordem de 8 milhões de reais) pode ser maximizado em até sete vezes, de acordo com o melhor cenário analisado, onde considera-se um aumento de 20% no preço de venda da biomassa gerada.

A variação desses parâmetros implica também em alteração do balanço energético do sistema. Apenas os parâmetros de 'Produtividade', 'CCO' e 'Consumo de combustível' impactam na energia do sistema, visto que os demais parâmetros são todos relacionados a desembolsos, não havendo ligação com os itens que impactam a análise energética.

Figura 36 – Variação do balanço energético de acordo com variação nos parâmetros

A Figura 36 ilustra o comportamento do balanço energético de acordo com a variação destes parâmetros, mostrando que a produtividade altera significativamente o sistema. Mesmo uma alteração de -20% em qualquer parâmetro analisado não deixa o balanço energético negativo. No pior cenário considerado, redução da produtividade, o balanço energético fica em 345 GJ ha⁻¹. No melhor cenário pode chegar a 524 GJ ha⁻¹, 21% a mais que o valor do cenário base.

5 CONCLUSÕES

O sistema mecanizado empregado para a destoca e retirada dos resíduos, tocos e raízes, é viável operacional e economicamente.

As restrições do uso desse sistema referem-se à área mínima e a distância de transporte.

Variações na produtividade, preço de venda da biomassa e capacidade de campo operacional impactam sensivelmente na viabilidade econômica do projeto.

O aproveitamento dos tocos como fonte de geração de energia tem um balanço energético favorável.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING. ASAE EP496.2: agricultural management data. In: _____. **ASAE Standards**. St. Joseph, 1998. p.354-359.

ARTHUR JUNIOR, J.C. Manejo dos resíduos florestais. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 1., 2008, Curitiba. Disponível em: <<http://www.ipef.br/eventos/2008/ebs2008/03-arthur.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/index.php>>. Acesso em: 26 ago. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2013**: ano base 2012. Brasília, 2013. 142 p.

BARNES, R.M. **Estudo de tempos e movimentos**: projeto e medida do trabalho. 6. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1977. 635 p.

BUENO, O.C.; QUINTANA, N.R.G. Avaliação energética do preparo do solo para implantação da cultura de eucalipto: subsídio para uma análise de sustentabilidade. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, 5., 2004, Campinas. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000100026&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 14 mar. 2016.

CAMPOS, A.T.; SAGLIETTI, J.R.C.; CAMPOS, A.T.; BUENO, O.C. Análise energética na produção de feno de *Cynodon dactylon* (L.) PERS. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 349-358, 2005.

CANTO, J.L. do. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia**. 2009. 121 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2009.

CASSELLI, V. **Remoção de tocos de eucalipto com sistema de serra tubular**. 2013. 111 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_272.html>. Acesso em: 20 ago. 2015.

COUTO, L.; MÜLLER, M.D. Florestas energéticas no Brasil. In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GOMEZ, E.O. (Org.). **Biomassa para energia**. Campinas: Ed. UNICAMP, 2008. v. 1, p. 93-108.

COUTO, L.; FONSECA, E.M.B.; MÜLLER, M.D. **O estado da arte das plantações de florestas de rápido crescimento para produção de biomassa para energia em Minas Gerais**: aspectos técnicos, econômicos sociais e ambientais. Belo Horizonte: CEMIG, 2000. 44 p.

CUNHA, M.P.S.C.; PONTES, C.L.F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M.T.F.D.; CUNHA NETO, Z.B.; BARBOSA, A.P.R. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E USP, EESC, LaMEN, v. 2, p. 93-121.

DAL FARRA, F.C.P.; ESPERANCINI, M.S.T. Análise econômico-energética de utilização de resíduos industrial florestal para geração de energia térmica: um estudo de caso. **Energia Agrícola**, Botucatu, v. 20, n. 3, p. 76-88, 2005.

FAO. **Energy conservation in the mechanical forest industries**. Rome, 1990. 130 p. (FAO. Forest Paper, 93).

FERNANDES, H.C.; BURLA, E.R.; LEITE, E.S.; MINETTE, L.J. Avaliação técnica e econômica de um “Harvester” em diferentes condições de terreno e produtividade da floresta. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 97, p.141-151, mar. 2013.

FOELKEL, C. O problema dos tocos residuais das florestas plantadas de eucaliptos. **Eucalyptus Newsletter**, n. 45, fev. 2014. Disponível em: <http://www.eucalyptus.com.br/artigos/news45_Cepas_Tocos.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2016.

