

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE SEIS SISTEMAS DE
RECOLHIMENTO DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR
(*Saccharum* spp.)**

MARCIO BERALDO MICHELAZZO

Orientador: Prof. Dr. Oscar A. Braunbeck

CAMPINAS
MAIO DE 2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE SEIS SISTEMAS DE
RECOLHIMENTO DO PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR
(*Saccharum* spp.)**

Dissertação submetida à banca
examinadora para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Agrícola na área
de concentração Máquinas Agrícolas.

MARCIO BERALDO MICHELAZZO

Orientador: Prof. Dr. Oscar A. Braunbeck

CAMPINAS
MAIO DE 2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Michelazzo, Marcio Beraldo

M582a Análise de sensibilidade de seis sistemas de
recolhimento do palhço da cana-se-açucar (*Saccharum*
spp.) / Marcio Beraldo Michelazzo. --Campinas, SP:
[s.n.], 2005.

Orientador: Oscar Antonio Braunbeck

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Biomassa vegetal. 2. Biomassa. 3. Cana-de-açucar
- Colheita. 4. Palha - Utilização. I. Braunbeck, Oscar
Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Analysis of six recovery systems for sugarcane trash

Palavras-chave em Inglês: Plant biomass, Biomass, Harvesting sugar cane, Cane
residues e Baling cane residues

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Tomaz Caetano Cannavam Ripoli e Paulo Roberto Beskow.

Data da defesa: 18/05/2005

Aos meus pais
Cid (*in memoriam*) e Iza,
dedico.

À minha mulher Andréa,
ofereço.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Oscar Braunbeck pela orientação, paciência e discernimento.

À toda minha família, pelo apoio.

A Edgar pelos desenhos e pela utilização da infra-estrutura do Laboratório de Projetos.

À CAPES, pela bolsa concedida.

Aos colegas: Can, Carlão, Rodrigo Tardivo, Ney, Elton, Bizuti e Efrain pela colaboração.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo geral	3
1.2. Objetivos específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Palhico como biomassa	4
2.2. Recolhimento e adensamento do palhico	6
2.3 Legislação de transporte	16
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1. Máquinas	18
3.2. Massa específica do palhico	20
3.2.1. Princípios de adensamento	20
3.3. Caracterização dos sistemas	23
3.4. Parâmetros administrativos	33
3.5. Tempos de trabalho	35
3.6. Eficiências de tempo	35
3.6.1. Eficiência teórica (E_{f_t})	36
3.6.2. Eficiência de utilização ($E_{f_{util}}$)	36
3.6.3. Eficiência de disponibilidade (E_{f_d})	36
3.6.4. Eficiência de aproveitamento (E_{f_a})	37
3.6.5. Eficiência geral ($E_{f_{geral}}$)	37
3.7. Capacidades	37
3.7.1. Capacidade teórica (C_T)	38
3.7.2. Capacidade efetiva (C_{ef})	40
3.7.3. Capacidade diária (C_{dia})	40

3.8. Capacidade volumétrica dos transportes	41
3.9. Carga efetiva	41
3.10. Balanço energético	41
3.11. Custos	42
3.12. Análise de sensibilidade	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5. CONCLUSÕES	74
REFERÊNCIAS	75
ANEXOS	80

LISTA DE TABELAS

	Página
1. Máquinas empregadas na simulação dos cálculos do custo de recolhimento do palhiço	18
2. Características das máquinas analisadas	19
3. Parâmetros administrativos	33
4. Características do palhiço adensado pelos diferentes processos	34
5. Estimativa dos parâmetros da operação de transporte em cada sistema	48
6. Simulação dos indicadores de Capacidade diária e Demanda de Investimento para as máquinas das operações envolvidas no recolhimento da palhiço	57
7. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema de fardo cilíndrico, quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor	62
8. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema de picado a granel quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor Eficiências (%) de operações no sistema picado a granel	64
9. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema de colheita integral quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor	66
10. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema de fardo algodoeiro quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor	68
11. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema de briquetagem quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor	70
12. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema de peletização quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor	71

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Esquema de adensamento, de baixa pressão, por pistão mecânico acionado por biela-manivela	20
2. Esquema de adensamento, por alta pressão, por pistão mecânico acionado por biela-manivela	21
3. Esquema de adensamento por rolo	21
4. Esquema de adensamento por prensa hidráulica	22
5. Esquema de picagem da recolhedora de forragens	23
6. Enleiradora	24
7. Enfardadora	25
8. Protótipo de picador de fardo	25
9. Fluxograma das operações realizadas no sistema fardo cilíndrico	26
10. Recolhedora de forragens recolhendo o palhiço enleirado	27
11. Fluxograma das operações realizadas no sistema picado a granel	27
12. Briquetadora	28
13. Fluxograma das operações realizadas no sistema de briquetagem	28
14. Peletizadora	29
15. Fluxograma das operações realizadas no sistema de peletização	30
16. Fardo depois de adensado pela fardo algodoeiro	31
17. Fluxograma das operações realizadas no sistema Prensa de Algodão .	31
18. Colheita integral	32
19. Protótipo de estação de limpeza	32
20. Fluxograma das operações realizadas no sistema de colheita integral .	33
21. Desenho ilustrativo da acomodação dos fardos na carroceria do caminhão	50
22. Estimativa do custo do transporte ($R\$ \cdot Mg^{-1}$) em função da variação da massa específica da carga ($kg \cdot m^{-3}$)	51
23. Simulação do custo do transporte ($R\$ \cdot Mg^{-1}$) em função da distância de transporte (km)	52

24. Estimativa da demanda por combustível fóssil ($L \cdot Mg^{-1}$) exigida por tipo operação de cada sistema	54
25. Estimativa da demanda de investimento para as operações envolvidas na recolhimento do palhiço (milhões de reais/ $1.000 Mg \cdot dia^{-1}$)	59
26. Estimativa do custo total do palhiço recolhido nos vários sistemas, em duas distâncias (15, 50 e 100 km)	60
27. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema de fardo cilíndrico, quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor	63
28. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema de picado a granel, quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor	65
29. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema de colheita integral, quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor.....	67
30. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema de fardo algodoeiro, quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor	69
31. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema de briquetagem, quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor.	71
32. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema de peletização, quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor	72