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

FOREST RESEARCH. **Stump harvesting: interim guidance on site selection and good practice**. Edinburgh: The Research Agency of the Forestry Commission, 2009. 19 p.

GARLIPP, R.; FOELKEL, C. O papel das florestas plantadas para atendimento das demandas futuras da sociedade. In: CONGRESSO FLORESTAL MUNDIAL/FAO, 13., 2009, Buenos Aires. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2009. p. 1-18.

GAVA, J.L. Cultivo mínimo de solos com textura arenosa em áreas planas e suave-ondulada. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. cap. 5, p. 221-244.

GOLDEMBERG, J. **Energia, meio ambiente & desenvolvimento**. São Paulo: EDUSP, 1998. 125 p.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 7-20, jan./abr. 2007.

GOMEZ, F.; ALMEIDA, A.; WANDERLEY, C.W.C.; HAKAMADA, R.E. Caracterização físico-química de tocos de eucalipto para produção de energia. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SISTEMAS DE COLHEITA DE MADEIRA E TRANSPORTE FLORESTAL, 18., 2014, Mogi Guaçu. **Anais...** Curitiba: Artes & Textos, 2014. p.173-184.

GONÇALVES, J.L.M. Cultivo mínimo: situação atual e perspectivas. In: SEMINÁRIO SOBRE SILVICULTURA EM FLORESTAS PLANTADAS, 1., 2004, Vitória. **Anais...** Viçosa: SIF; UFV, DEF, 2004. v. 1, p. 113-150.

_____. Cultivo mínimo aumenta produção florestal. **Visão Agrícola**, Piracicaba, n. 9, p. 183-186, jul./dez. 2009.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed.). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. 498 p.

GRAÇA, L.R.; CAMPOS, C.H.O. Análise do aproveitamento econômico do resíduo florestal. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Curitiba, n. 13, p. 35-45, 1986.

HAAG, H.P. **Ciclagem de nutrientes em florestas tropicais**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 144 p.

HAKKILA, P. **Mechanized harvesting of stump and roots**: a sub-project of the Nordic research programme for the utilization of logging residues. Helsinki: Fenniae, 1972. 69 p.

_____. **Utilization of residual forest biomass**. Berlin: Springer-Verlag, 1989. 568 p. (Springer Series in Wood Science).

HOJI, M. **Administração financeira**: uma abordagem pratica. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2006. 525 p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2015**. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2016.

KARJALAINEN, T.; ASIKAINEN, A.; ILAVSKY, J.; ZAMBONI, R.; HOTARI, K.E.; RÖSER, D. **Estimation of energy wood potential in Europe**. Vantaa, 2004. (Working Paper of the Finnish Forest Research Institute). <<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2004/mwp006.htm>>. Acesso em: 29 jan. 2016.

LEITE, E.S.; FERNANDES, H.C.; MINETTE, L.J.; SOUZA, A.P.; LEITE, H.G.; GUEDES, I.L. Modelagem do desempenho da extração de madeira pelo "Forwarder". **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 879-887, 2014a.

LEITE, E.S.; MINETTE, L.J.; FERNANDES, H.C.; SOUZA, A.P.; AMARAL, E.J.; LACERDA, E.G. Desempenho do harvester na colheita de eucalipto em diferentes espaçamentos e declividades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 1, 2014b.

LOCONTE, C.O.; GARCIA, J.N.; LIMA, I.L. A problemática dos tocos na atividade florestal em pequenas propriedades rurais. In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 18., 2010, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 2010. 1 CD-ROM.

LOPES, S.E.; FERNANDES, H.C.; MINETTE, L.J.; SILVEIRA, J.C.M.; RINALDI, P.C.N. Avaliação técnica e econômica de um “skidder” operando em diferentes produtividades e distâncias de extração. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 6, p. 1621-1626, nov./dez. 2009.

LORA, E.E.S.; ANDRADE, R.V. Geração de energia e gaseificação de biomassa. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 3, p. 311–320, 2004.

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

MACHADO, C.C.; MALINOVSKI, J.R. **Ciência do trabalho florestal**. Viçosa: UFV, 1988. 65 p.

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

MALINOVSKI, R.A.; MALINOVSKI, J.R. **Evolução dos sistemas de colheita de Pinus na região sul do Brasil**. Curitiba: FUPEF, 1998. 138 p.

MILAN, M. **Gestão sistêmica e planejamento de máquinas agrícolas**. 2004. 100 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

MILAN, M.; ROSA, J.H.M. Corte, transbordo e transporte (CTT): aspectos relevantes e uso de modelagem para o CTT. In: BELARDO, G.C.; CASSIA, M.F.; SILVA, R.P. da. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: SBEA, 2015. p. 415-427.

MOTTA, R.R.; CALÔBA, G.M. **Análise de investimentos**: tomada de decisão em projetos industriais. São Paulo: Atlas, 2002. 391 p.

NAUTIYAL, J.C. **Forest economics**: principles and applications. Toronto: Canadian Scholars' Press, 1988. 851 p.

OLIVEIRA, M.E.D.; VAUGHAN, B.E.; RYKIEL JR., E.J. Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint. **BioScience**, Washington, v. 55, n. 7, p. 593-602, 2005.

OLIVEIRA JÚNIOR, E.D. **Análise energética de dois sistemas de colheita mecanizada de eucalipto**. 2005. 76 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) — Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

OLIVEIRA JUNIOR, E.D.; SEIXAS, F. Análise energética de dois sistemas mecanizados na colheita do eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 70, p. 49-57, abr. 2006.

POGGIANI, F. **Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de plantações florestais de *Eucalyptus* e *Pinus***: implicações silviculturais. 1985. 211p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

RANGEL, J.J.A.; CUNHA, A.P.; PACHECO, A.P.; MORGADO, I.F.; MONTANÉ, F.A.T. Simulação computacional para análise do frete no transporte de cana-de-açúcar: um estudo de caso no estado do Rio de Janeiro. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, Niterói, v. 3, n. 3, p. 250-261, set./dez. 2008.

RATHKE, G-W.; WIENHOLD, B.J.; WILHELM, W.W.; DIEPENBROCK, W. Tillage and rotation effect on corn-soybean energy balances in Eastern Nebraska. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 97, p. 60-70, 2007.

REZENDE, J.L.P.; OLIVEIRA, A.D. **Análise econômica e social de projetos florestais**. Viçosa: UFV, 2001. 389 p.

ROGERO, M. Poder calorífico superior da madeira de *Eucalyptus urograndis*. In: In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 19., 2011, Piracicaba. **Anais...** São Paulo: USP, 2011. 1 CD-ROM.

ROMANELLI, T.L. **Sustentabilidade energética de um sistema de produção da cultura de eucalipto**. 2007. 122 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

ROMANELLI, T.L.; MILAN, M. Material flow determination through agricultural machinery management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 4, p. 375-383, 2010a.

_____. Energy performance of a production system of eucalyptus. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 8, p. 896-903, 2010b.

ROMANELLI, T.L.; RAUCCI, G.S. Biomassa de pastagens para a produção de energia. In: PEDREIRA, C.G.S.; MOURA, J.C.; FARIA, V.P. (Ed). **A empresa pecuária baseada em pastagens**. Piracicaba: FEALQ, 2011. p. 159-187.

RUMMER, R.; SEIXAS, F. Colheita de resíduos florestais para bionergia nos EUA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 8., 2007, Uberlândia **Anais...** Uberlândia: SIF, 2007. p. 19-40.

SESSIONS, J. Cost control in logging and road construction. In: FAO. **Appropriate wood harvesting in plantation forest**. Rome, 1987. p. 95-134. (FAO. Forestry Paper, 78).

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

SILVA, J.R.; FENNER, P.T.; CATANEO, A. Avaliação do desempenho operacional de trator florestal Feller buncher. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 6, n. 1, p. 29-34. 2007.

SILVA, M.L.; FONTES, A.A.; LEITE, H.G. Rotação econômica em plantações de eucalipto não desbastadas e destinadas a multiprodutos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 403-412, 1999.

SOUZA, M.M. **Caracterização e viabilidade econômica do uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda* L.** 2010. 77 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VITALE, V.; MIRANDA, G.M. Análise comparativa da viabilidade econômica de plantios de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii* na região Centro-Sul do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 3, p. 469-476, jul./set. 2010.

VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: Ed. UFPR, 2001. 185 p.

WARD, A.D.; ELLIOT, W.J. **Environmental hidrology**. New York: Lewis Publ., 1995. 496 p.

WERNKE, R. Aplicações do conceito de valor presente na contabilidade gerencial. **Revista Brasileira de Contabilidade**, Brasília, v. 29, n. 126, p. 27-34, nov./dez. 2000.

ZEN, S.; YONEZAWA, J.T.; FELDEBERG, J.E. Implantação de florestas no sistema de cultivo mínimo. In SEMINÁRIO SOBRE CULTIVO MÍNIMO DO SOLO EM FLORESTAS, 1., 1995, Curitiba. **Anais...** Curitiba: CNPFloresta; IPEF; UNESP; SIF; FUPEF, 1995. p. 65-72.