LISTA DE SÍMBOLOS

CARGC	(Mg)	Carga do caminhão
CARGT	(Mg)	Carga do transbordo
COMB	(R\$.L ⁻¹)	Preço de combustível
C _T	(Mg.h ⁻¹)	Capacidade teórica
MEf	(kg.m ⁻³)	Massa específica final do palhiço
MEAPAR	(kg.m ⁻³)	Massa específica aparente da carga do caminhão
DIST	(km)	Distância de Transporte
DUT	(dias)	Dias úteis de safra
EFG	(%)	Eficiência geral
ELETR	(R\$.kw.h ⁻¹)	Preço da energia elétrica
ENSOC	(%)	Encargos sociais
JT	(h)	Jornada de trabalho
JUROS	(%)	Juros
LAF	(R\$.kg ⁻¹)	Corda de amarração do fardo
LUB	(R\$.L ⁻¹)	Preço dos lubrificantes
SAL	(R\$.mês ⁻¹)	Salário da mão-de-obra
TAUXB	(h)	Tempo auxiliar do bassboy
TAUXP	(h)	Tempo auxiliar da prensa de algodão
TAUXT	(h)	Tempo auxiliar do transbordo
TMANUT	(h)	Tempo de manutenção
TPERD	(h)	Tempo perdido
VA	(R\$)	Valor de aquisição das máquinas
VR	(h ou km)	Valor residual do equipamento
VU	(R\$.L ⁻¹)	Vida útil do equipamento

RESUMO

A biomassa é uma fonte de energia renovável, disponível e alternativa. Quando a colheita é feita sem realização de queimada, a biomassa da cana-de-açúcar, na forma de palhiço, é uma das fontes de energia renovável com enorme potencial no Brasil. Todavia, o aproveitamento desses resíduos em larga escala é dificultado pelo alto custo de seu recolhimento, principalmente no que diz respeito ao recolhimento, adensamento e transporte. Este trabalho analisou tecnicamente algumas características envolvidas no recolhimento do palhiço, tais como massa específica final do palhiço e complexidade das máquinas envolvidas, juntamente com uma análise econômica, por meio de um modelo de cálculo de custo, por meio de simulação de eficiências e capacidades operacionais que compõem cada sistema de recolhimento do palhiço. De acordo com os resultados, o sistema colheita integral apresentou o menor custo de recolhimento do palhiço, tanto para distância pequenas como para grandes distâncias. Seguido pelos sistemas picado a granel, fardo cilíndrico, fardo algodoeiro, peletização e briquetagem.

Palavras-chaves: cana-de-açúcar; palhiço; recolhimento; biomassa; mecanização.

ABSTRACT

Sugarcane is one of the energy sources most readily available in Brazil, mainly due to residues such as trash (tops, dry and green leaves). However, large scale use of these residues still faces high recovery costs related to gathering, baling, transportation, chopping and technology for residue utilization. An analysis was done of the mechanical principles involved in the packing processes. A model was defined to estimate the cost of trash recovery simulating the field capacity, oil consumption, depreciation, repair and maintenance and labor required for the field and transport operations. Six recovery systems were studied both from the technical and economical points of view. The results showed that handling billets and trash together, described as “Integral harvest”, has the lowest cost for trash recovery, both for short and long distances, followed by bulk handling of chopped trash, the round bale, the giant bale and finally the pellet and briquette systems.

Keywords: sugar cane; trash recovery; biomass; harvesting.

1. Introdução

Biomassa é a denominação dada aos resíduos de origem orgânica que não foram fossilizados e que podem ser utilizados para a produção de energia. É uma fonte de energia renovável e alternativa que maximiza o aproveitamento de uma energia disponível. Entre as diferentes fontes renováveis de energia, a biomassa destaca-se pela alta disponibilidade no Brasil.

Por sua vez, a biomassa da cana-de-açúcar é uma das fontes de energia renovável de maior importância atualmente no Brasil, não apenas pela sua utilização para produção de álcool combustível, mas, sobretudo pelo aproveitamento do bagaço e também do palhço, que é a denominação dada aos ponteiros, folhas verdes e palha, cujo aproveitamento, contudo, só é viável quando a colheita é feita sem a realização de queimada.

O Brasil, em comparação a alguns países desenvolvidos, possui um sistema energético com baixa emissão de gás carbono. Em vista disto, o desenvolvimento de tecnologias de geração de energia com mínima emissão de dióxido de carbono, resultarão em muitas vantagens em relação ao Protocolo de Kyoto. Este tratado prevê a adoção do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, pelo qual se estabelece que os países industrializados terão de reduzir suas emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa ou compensar parte delas, por intermédio de financiamentos de projetos, em países em desenvolvimento, que diminuam estas emissões. Por esse mecanismo, projetos implementados no Brasil que resultem em redução de emissões de gases do efeito estufa valerão créditos que poderão ser vendidos aos países industrializados.

Além de grande produtor de biomassa, o canavial é um reservatório de carbono, pois as plantas retiram CO₂ do ar e o armazenamento na forma de compostos orgânicos. Parte deste carbono encontra-se no palhço e é lançado novamente na atmosfera quando se faz a queima do canavial como prática de pré-colheita. Na medida que a energia dessa queima possa ser aproveitada em substituição daquela proveniente de combustíveis fósseis, haveria uma contribuição na redução do CO₂ atmosférico, ou seja, seria criado um crédito de carbono de acordo com o protocolo de Kyoto. A Lei de Queimadas limita, no Estado de São Paulo, progressivamente as queima dos canaviais em áreas mecanizáveis, com mais de 150 ha. Essa restrição traz grande incentivo para o aproveitamento do palhço na geração de energia, conseqüentemente, diminuindo a taxa de emissão de CO₂ pelos canaviais.

Quando produzida nacionalmente, o uso em larga escala de biomassa para a geração de energia térmica ou elétrica também contribui para a diminuição da dependência de fontes energética externas, como combustíveis fósseis, e contribui para a sustentabilidade do sistema energético.

Para uma nação, a escassez ou o alto custo da energia elétrica representam um fator limitante para o desenvolvimento. Como possui sua matriz energética concentrada em hidrelétricas, o Brasil fica dependente de chuvas. Ainda, os resíduos da agroindústria canavieira são produzidos no inverno, quando a baixa precipitação não favorece a recuperação do nível dos reservatórios das hidrelétricas. Ou seja, a biomassa na forma de palhico, pode de forma sazonal complementar a eletricidade gerada pelas hidroelétricas em períodos de estiagem.

O aproveitamento desses resíduos em larga escala ainda é dificultado pelos altos custos de seu recolhimento, principalmente no que diz respeito ao recolhimento, adensamento, transporte, redução de tamanho e tecnologia para utilização destes resíduos. As tecnologias disponíveis para seu recolhimento se originaram principalmente na pecuária de clima temperado, onde o manejo de feno e forragem de alta umidade encontra-se bastante desenvolvidos. Contudo, os volumes manuseados na pecuária são significativamente inferiores aos necessários para o aproveitamento energético.

Os processos analisados estão caracterizados por níveis diferentes de investimento, desempenho operacional, massa específica final da biomassa e níveis de complexidade das máquinas e operações envolvidas. O adensamento pode ser atingido por meio da redução de tamanho das frações armazenadas a granel ou prensadas. Também, pela prensagem de fibras longas com ou sem amarração para evitar o relaxamento e, por isso, a perda de massa específica. O processo de adensamento pode ser efetuado simultaneamente com a colheita ou por meio de uma sequência de operações independentes, que podem incluir um processo intermediário de secagem natural.