ANEXOS

Anexo A

PLANILHA DE ESTUDOS DE TEMPOS E MOVIMENTOS - DESTOCA			
ASSUNTO:	Operação de destoca	OPERADOR:	Cristiano
SITUAÇÃO DO TRABALHO:	2 LINHAS () 3 LINHAS (X) 4 LINHAS ()	ESPAÇAMENTO:	3,3 x 2
HORA INICIAL:		DATA:	
HORA FINAL:		FAZENDA:	Sinimbu
MAQUINA:	CAT 336	UP:	51
TEMPO:	30 MINUTOS (X) 1 HORA ()	CONVERSÃO:	

ITEM	MOVIMENTOS - AMOSTRA 1	VALOR	%
1	Deslocamento máquina	7	5,83%
2	Movimentação da lança	16	13,33%
3	Limpeza e/ou procura do toco	7	5,83%
4	Retirando o toco	44	36,67%
5	Enleiramento	30	25,00%
6	Acabamento	2	1,67%
7	Retorno para coleta de toco	14	11,67%
	Nº de movimentos	120	100,00%
	Nº de tocos retirados	154	-

ITEM	MOVIMENTOS - AMOSTRA 2	VALOR	%
1	Deslocamento máquina	6	5,00%
2	Movimentação da lança	10	8,33%
3	Limpeza e/ou procura do toco	28	23,33%
4	Retirando o toco	33	27,50%
5	Enleiramento	26	21,67%
6	Acabamento	2	1,67%
7	Retorno para coleta de toco	15	12,50%
	Nº de movimentos	120	100,00%
	Nº de tocos retirados	113	-

ITEM	MOVIMENTOS - AMOSTRA 3	VALOR	%
1	Deslocamento máquina	3	2,50%
2	Movimentação da lança	17	14,17%
3	Limpeza e/ou procura do toco	12	10,00%
4	Retirando o toco	40	33,33%
5	Enleiramento	30	25,00%
6	Acabamento	0	
7	Retorno para coleta de toco	18	15,00%
	Nº de movimentos	120	100,00%
	Nº de tocos retirados	134	-

1	Deslocamento Máquina: Do momento que a máquina de esteira se desloca dentro da UP até realizar outro movimento.
2	Movimentação da lança: Do momento que a máquina movimenta a lança em busca do toco.
3	Limpeza e/ou procura do toco: Momento que mexe a pinça a procura do toco, ou faz limpeza da região.
4	Retirada do toco: Do momento que a lança abaixa para coletar o toco até o momento que içe o toco do solo.
5	Enleiramento: Do momento que o toco foi içado do solo até a colocação dele na linha enleirada.
6	Acabamento: Do momento que a pinça terminou de enleirar, ou de içar o toco e retorna a um buraco para ajeita-lo.
7	Retorno para coleta de toco: Do momento que a pinça terminou de enleirar, ou de içar o toco e retorna para coletar restos do toco retirado previamente.

Anexo B

BIOENERGIA E BIOPRODUTOS DE BASE FLORESTAL

RESULTADOS DE ANÁLISES

1. Interessado

Nome Oper Flora – Operações Florestais
Contato

Fone
E-mail
Observações -

2. Demanda

Material	Biomassa
Lote (Amostra)	2014 -02
Data da coleta	25/04/2014
Peso da amostra (g)	1 kg
Determinações	Teor de Umidade, Densidade a Granel, Poder Calorífico, Granulometria e Contaminantes
Data da análise	05/05/2013 a 08/05/2014

3. Resultados

AMOSTRA	U	PCS	PCI	PCU	NCT	NCO	NCE	TAE	DG
E 1	24,8	4528	4224	3027	1,34	1,33	0,01	0,75	106,9
E2	23,1	4512	4508	3097	2,15	1,91	0,24	11,16	146,8
E 3	21,7	4308	4004	3005	15,53	6,44	9,09	58,53	146,3
E 4	24,8	4579	4275	3075	6,86	5,47	1,39	20,26	134,1

DG = Densidade a Granel (kg/m^3)
U = Teor de Umidade (%)
PCS = Poder Calorífico Superior (kcal/kg)
PCI = Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)
PCU = Poder Calorífico Útil (kcal/kg)
NCT = Contaminante Sólido Não Combustível Total (%)
NCO = Contaminante Sólido Não Combustível Original (%)
NCE = Contaminante Sólido Não Combustível Externamente Adquirido (%)
TAE = Taxa de Aquisição de Contaminante Externo (%)