Quanto ao recolhimento e adensamento, as dificuldades esbarram na heterogeneidade e baixa massa específica do material, na falta de máquinas de alta capacidade operacional e custos elevados, pois, a maioria delas é adaptada da colheita de forragem.

O transporte do palhico tem um custo elevado em decorrência da sua baixa massa específica que implica em grandes volumes a serem transportados. Em vista disso, sua

compactação é de grande importância para diminuição do custo de transporte, uma vez que este diminui sensivelmente na medida em que se aumenta a massa específica do volume transportado.

1.1. Objetivo geral

O presente trabalho visou efetuar análise comparativa de seis sistemas de manuseio do palhiço, desde a colheita até a entrega na esteira da usina. A análise proposta baseia-se na simulação de desempenhos assim como custos globais e detalhados das operações que compõem cada sistema.

1.2. Objetivos específicos

- a) Adotar com base na bibliografia, sempre que disponível, os parâmetros relacionados a desempenhos e custos das máquinas. Especificamente componentes de eficiência, valor de compra e residual de cada máquinas, custo de manutenção assim como preços de combustíveis e lubrificantes;
- b) Simular a capacidade de cada operação em função das eficiências de aproveitamento, disponibilidade, utilização e operacional;
- c) Simular o consumo de combustível da cada operação por meio da potência das máquinas;
- d) Simular o custo da cada operação em função da eficiência, consumo de combustível, custo de manutenção, demanda de mão-de-obra e depreciação das máquinas;
- e) Simular os investimentos necessários para cada sistema em função dos volumes a serem processados;
- f) Analisar os princípios de adensamento de biomassa existentes e sua relação com os custos operacionais e investimentos necessários.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Palhico como biomassa

Biomassa é definida por Woods & Hall (1995) como resíduos de origem orgânica que não foram fossilizados. White & Plaskett (1981) a definem como todo material orgânico que pode ser utilizado como combustível. De modo geral, ela pode ser obtida por meio de restos de colheitas e de exploração florestal, resíduos orgânicos de indústrias, entre outros. Conforme o ensaio de Rosillo-Calle, Bajay & Rothman (2000) após um longo período de esquecimento, ou talvez de negligência, a geração de energia através da biomassa está passando por um restabelecimento. O Brasil está tomando a vanguarda no avanço para a utilização da biomassa canavieira como fonte energética.

Goldemberg & Coelho (2000) afirmam que o Brasil tem um enorme potencial para geração de energia por meio do uso de resíduos agrícolas, principalmente por causa do setor canavieiro. Contudo, apesar da atividade neste setor ser sazonal e a cogeração de energia acontecer apenas durante a colheita, eles relatam que isso não se torna problema, pois o sistema energético brasileiro é basicamente hidroelétrico e a época de colheita da cana coincide com o período de seca, possibilitando às hidroelétricas armazenarem água nos reservatórios.

Este potencial pode ser observado de acordo com o levantamento idealizado no Fórum de Cogeração e Geração Distribuída (2001) o qual menciona que o potencial de geração com resíduos de cana (bagaço e palhico) é de 10 GW. A energia totalizaria 60.000 kWh·ano⁻¹, o que representaria 20 % da energia consumida no Brasil em 2000. Entretanto, os autores concordam que estes estudos globais devem ser vistos com cautela, pois, devido às inúmeras variáveis envolvidas, tanto podem exagerar quanto subestimar esse potencial.

Braunbeck, Macedo & Cortez (2001) também afirmam que atualmente a cana-de-açúcar é uma das mais importantes fontes de biomassa no Brasil. Essa importância é em razão não somente pela sua utilização, como matéria-prima, na produção de etanol e no fornecimento de bagaço, mas também pela perspectiva do aproveitamento dos resíduos de sua colheita. Esses resíduos, que são compostos basicamente por pontas, palha, folhas verdes, e rebolos inteiros ou fragmentados, também são denominados de palhico (RIPOLI & RIPOLI, 2004).

Uma estimativa da disponibilidade do palhiço foi feita por Braunbeck, Macedo & Cortez (2001) como sendo de 11 milhões de toneladas o total de palhiço disponível, uma vez considerando uma produção de 300 milhões de toneladas de cana, 55% do total da área plantada (área mecanizável), colheita realizada sem queima, uma quantidade média de 10 Mg·ha⁻¹ de resíduos que permanecem sobre o solo. Recomendam deixar parte dos resíduos no solo, por volta de 50 %, para ter benefícios agrônômicos como incremento de matéria orgânica, controle de mato e para se diminuir a contaminação com terra. Após a colheita da cana verde, aconselham deixar os resíduos no solo para secagem natural por alguns dias, sendo recolhido quando atingir 30% de umidade. Quanto ao formato dos fardos, os prismáticos apresentam maior massa específica que os cilíndricos, sendo que eles deverão ser compactados até 150 a 200 kg·m⁻³, segundo os autores.

Ripoli et al. (2003) estimaram que a quantidade de pessoas que podem ser atendidas anualmente pela energia geradas por meio do palhiço e bagaço é de 9,8·10⁶ e 5·10⁶ pessoas·ano⁻¹, respectivamente.

Entretanto, a quantidade de palhiço determinada pelos diversos trabalhos mostra grande variação. Ripoli (1991) determinou a quantidade de palhiço como sendo 29 Mg·ha⁻¹ e 19,5 Mg·ha⁻¹ para duas diferentes variedades de cana. Por sua vez, Molina et. al (1995) encontrou cerca de 34 Mg·ha⁻¹ de palhiço em duas áreas de cana. A quantidade de palhiço da colheita mecânica de cana crua sem queima prévia que permaneceu sobre o terreno, variou em função da variedade testada: cerca de 13 toneladas para a variedade SP71-1406 e em torno de 24 toneladas para as SP71-6163. Comparando a média de energia, para ambas variedades, contida neste palhiço remanescente, Furlani, Ripoli & Villa Nova (1997) calculam que um único hectare conteria o equivalente a 0,76 barris de petróleo.

Também, Sotelo & Correa (1999) referem-se a grande a heterogeneidade apresentada pelo palhiço remanescente da colheita de cana-de-açúcar. De acordo com os autores, ele possui uma rica composição de massa verde e frações de colmos que pode ser empregada como fonte de energia renovável, contudo, é necessário um determinado grau de preparação mecânica, transporte e conservação que tornem possível seu emprego. Ainda segundo os autores, em uma colheita mecanizada, em Cuba, foi demonstrado que no solo permanecem de 11 a 21 Mg·ha⁻¹, de cujo volume total somente podem ser recolhidos por máquina aproximadamente 40%, devido, entre outras coisas, a requisitos agrícolas de proteção das

novas plantas, manutenção da umidade do solo e proteção diante do crescimento de ervas daninhas que concorram com o nascimento das rebrotas.

O palhiço pode ser convertido em energia por diversas maneiras, entre elas pela sua queima em caldeiras para geração de vapor e conseqüente acionamento de uma turbina. Outra forma é mediante sua gasificação.

Um estudo posto em prática por Corrêa Neto & Tolmasquim (2001) analisou a viabilidade técnica e econômica de projetos de co-geração de energia elétrica pela indústria sucro-alcooleira. Utilizando a biomassa como combustível em um sistema de gaseificação BIG/GTCC, os autores asseguram que com relação as turbomáquinas, em especial a turbina a gás, os aspectos técnicos estão solucionados e a utilização dos gases de baixo poder calorífico resultantes da gaseificação da biomassa é exequível. Afirmam, também, que o custo do palhiço recolhido no campo e entregue na usina foi estimado em US\$12,44 Mg⁻¹.

De acordo com Moreira (2000) além da gaseificação é possível produzir álcool da celulose, por meio da hidrólise por ácidos ou enzimas para a produção de glicose, que é em seguida fermentada para se transformar em etanol.

Em matéria publicada em junho de 2003 o jornal O Estado de São Paulo relata que com o uso de um processo, denominado Dedini Hidrólise Rápida (DHR), permitirá o uso do bagaço e da palha da cana na transformação do combustível, podendo dobrar a produção de álcool por hectare.

2.2. Recolhimento e adensamento do palhiço

O recolhimento do palhiço pode ser realizado de varias formas, entre elas, utilizando-se de máquinas enfardadoras. Uma pesquisa foi conduzida pelo Office of Energy Bureau of Science and Tachnology & Usaid/Thailand (1991) na Tailândia, durante uma safra inteira de cana, com colheita manual sem queima, determinou os custos do recolhimento do palhiço. A pesquisa compreendeu do uso de máquinas de forragem, tais como enfardadoras e enleiradoras, adaptadas para o uso em palhiço. Após a colheita o palhiço permaneceu na área entre dois a seis dias para secar e depois foi enleirado e enfardado. A umidade ficou por volta de 10%. Para uma distância de transporte de 10 km o custo total chegou a 32,75 US\$.Mg⁻¹ e, segundo os autores, podendo ser reduzido a próximo de 25,00 US\$.Mg⁻¹. A eficiência operacional recolhimento chegou a 64%. O custo das cordas de amarração dos fardos foi de

2,80 US\$.Mg⁻¹. O formato dos fardos era prismático com dimensões de 40x45x81 cm, pesando 16 kg em média, o que resulta em aproximadamente 100 kg.m⁻³ de massa específica.

Moraes & Hassuani (1994) estudaram enfardadoras de fardo cilíndrico e de fardos prismáticos pequenos (15 kg.fardo⁻¹) para recolhimento do palhço. A capacidade operacional efetiva de recolhimento foi em torno de 2 Mg.h⁻¹ e 4 Mg.h⁻¹, respectivamente. A quantidade de terra encontrada nos fardos situou-se em torno de 6%.

Estudando o desempenho operacional de uma enfardadora de forragem (fardos cilíndricos) no recolhimento de resíduos da colheita manual de cana sem queimar, efetuando-se desponte e eliminando folhas verdes e palha, de maneira semelhante à produção de mudas Ripoli et al. (1991) observaram 26,77 Mg.ha⁻¹ de resíduos no solo, capacidade operacional de 2,89 Mg.h⁻¹ ou 0,61 ha.h⁻¹, massa específica dos fardos de 184,06 kg.cm⁻³ e 43% de umidade.

Molina et al. (1995) o desempenho de uma enfardadora de forragem no enfardamento de palhço de cana-de-açúcar, sem queima prévia, foi de 1,11 Mg.h⁻¹ de resíduo recolhido ou 0,26 ha.h⁻¹ trabalhado, com eficiência de recolhimento de 34% e umidade dos resíduos de 24% em média. Os fardos obtidos apresentaram massa específica de 189,6 kg.m⁻³. A massa de resíduos existente no campo após a colheita encontrada foi de 12,55 Mg.ha⁻¹. O custo relatado foi de 16,70 US\$.Mg⁻¹, ressaltando que os resíduos não foram enleirados e não foram computados os custos de transporte. O fato do não enleiramento do resíduo mostrou-se ineficiente na tentativa de obter fardos com pequena contaminação com terra. E, segundo os autores, os resultados obtidos não deixam dúvidas quanto à possibilidade da utilização dos resíduos de colheita de cana como combustível para geração de energia elétrica, em substituição ao bagaço que poderia ser briquetado para ser utilizado para outros fins, como materiais de revestimento ou aglomerados para construção de móveis.

Analisando a viabilidade de se recolher palhço, a Copersucar (1999) realizou vários estudos, que indicaram que o uso de fardos grandes e prismáticos (massa específica de 170 kg.m⁻³), leva aos melhores resultados econômicos no recolhimento da palha. Isso decorre da maior capacidade operacional das enfardadoras e da melhor ocupação do volume no caminhão. Em um dos estudos, o desempenho das enfardadoras Class Quadrant 1200 e Case 8575 foi 10,2 Mg.h⁻¹ e 12,7 Mg.h⁻¹, respectivamente. Em outro estudo foi utilizado uma enfardadora SODE JS-90 com capacidade de 2 Mg.h⁻¹, com enleiramento, cujo o custo alcançou 19,80 US\$.Mg⁻¹ de palhço. A composição desse custo total foi: 1,30 US\$.Mg⁻¹

relativo ao enleiramento; 9,60 US\$.Mg⁻¹ relacionado à enfardadora; 1,80 US\$.Mg⁻¹ à corda de amarração do fardo; 2,40 US\$.Mg⁻¹ ao carregamento dos fardos e 4,70 US\$.Mg⁻¹ ao transporte. A quantidade de terra encontrada nos fardos situou-se próximo de 6%, quando se realizou enleiramento prévio.

Após fazer um mapeamento do palhiço recolhido, utilizando conceitos da Agricultura de Precisão, Ripoli (2002) verificou que a quantidade de palhiço enfardado sobre a área variou de 4,5 a 15 Mg·ha⁻¹. Utilizou-se uma enfardadora de fardos prismáticos e cilíndricos, cuja massa específica determinada foi de 218,4 kg·m⁻³ e 166,5 kg·m⁻³, respectivamente.