BIOENERGIA E BIOPRODUTOS DE BASE FLORESTAL

Granulometria

Amostra	% Massa / Faixa granulométrica				
E 1	(A)26,21	(B)37,96	(C)24,08	(D)7,45	(E)4,29
E 2	(A)37,60	(B)24,66	(C)24,45	(D)7,72	(E)5,57
E 3	(A)38,83	(B)18,43	(C)21,91	(D)7,23	(E)13,59
E 4	(A)44,89	(B)10,15	(C)26,30	(D)7,74	(E)10,92

A = > 31,5 mm
 B = entre 31,5 e 16 mm
 C = entre 16 e 8 mm
 D = entre 8 e 4 mm
 E = menor que 4 mm

() Resultados Parciais (x) Resultados Finais
 Analista: Técnico Químico Udemilson Luiz Ceribelli
 Aprovação: Prof. José Otávio Brito

Data: 29/05/2014

Anexo C

COLETA DE DADOS									
Operação:		Colheita de Tocos		Data:		23/09/2013 a 10/11/2013			
Ensaio:	1	Ensaio:	2	Ensaio:	3	Ensaio:	4		
Área trabalhada (ha):	1,27	Área trabalhada (ha):	1,20	Área trabalhada (ha):	1,24	Área trabalhada (ha):	1,33		
Tempo produção (h):	5,18	Tempo produção (h):	5,17	Tempo produção (h):	5,31	Tempo produção (h):	5,13		
Tempo interrupção (h):	0,18	Tempo interrupção (h):	0,18	Tempo interrupção (h):	0,17	Tempo interrupção (h):	0,19		
Tempo preparo (h):	0,79	Tempo preparo (h):	0,78	Tempo preparo (h):	0,75	Tempo preparo (h):	0,86		
Tempo de Máquina (h):	6,15	Tempo de Máquina (h):	6,13	Tempo de Máquina (h):	6,23	Tempo de Máquina (h):	6,18		
CCO (ha/h):	0,21	CCO (ha/h):	0,20	CCO (ha/h):	0,20	CCO (ha/h):	0,22		
Ensaio:	5	Ensaio:	6	Ensaio:	7	Ensaio:	8		
Área trabalhada (ha):	1,32	Área trabalhada (ha):	1,37	Área trabalhada (ha):	1,38	Área trabalhada (ha):	1,39		
Tempo produção (h):	4,92	Tempo produção (h):	5,19	Tempo produção (h):	5,16	Tempo produção (h):	5,01		
Tempo interrupção (h):	0,23	Tempo interrupção (h):	0,18	Tempo interrupção (h):	0,17	Tempo interrupção (h):	0,21		
Tempo preparo (h):	0,97	Tempo preparo (h):	0,78	Tempo preparo (h):	0,91	Tempo preparo (h):	0,95		
Tempo de Máquina (h):	6,12	Tempo de Máquina (h):	6,15	Tempo de Máquina (h):	6,24	Tempo de Máquina (h):	6,17		
CCO (ha/h):	0,22	CCO (ha/h):	0,22	CCO (ha/h):	0,22	CCO (ha/h):	0,23		
Ensaio:	9	Ensaio:	10	Ensaio:	11	Ensaio:	12		
Área trabalhada (ha):	1,38	Área trabalhada (ha):	1,44	Área trabalhada (ha):	1,39	Área trabalhada (ha):	1,40		
Tempo produção (h):	5,42	Tempo produção (h):	5,44	Tempo produção (h):	5,43	Tempo produção (h):	5,50		
Tempo interrupção (h):	0,16	Tempo interrupção (h):	0,15	Tempo interrupção (h):	0,14	Tempo interrupção (h):	0,14		
Tempo preparo (h):	0,66	Tempo preparo (h):	0,63	Tempo preparo (h):	0,64	Tempo preparo (h):	0,64		
Tempo de Máquina (h):	6,23	Tempo de Máquina (h):	6,22	Tempo de Máquina (h):	6,21	Tempo de Máquina (h):	6,28		
CCO (ha/h):	0,22	CCO (ha/h):	0,23	CCO (ha/h):	0,22	CCO (ha/h):	0,22		
Ensaio:	13	Ensaio:	14	Ensaio:	15	Ensaio:	16		
Área trabalhada (ha):	1,44	Área trabalhada (ha):	1,42	Área trabalhada (ha):	1,37	Área trabalhada (ha):	1,47		
Tempo produção (h):	5,61	Tempo produção (h):	5,54	Tempo produção (h):	5,55	Tempo produção (h):	5,45		
Tempo interrupção (h):	0,13	Tempo interrupção (h):	0,14	Tempo interrupção (h):	0,15	Tempo interrupção (h):	0,17		
Tempo preparo (h):	0,64	Tempo preparo (h):	0,66	Tempo preparo (h):	0,63	Tempo preparo (h):	0,66		
Tempo de Máquina (h):	6,38	Tempo de Máquina (h):	6,34	Tempo de Máquina (h):	6,33	Tempo de Máquina (h):	6,28		
CCO (ha/h):	0,23	CCO (ha/h):	0,22	CCO (ha/h):	0,22	CCO (ha/h):	0,23		
Ensaio:	17	Ensaio:	18	Ensaio:	19	Ensaio:	20		
Área trabalhada (ha):	1,44	Área trabalhada (ha):	1,39	Área trabalhada (ha):	1,48	Área trabalhada (ha):	1,42		
Tempo produção (h):	5,64	Tempo produção (h):	5,56	Tempo produção (h):	5,71	Tempo produção (h):	5,70		
Tempo interrupção (h):	0,13	Tempo interrupção (h):	0,12	Tempo interrupção (h):	0,10	Tempo interrupção (h):	0,10		
Tempo preparo (h):	0,50	Tempo preparo (h):	0,60	Tempo preparo (h):	0,48	Tempo preparo (h):	0,51		
Tempo de Máquina (h):	6,26	Tempo de Máquina (h):	6,28	Tempo de Máquina (h):	6,29	Tempo de Máquina (h):	6,31		
CCO (ha/h):	0,23	CCO (ha/h):	0,22	CCO (ha/h):	0,24	CCO (ha/h):	0,23		
Ensaio:	21	Ensaio:	22	Ensaio:	23	Ensaio:	24		
Área trabalhada (ha):	1,48	Área trabalhada (ha):	1,44	Área trabalhada (ha):	1,49	Área trabalhada (ha):	1,43		
Tempo produção (h):	5,75	Tempo produção (h):	5,72	Tempo produção (h):	5,67	Tempo produção (h):	5,67		
Tempo interrupção (h):	0,09	Tempo interrupção (h):	0,11	Tempo interrupção (h):	0,10	Tempo interrupção (h):	0,16		
Tempo preparo (h):	0,47	Tempo preparo (h):	0,47	Tempo preparo (h):	0,50	Tempo preparo (h):	0,50		
Tempo de Máquina (h):	6,31	Tempo de Máquina (h):	6,29	Tempo de Máquina (h):	6,27	Tempo de Máquina (h):	6,33		
CCO (ha/h):	0,23	CCO (ha/h):	0,23	CCO (ha/h):	0,24	CCO (ha/h):	0,23		
Ensaio:	25	Ensaio:	26	Ensaio:	27	Ensaio:	28		
Área trabalhada (ha):	1,43	Área trabalhada (ha):	1,42	Área trabalhada (ha):	1,44	Área trabalhada (ha):	1,54		
Tempo produção (h):	5,87	Tempo produção (h):	5,65	Tempo produção (h):	5,57	Tempo produção (h):	5,68		
Tempo interrupção (h):	0,11	Tempo interrupção (h):	0,10	Tempo interrupção (h):	0,13	Tempo interrupção (h):	0,09		
Tempo preparo (h):	0,50	Tempo preparo (h):	0,49	Tempo preparo (h):	0,47	Tempo preparo (h):	0,47		
Tempo de Máquina (h):	6,47	Tempo de Máquina (h):	6,24	Tempo de Máquina (h):	6,16	Tempo de Máquina (h):	6,24		
CCO (ha/h):	0,22	CCO (ha/h):	0,23	CCO (ha/h):	0,23	CCO (ha/h):	0,25		
Ensaio:	29	Ensaio:	30	Ensaio:	31	Ensaio:	32		
Área trabalhada (ha):	1,44	Área trabalhada (ha):	1,47	Área trabalhada (ha):	1,42	Área trabalhada (ha):	1,40		
Tempo produção (h):	5,54	Tempo produção (h):	5,55	Tempo produção (h):	5,46	Tempo produção (h):	5,78		
Tempo interrupção (h):	0,12	Tempo interrupção (h):	0,10	Tempo interrupção (h):	0,12	Tempo interrupção (h):	0,10		
Tempo preparo (h):	0,56	Tempo preparo (h):	0,55	Tempo preparo (h):	0,60	Tempo preparo (h):	0,51		
Tempo de Máquina (h):	6,22	Tempo de Máquina (h):	6,20	Tempo de Máquina (h):	6,18	Tempo de Máquina (h):	6,39		
CCO (ha/h):	0,23	CCO (ha/h):	0,24	CCO (ha/h):	0,23	CCO (ha/h):	0,22		
RESULTADOS									
Total		Média		Desvio Padrão		Coefficiente de variação			
Área trabalhada (ha):	44,94	Área trabalhada (ha):	1,40	Área trabalhada (ha):	0,07	Área trabalhada (ha):	5,1%		
Tempo produção (h):	175,52	Tempo produção (h):	5,49	Tempo produção (h):	0,24	Tempo produção (h):	4,3%		
Tempo interrupção (h):	4,44	Tempo interrupção (h):	0,14	Tempo interrupção (h):	0,04	Tempo interrupção (h):	26,8%		
Tempo preparo (h):	20,05	Tempo preparo (h):	0,63	Tempo preparo (h):	0,15	Tempo preparo (h):	24,0%		
Tempo de Máquina (h):	200,01	Tempo de Máquina (h):	6,25	Tempo de Máquina (h):	0,08	Tempo de Máquina (h):	1,3%		
CCO (ha/h):	0,22	CCO (ha/h):	0,22	CCO (ha/h):	0,01	CCO (ha/h):	4,7%		