O recolhimento do palhiço por meio de uma enfardadora cilíndrica foi estudado por Bizuti (2003) sob ponto de vista operacional e energético. Neste estudo, utilizou-se a enleiradora com uma e duas passadas, objetivando verificar também a menor contaminação por terra. Segundo o autor, a produtividade média de palhiço foi de 27 Mg·ha⁻¹, apresentando poder calorífico de 18,4 MJ·kg⁻¹. A massa específica média dos fardos foi de 168,3 kg·m³, quando a enleiradora passou apenas uma vez, e 191,6 kg·m³, quando a enleiradora passou duas vezes. A capacidade efetiva da operação de enfardamento para uma e duas passadas da enleiradora foi de 83,1 Mg·h⁻¹ e 72,1 Mg·h⁻¹, respectivamente. O consumo de combustível foi 0,18 L·Mg⁻¹, e 0,2 L·Mg⁻¹, também para uma e duas passadas da enleiradora. No caso da enfardadora, a capacidade efetiva apresentada foi 8,5 Mg·h⁻¹ e 12,9 Mg·h⁻¹, respectivamente para uma e duas passadas da enleiradora. Por sua vez, o consumo de combustível da operação de enfardamento foi 0,64 L·Mg⁻¹, e 0,43 L·Mg⁻¹, respectivamente, para uma e duas passadas. Quanto à contaminação por terra, os fardos apresentaram 10,6 % para o tratamento com uma passada da enleiradora e 8,1 % de terra, para o com duas passadas. Finalmente, o presente estudo apontou o balanço energético da operação de enleiramento e recolhimento do palhiço como sendo 99,93 % e 99,91 %, para os tratamentos de uma e duas passadas.

Ripoli et al. (2004) estudaram o enleiramento e enfardamento de palhiço. Para o enleiramento determinaram que a capacidade efetiva foi de 83 Mg·ha⁻¹ e 5,7% de material mineral, para o enleiramento simples. Para o enfardamento determinaram a massa específica dos fardos como 206 kg·m⁻³ e capacidade efetiva como 10,8 Mg·h⁻¹. Para ambas operações a eficiência energética foi de 99,56 %.

Outras maneiras de se recolher o palhiço, também foram analisadas. A revista Ideanews (2002) relata um teste de recolhimento do palhiço envolvendo uma prensa de

algodão, entre outras máquinas. Nesse ensaio, o palhicho foi enleirado sendo em seguida recolhido por uma recolhadora de forragens. Os desempenhos dos conjuntos trator/enleiradora e trator/forrageira foram $38 \text{ Mg}\cdot\text{h}^{-1}$ e $5 \text{ Mg}\cdot\text{h}^{-1}$, respectivamente. Em seguida o palhicho foi adensado ainda no campo por uma prensa de algodão. A massa específica da palha no campo após a colheita era cerca de $60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e depois de adensada pela prensa de algodão atingiu $190 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. O desempenho da prensa foi de $12 \text{ Mg}\cdot\text{h}^{-1}$. O custo total de recolhimento do palhicho por este processo foi de $17,00 \text{ R\$}\cdot\text{Mg}^{-1}$. O custo do transporte, para uma distância de 10 km, foi de $\text{R\$ } 2,06\cdot\text{km}^{-1}$. No teste recolheu-se apenas 50% do palhicho, a contaminação com material mineral foi de 4% e a umidade do palhicho no momento do recolhimento era de 12 %.

De modo geral, o enfardamento do palhicho apresenta a desvantagem de que os fardos precisam ser picados para se realizar a alimentação da caldeira. Uma opção para se evitar isso, seria o recolhimento do palhicho sem enfardá-lo.

Uma análise do recolhimento do palhicho a granel foi efetuada por Franco (2003) no qual verificou-se o desempenho das máquinas utilizadas. Nesse estudo, o palhicho foi enleirado e, posteriormente, recolhido por uma recolhadora de forragens autopropelida. Os dados a seguir são referentes ao tratamento que utilizou trator com 95,6 kw de potência. A produtividade média do palhicho determinada nesta análise foi de $24,13 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Para a operação de enleiramento a capacidade operacional foi de $5,10 \text{ ha}\cdot\text{h}^{-1}$. A enleiradora consumiu de $13,5 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ de combustível. O custo de enleiramento, fornecido pela Usina Costa Pinto (Grupo COSAN), foi de $0,49 \text{ R\$}\cdot\text{Mg}^{-1}$. Para a recolhadora de forragens, a capacidade encontrada foi de $10,22 \text{ Mg}\cdot\text{h}^{-1}$, o consumo de combustível foi de $3,3 \text{ L}\cdot\text{Mg}^{-1}$ e o custo fornecido pela usina foi de $9,17 \text{ R\$}\cdot\text{Mg}^{-1}$. O estudo mostrou, também, 7,6 % de terra no palhicho recolhido. A autora, também, cita que a usina forneceu o custo de transporte do palhicho, à uma distancia de 17 km, como sendo $8,90 \text{ R\$}\cdot\text{Mg}^{-1}$ e custo total do palhicho posto na usina como $20,67 \text{ R\$}\cdot\text{Mg}^{-1}$.

Uma forma de tentar diminuir o custo do transporte e facilitar o manuseio é realizar um adensamento de alta pressão no palhicho visando aumentar a carga transportada.

Briquetagem foi definida por Walter et al. (2000) como sendo o adensamento de pequenas partículas usando altas pressões, com ou sem calor.

Conforme relatam González & Muñoz (2002) atualmente existem quatro métodos de adensamento por meio de máquinas comerciais: enfardamento, “cubing”, peletização e

briquetagem. O processo de adensamento pode ser por meio de pistão, por rosca extrusora ou por rolos. Os autores realizaram um experimento de adensamento de alta pressão com material fibroso, proveniente de resíduo agrícola, visando fazer ração para animais ruminantes. Concluíram que o material testado é afetado principalmente pela umidade, temperatura, pressão e tamanho das partículas.

No caso do bagaço, para sua gaseificação, ele deveria ser briquetado ou peletizado, porém, a energia usada para se reduzir a umidade e a dificuldade da escolha de um aglomerante ideal para possibilitar a peletização em baixos níveis de umidade, torna-se necessário o uso de gaseificadores alimentados por bagaço enfardado com 20% de umidade, que apresentam boa durabilidade e fácil manuseio. Os resíduos de cana por apresentarem baixa densidade energética devem ser aproveitados em local próximo à usina (ELETROBRAS, 1993).

A Copersucar realizou testes de compactação do bagaço. O adensamento do bagaço de cana foi realizado por meio de prensas para enfardamento de papel adaptadas para o bagaço, por peletizadoras e por briquetadoras, que atingiram massa específicas de $600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $1200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente. A massa específica aparente encontrada foi de $550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para os “pellets”. A capacidade das peletizadoras foi de $4 \text{ Mg}\cdot\text{h}^{-1}$, das briquetadoras de $0,4$ a $2,7 \text{ Mg}\cdot\text{h}^{-1}$ e da prensa foi de $7 \text{ Mg}\cdot\text{h}^{-1}$. No enfardamento, a amarração do fardo foi responsável por 50 % do total dos custos operacionais. As peletizadoras comprimem o bagaço entre um rolo circular e um anel com furos radiais. Já as briquetadoras comprimem o bagaço em um cilindro por meio de um pistão tipo biela-manivela, que força o bagaço por meio do cilindro (SEMINÁRIO SOBRE BAGAÇO DE CANA, 1983).

Eriksson & Prior (1990) fizeram um estudo sobre as características técnicas e econômicas do adensamento de resíduos agrícolas. Os autores citam três sistemas de adensamento: rosca extrusora, peletização e adensamento por pistão. No adensamento por pistão, a força de pressão é aplicada descontinuamente no material dentro da câmara, pela ação de um pistão. O pistão pode ser acionado mecanicamente por intermédio de um volante mecânico ou por um sistema hidráulico. No adensamento por rosca extrusora, a pressão é aplicada continuamente pela passagem do material através da rosca aonde vai diminuindo de volume. Existem roscas cilíndricas, com ou sem aquecimento externo da matriz, e roscas cônicas. Na peletização, cilindros rodam sobre uma matriz perfurada e o material é empurrado

através dos furos em cada passada do cilindro. Ainda segundo os autores, o material adensado resultante é denominado de briquete quando tiver um diâmetro maior do que 30 mm. Materiais de menor tamanho são normalmente chamados “pellets”, contudo esta distinção é arbitrária. Os autores comentam também sobre a massa específica aparente, que é a densidade resultante quando muitas peças são amontoadas juntas. A massa específica aparente está relacionada com a massa específica individual e com a geometria de cada briquete ou “pellet” e, geralmente, é metade da massa específica individual.

De acordo com Kanafojski (1972) a palha, de modo geral, depositada solta a granel tem pequena massa específica aparente, tornando o adensamento muito importante para facilitar o transporte e o de manuseio. O princípio de adensamento é um processo de prensagem de uma porção de qualquer material colocado num recipiente e sobre efeito da pressão exercida por um pistão. Como resultado do aumento da pressão, ocorre um deslocamento mútuo das partículas individuais e a compressão do material. Durante a compressão, o volume da porção colocada no recipiente diminui e a massa específica global aumenta. Algumas partículas são deslocadas em várias direções e outras, mais rígidas, são quebradas. Também durante o processo ocorre um atrito interno entre as partículas e, ainda, um atrito externo entre as partículas e as paredes do recipiente. Se, após o adensamento definitivo do material, a pressão do pistão diminui, então, em um primeiro momento, a compactação interna (coesão) e a aderência e mútua das partículas (adesão) mantêm a deformação final. Com mais uma diminuição da pressão do pistão as forças de coesão e a adesão não são grandes o suficiente para impedir as forças de expansão, ocorrendo um relaxamento. As forças de coesão diminuem à medida que aumenta a distância entre as partículas e como consequência, o material expande mais e mais rapidamente. Se, após o completo alívio na pressão do pistão, a porção parcialmente expandida do material é novamente comprimida, mas com uma pressão maior do que antes, então, uma maior densidade final é obtida. Se, contudo, na nova compressão a pressão é menor ou próxima à pressão da primeira compressão, então quase nenhuma deformação ocorre. A Equação (1) permite mostrar a relação pressão-densidade:

$$p = C \cdot \gamma^m \quad (1)$$

onde:

$$C = \frac{p_o}{\gamma_o^m} \gamma^m \quad (2)$$

sendo:

- p_o = pressão inicial do pistão, $N \cdot cm^{-2}$;
- γ_o = massa específica inicial do material; $kg \cdot m^{-3}$;
- m = índice de potência, decimal;

De acordo com Reis et al. (2002) que avaliou a produção de briquetes a partir de caroços de açaí, a briquetagem foi realizada pela compactação a elevadas pressões, por meio de golpes produzidos sobre os resíduos por um pistão acionado por meio de dois volantes, resultando no aumento da temperatura do processo e conseqüentemente provocando a fluidificação da lignina, substância que atuará como elemento aglomerante das partículas. O diâmetro ideal dos briquetes para queima em caldeiras, fornos e lareiras foi de 70 mm a 100 mm, com comprimento de 250 a 400 mm e massa específica de 1.000 a 1.300 $kg \cdot m^{-3}$. A máquina utilizada foi a briquetadora do tipo prensa de pistão, cujo consumo é de 20 a 60 $kWh \cdot Mg^{-1}$ e desempenho de 200 a 1.500 $kg \cdot h^{-1}$.

Uma outra opção para o recolhimento do palhiço é a colheita integral, isto é, a coleta de todo material simultaneamente, cana misturada com o palhiço, para uma posterior separação deles junto à usina. Contudo o maior empecilho ainda é a falta de máquinas que façam esta limpeza de forma adequada e sem grandes perdas.

Cortez, Bajay & Braunbeck (1999) asseguram que qualquer insumo para ser usado como combustível para geração de energia precisa ter como pré-requisito preço competitivo, regularidade no suprimento e tecnologia aperfeiçoada. Como o uso energético do palhiço deverá se impor, a partir de proibição das queimadas, muito provavelmente ele terá inúmeras utilizações. Em vista disso, a tecnologia, de adensamento, transporte e preparo da palha, ainda precisa ser desenvolvida e testada para ser usada comercialmente, principalmente no que diz respeito aos aprimoramentos para redução nos custos destas operações. Por outro lado, quanto ao aspecto do aproveitamento energético da palha o principal fator limitante da colheita mecânica de cana inteira e crua é a falta de tecnologia de limpeza.

Sotelo & Correa (1999) em Cuba, observaram em uma estação de separação a seco, que são centros de recepção e limpeza onde a cana é reduzida no tamanho e separadas mediante fortes correntes de ar, que a quantidade de palhiço separada era cerca de 50 $kg \cdot Mg^{-1}$

de cana processada. A composição do palhicho encontrada por eles foi: pontas, folhas verdes e rebentos (59 %), palha (28 %), fragmentos de cana (9 %) e outras (4 %).

Schembri; Hobson & Paddock (2002) descrevem o desenvolvimento do protótipo de uma máquina de separação do palhicho associado à cana, alcançando altos níveis de separação do palhicho (91 a 95 % do palhicho recolhido) e com menos de 1 % de perdas de cana. A quantidade de palhicho é de 32 % (sendo 7 % de ponteiros e 25 % de folha secas e verdes) do total colhido pelas máquinas.

Segundo Hobson et al. (2002) o desempenho desse protótipo alcançou 150 Mg de biomassa (cana + palhicho) processadas por hora. Os autores ainda afirmam que colher cana crua, separando posteriormente o palhicho na usina, poderá dobrar a quantidade potencial de matéria-prima para geração de energia.