COLETA DE DADOS									
Operação:		Baldeio de Tocos		Data:		12/11/2013 a 13/12/2013			
Ensaio:	1	Ensaio:	2	Ensaio:	3	Ensaio:	4		
Massa trabalhada (t):	142,08	Massa trabalhada (t):	152,01	Massa trabalhada (t):	149,60	Massa trabalhada (t):	162,82		
Tempo produção (h):	5,12	Tempo produção (h):	5,07	Tempo produção (h):	4,99	Tempo produção (h):	5,12		
Tempo interrupção (h):	0,23	Tempo interrupção (h):	0,25	Tempo interrupção (h):	0,21	Tempo interrupção (h):	0,25		
Tempo preparo (h):	0,62	Tempo preparo (h):	0,58	Tempo preparo (h):	0,71	Tempo preparo (h):	0,64		
Tempo de Máquina (h):	5,97	Tempo de Máquina (h):	5,90	Tempo de Máquina (h):	5,91	Tempo de Máquina (h):	6,01		
CCO (t/h):	23,80	CCO (t/h):	25,76	CCO (t/h):	25,31	CCO (t/h):	27,09		
Ensaio:	5	Ensaio:	6	Ensaio:	7	Ensaio:	8		
Massa trabalhada (t):	159,76	Massa trabalhada (t):	154,49	Massa trabalhada (t):	158,06	Massa trabalhada (t):	165,25		
Tempo produção (h):	5,15	Tempo produção (h):	5,01	Tempo produção (h):	5,14	Tempo produção (h):	5,33		
Tempo interrupção (h):	0,22	Tempo interrupção (h):	0,20	Tempo interrupção (h):	0,21	Tempo interrupção (h):	0,20		
Tempo preparo (h):	0,59	Tempo preparo (h):	0,70	Tempo preparo (h):	0,55	Tempo preparo (h):	0,53		
Tempo de Máquina (h):	5,96	Tempo de Máquina (h):	5,92	Tempo de Máquina (h):	5,90	Tempo de Máquina (h):	6,06		
CCO (t/h):	26,79	CCO (t/h):	26,12	CCO (t/h):	26,78	CCO (t/h):	27,28		
Ensaio:	9	Ensaio:	10						
Massa trabalhada (t):	169,10	Massa trabalhada (t):	165,12						
Tempo produção (h):	5,39	Tempo produção (h):	5,35						
Tempo interrupção (h):	0,22	Tempo interrupção (h):	0,25						
Tempo preparo (h):	0,50	Tempo preparo (h):	0,42						
Tempo de Máquina (h):	6,11	Tempo de Máquina (h):	6,03						
CCO (t/h):	27,68	CCO (t/h):	27,41						
RESULTADOS									
Total		Média		Desvio Padrão		Coeficiente de variação			
Massa trabalhada (t):	1578,29	Massa trabalhada (t):	157,83	Massa trabalhada (t):	8,33	Massa trabalhada (t):	5,3%		
Tempo produção (h):	51,68	Tempo produção (h):	5,17	Tempo produção (h):	0,14	Tempo produção (h):	2,7%		
Tempo interrupção (h):	2,25	Tempo interrupção (h):	0,22	Tempo interrupção (h):	0,02	Tempo interrupção (h):	8,9%		
Tempo preparo (h):	5,84	Tempo preparo (h):	0,58	Tempo preparo (h):	0,09	Tempo preparo (h):	15,2%		
Tempo de Máquina (h):	59,77	Tempo de Máquina (h):	5,98	Tempo de Máquina (h):	0,07	Tempo de Máquina (h):	1,2%		
CCO (t/h):	26,41	CCO (t/h):	26,40	CCO (t/h):	1,18	CCO (t/h):	4,5%		

COLETA DE DADOS											
Operação:			Processamento			Data:			18/12/2013 a 30/12/2013		
Ensaio:	1		Ensaio:	2		Ensaio:	3		Ensaio:	4	
Massa trabalhada (t):	126,07		Massa trabalhada (t):	124,60		Massa trabalhada (t):	121,46		Massa trabalhada (t):	126,06	
Tempo produção (h):	4,88		Tempo produção (h):	5,01		Tempo produção (h):	4,99		Tempo produção (h):	5,01	
Tempo interrupção (h):	0,23		Tempo interrupção (h):	0,21		Tempo interrupção (h):	0,19		Tempo interrupção (h):	0,15	
Tempo preparo (h):	1,32		Tempo preparo (h):	1,23		Tempo preparo (h):	1,25		Tempo preparo (h):	1,33	
Tempo de Máquina (h):	6,43		Tempo de Máquina (h):	6,45		Tempo de Máquina (h):	6,43		Tempo de Máquina (h):	6,49	
CCO (t/h):	19,61		CCO (t/h):	19,32		CCO (t/h):	18,89		CCO (t/h):	19,42	
Ensaio:	5		Ensaio:	6		Ensaio:	7		Ensaio:	8	
Massa trabalhada (t):	131,60		Massa trabalhada (t):	135,80		Massa trabalhada (t):	144,30		Massa trabalhada (t):	132,40	
Tempo produção (h):	5,15		Tempo produção (h):	5,05		Tempo produção (h):	5,13		Tempo produção (h):	5,03	
Tempo interrupção (h):	0,18		Tempo interrupção (h):	0,18		Tempo interrupção (h):	0,21		Tempo interrupção (h):	0,19	
Tempo preparo (h):	1,11		Tempo preparo (h):	1,25		Tempo preparo (h):	1,12		Tempo preparo (h):	1,33	
Tempo de Máquina (h):	6,44		Tempo de Máquina (h):	6,48		Tempo de Máquina (h):	6,46		Tempo de Máquina (h):	6,55	
CCO (t/h):	20,43		CCO (t/h):	20,96		CCO (t/h):	22,34		CCO (t/h):	20,21	
Ensaio:	9		Ensaio:	10		Ensaio:	11		Ensaio:	12	
Massa trabalhada (t):	142,09		Massa trabalhada (t):	134,90		Massa trabalhada (t):	129,36		Massa trabalhada (t):	129,65	
Tempo produção (h):	5,08		Tempo produção (h):	5,22		Tempo produção (h):	5,01		Tempo produção (h):	5,11	
Tempo interrupção (h):	0,17		Tempo interrupção (h):	0,19		Tempo interrupção (h):	0,16		Tempo interrupção (h):	0,18	
Tempo preparo (h):	1,25		Tempo preparo (h):	1,04		Tempo preparo (h):	1,32		Tempo preparo (h):	1,29	
Tempo de Máquina (h):	6,50		Tempo de Máquina (h):	6,45		Tempo de Máquina (h):	6,49		Tempo de Máquina (h):	6,58	
CCO (t/h):	21,85		CCO (t/h):	20,90		CCO (t/h):	19,93		CCO (t/h):	19,70	
RESULTADOS											
Total			Média			Desvio Padrão			Coeficiente de variação		
Massa trabalhada (t):	1578,29		Massa trabalhada (t):	131,52		Massa trabalhada (t):	6,89		Massa trabalhada (t):	5,2%	
Tempo produção (h):	60,68		Tempo produção (h):	5,06		Tempo produção (h):	0,09		Tempo produção (h):	1,8%	
Tempo interrupção (h):	2,24		Tempo interrupção (h):	0,19		Tempo interrupção (h):	0,02		Tempo interrupção (h):	11,9%	
Tempo preparo (h):	14,84		Tempo preparo (h):	1,24		Tempo preparo (h):	0,10		Tempo preparo (h):	7,8%	
Tempo de Máquina (h):	77,76		Tempo de Máquina (h):	6,48		Tempo de Máquina (h):	0,05		Tempo de Máquina (h):	0,7%	
CCO (t/h):	20,30		CCO (t/h):	20,30		CCO (t/h):	1,05		CCO (t/h):	5,2%	