Jakeway (2003) avaliou o recolhimento da biomassa de cana por uma colhedora de cana e por uma colhedora de forragens, para seu aproveitamento como combustível. Nesta experiência colheu-se integralmente cana de alto teor de fibra. Houve tombamento da cana pelo vento, o que segundo o autor afetou o desempenho das máquinas. No cálculo da capacidade efetiva não foram incluídos os maiores tempos de manutenção, relacionados principalmente às quebras das máquinas. A massa específica de transporte foi determinada como a relação entre o peso transportado pelo caminhão e capacidade de volumétrica da carroceria. Para a colhedora de cana a massa específica da carga transportada foi $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, para a colhedora de forragem foi $65,7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, para umidade do material de 70%. A capacidade de trabalho em média foi $9,1 \text{ Mg}\cdot\text{h}^{-1}$ e $11,6 \text{ Mg}\cdot\text{h}^{-1}$, respectivamente para a colhedora de cana e para a colhedora de forragens. O custo total de produção dessa biomassa chegou a $79 \text{ US}\$ \cdot \text{Mg}^{-1}$, nesta avaliação. Desse custo final, o corte e carregamento corresponderam por cerca de $30 \text{ US}\$ \cdot \text{Mg}^{-1}$, para ambas as máquinas. O autor realizou também uma análise de sensibilidade econômica. No caso da colhedora de cana, quando a perda de cana foi aumentada em 50 %, o custo do corte e carregamento também aumentou para $33,53 \text{ US}\$ \cdot \text{Mg}^{-1}$. Por outro lado, o aumento em 50 % da capacidade da máquina e da massa específica da carga transportada da biomassa resultou na diminuição do custo do corte e carregamento para, respectivamente, $25,87 \text{ US}\$ \cdot \text{Mg}^{-1}$ e $27,53 \text{ US}\$ \cdot \text{Mg}^{-1}$. Para a colhedora de forragens, aumentando a perda de cana em 50 %, o custo do corte e carregamento aumenta para $33,74 \text{ US}\$ \cdot \text{Mg}^{-1}$. E quando a capacidade da máquina e a massa específica da carga transportada

foram aumentadas o custo do corte e carregamento reduziu para 24,09 US\$.Mg⁻¹ e 27,98 US\$.Mg⁻¹, respectivamente.

Com base em históricos de dados operacionais de várias usinas, Banchi & Machado (1988) verificaram que a eficiência geral no uso de máquinas agrícolas aproxima-se de 20%. Em uma usina, avaliaram os dados de dois anos de um controle manual e concluíram que as máquinas ficaram paradas em 67 % do total de horas disponíveis. Os autores ressaltam a importância de um gerenciamento do planejamento das operações agrícolas visando uma redução das horas perdidas, por meio de um controle não só das horas perdidas como também dos motivos das paradas. Além de um acompanhamento das atividades agrícolas tendo em vista o estabelecimento dos desvios do planejamento.

Nuñez Gago (1986) analisou os custos operacionais e os custos indiretos de impurezas e perdas de cana no campo. Foram analisados quatro sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar, sendo eles denominados de “Manual convencional”, “Manual com carregamento contínuo”, “Convencional mecanizado” e “Containers”. Nos dois primeiros sistemas o corte é manual. No sistema “Containers”, a colhedora após cortar a cana despeja-a nos transbordos, que são carretas teladas rebocadas por tratores, os quais por sua vez levam a cana para os caminhões, que fazem o transporte até a usina. No sistema “Convencional mecanizado” não se utiliza transbordo, com a cana sendo despejada pela colhedora diretamente nos caminhões. Segundo o autor, os dois últimos sistemas apresentaram menores custos quando não foram considerados as perdas de cana no campo e os níveis de impurezas da matéria-prima. O sistema “Containers” mesmo tendo um custo ligeiramente maior que o sistema “Convencional mecanizado”, tem enorme potencial de se tornar de menor custo, quando consideradas somente as operações básicas, principalmente se utilizadas duas carretas por trator.

Foi realizado por Figueiredo Filho & Arraes (1988) um estudo da influência dos principais parâmetros que compõem os custos de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar do Sistema Convencional Mecanizado. Os autores afirmam que os parâmetros que têm destaque como redutores de custo da operação de transporte interno são a carga da “Julietta” e número médio de viagens, pois as aumentando em 1% dos seus valores, o custo destas operações diminui em 0,99% e 0,44%, respectivamente. O tempo auxiliar, o valor de aquisição da máquina e o custo da mão-de-obra do operador caracterizaram-se como os mais sensíveis

no aumento do custo do transporte interno, uma vez que, aumentando seu valor em 1% o custo do transporte interno aumenta 0,74%, 0,32% e 0,31%, respectivamente. Já para o transporte para a usina realizado por caminhões o parâmetro de maior sensibilidade para redução do custo também foi a carga do veículo, com o custo do transporte externo reduzindo-se em 0,99% quando a carga transportada foi 1% maior. Por outro lado, os parâmetros preço do combustível e valor de aquisição da máquina foram os responsáveis pelo maior aumento no custo do transporte externo. Para cada 1% que o preço do combustível e o valor de aquisição aumentaram houve, respectivamente, um acréscimo no custo do transporte externo de 0,27% e 0,22%.

Figueiredo Filho, Banchi & Braunbeck (1984) estudaram a influência do tempo auxiliar, distância de transporte e capacidade diária, entre outros parâmetros sobre a capacidade de transporte de cana. Concluíram que para uma distância de transporte de 15 km a capacidade de transporte foi 135 Mg·dia⁻¹, utilizando-se um veículo do tipo Romeu e Julieta, com capacidade de carga de 30 Mg, e seguindo por um caminho com 50% das estradas asfaltadas.

Segundo Copersucar (1991) a capacidade de carga do transbordo de cana picada é de 18 m³, o que equivale à meia carga da carroceria do caminhão. Por sua vez, o caminhão está habilitado a transportar 45 Mg, uma vez respeitando a Lei da balança em todas as limitações que a mesma impõe para trânsito em estradas oficiais. Contudo, como o caminhão é predominantemente utilizado em transporte interno, a lotação média por veículo é de 52 Mg, podendo alcançar até 69 Mg.

Para estudar três sistemas de transporte de cana, Hirai; Köller & Rodrigues (1994) fizeram uma simulação dos parâmetros envolvidos no custo do transporte de cana. Os resultados obtidos com o uso do treminhão foram: carga diária transportada pelo veículo, 367 Mg·dia⁻¹; número de viagens por dia de cada veículo, 6,3 e distância diária percorrida pelo veículo, 127 km.

Belletti (1983) estudando três colhedoras de sorgo, relata que uma das máquinas utilizadas foi uma colhedora de cana (CLASS CC 1400) cujo desempenho foi superior à 50 Mg·h⁻¹. Um grande problema apresentado pelo autor foi o pequeno período de armazenagem da biomassa, devido à fermentação.

Avaliando o desempenho operacional e econômico de uma colhedora em cana crua, Nery (2000) verificou que o custo de colheita variou de 0,65 a 1,19 US\$.Mg⁻¹, com a máquina operando nas velocidades médias de 7,7 e 5,3 km.h⁻¹, respectivamente. A vida útil da colhedora foi determinada como sendo 18.000 horas, sendo 3.000 horas por ano ou safra. A capacidade operacional para a velocidade de 5,3 km.h⁻¹, foi 40 Mg.h⁻¹, 48 Mg.h⁻¹, 57 Mg.h⁻¹, 66 Mg.h⁻¹ quando a Eficiência de Campo utilizada era de 45%, 55%, 65%, 75%, respectivamente. O consumo de combustível com a máquina trabalhando a 5,3 km.h⁻¹ foi de 0,69 L.Mg⁻¹. Determinou-se também que 80 % da massa vegetal total do canavial é formada por colmos.

Léon (2000) avaliou o desempenho operacional de duas colhedoras de cana crua. A capacidade operacional, de ambas as colhedoras à velocidade de 5,4 km.h⁻¹, variou de próximo de 40 Mg.h⁻¹ a pouco menos de 80 Mg.h⁻¹, em função da Eficiência de Campo utilizada, de 45%, 55%, 65%, 75%.

Utilizando equações empíricas, Lopes (1995) desenvolveu um modelo representativo das operações de carregamento e transporte, com o objetivo de analisar o processo de colheita de cana. O custo estimado pelo modelo para o reboque de carretas foi de 0,67 R\$.Mg⁻¹, utilizando tratores de 140 cv. A velocidade média nas estradas de terra foi de 30,51 km.h⁻¹ e nas estradas de asfalto foi de 54,17 km.h⁻¹. O custo do transporte variou de 0,81 a 1,32 R\$.Mg⁻¹, para caminhões de maior e menor capacidade de carga, respectivamente. O autor realizou também uma análise de sensibilidade do custo total – carregamento, reboque e transporte – em função dos principais parâmetros. O Salário do Operador foi o parâmetro que mais influenciou positivamente o custo total. Em seguida veio o Custo de Aquisição das máquinas, Preço do Diesel e Custo de Manutenção. Por outro lado, o parâmetro que melhor agiu como redutor do custo total foi Carga Útil Transportada, seguida por Eficiência Operacional, Capacidade Operacional e Velocidade nas estradas.

2.3 Legislação de transporte

De acordo com a Resolução nº 12/98 do Conselho Nacional de Trânsito, o limite máximo autorizado de peso bruto total é de 45 Mg por unidade ou combinação de veículos ou 10 Mg de peso bruto por eixo isolado, nas superfícies das vias públicas. O Conselho Nacional de Trânsito também estabelece para veículos, com ou sem carga, a largura máxima de 2,60 m

e altura de 4,40 m. Já o comprimento total é de 14 m, para veículos simples, 18,15 m, para veículos articulados e 19,80 m, para veículos com reboque. Não sendo permitido o registro e licenciamento de veículos, cujas dimensões excedam às fixadas nesta resolução. Para veículos, cujas dimensões excedam os limites previstos nesta resolução (Treminhão), há necessidade de ser concedida uma autorização específica anual, fornecida pela autoridade com circunscrição sobre a via e considerando os limites dessa via. Esta autorização tem validade de um ano sendo renovada até o sucateamento do conjunto veicular, obedecendo ao volume de tráfego e traçado da via (CONTRAN, 1998).

3. Material e métodos

3.1. Máquinas

O material considerado no estudo envolve fundamentalmente máquinas para o enleiramento, recolhimento, adensamento, carregamento, transporte e redução de tamanho do palhiço, segundo a relação da Tabela 1, e cujas especificações detalhadas estão contidas na Tabela 2.

Tabela 1. Máquinas empregadas na simulação dos custos de recolhimento do palhiço.

Máquinas	Função
Trator	Acionamento de enleiradora, enfardadora, transbordos e prensa.
Enfardadora	Recolhimento e adensamento do palhiço.
Enleiradora	Concentração na forma de leiras do palhiço esparramado no solo.
Recolhedora de forragens	Recolhimento e redução do tamanho do palhiço.
Carregadora	Carregamento e descarregamento dos fardos.
Transbordo	Carretas teladas basculantes para transporte interno do palhiço.
Bass boy	Transbordo, com esteira dosadora, para abastecimento da prensa.
Transmódulo	Transporte do fardo adensado pela fardo algodoeiro.
Caminhão	Transporte externo do palhiço.
Prensa de algodão	Adensamento do palhiço.
Triturador estacionário	Fragmentação dos fardos grandes.
Briquetadora	Adensamento do palhiço.
Peletizadora	Adensamento do palhiço.
Estação de limpeza a seco	Separação entre o palhiço e os rebolos.

A vida útil e os valores de aquisição e residual das máquinas foram determinados por meio de catálogos de fabricantes e contatos pessoais com revendedoras. O fator de Reparos e Manutenção(RF) foi adaptado de ASAE (1994) e Molin & Milan (1992). Este fator está relacionado ao porte da máquina, refletido pelo seu valor de aquisição, e ao seu uso. Quanto maiores forem o uso e o porte da máquina, maior é o valor deste índice.

Tabela 2. Características das máquinas analisadas.

Máquinas	Marca/modelo	Potência (cv)	Valor aquisição (R\$)	Vida útil (h ou km) ¹	Valor residual (%)	RF ² (%)
Trator A	VALMET BM 110	110	96.000,00	12.000	20	100
Trator B	VALMET BH 140	140	123.500,00	12.000	20	100
Carregadora/Descarreg.	CBT Santal	112	45.000,00	15.000	25	100
Caminhão	VOLVO FM 12 Romeu e Julieta	340	180.000,00	1.000.000	15	100
Caminhão (Sist. Granel)	VOLVO VM 23	240	140.000,00	1.000.000	15	100
Transmódulo	BUSA Mercedes 2217	380	123.200,00	1.000.000	15	100
Estação de limpeza	<i>Protótipo</i> ⁽³⁾	--	6.000.000,00	20.000	20	80
Enleiradora	STABRA Rotomax 400/2	--	16.000,00	10.000	15	60
Enfardadora	STABRA ERVHS 1205	--	135.000,00	10.000	15	75
Triturador estacionário	<i>Protótipo</i> ⁽⁴⁾	--	20.000,00	20.000	15	80
Recolhedora de forragens	JF FCT 1100	--	150.000,00	20.000	15	65
Bass boy	BUSA CTA 450	--	50.800,00	20.000	20	80
Prensa algodão	BUSA EB 10T	75	72.600,00	20.000	20	80
Briquetadora	BIOMAX B-95	75	250.000,00	20.000	20	75
Peletizadora	EQUIPAR M-40	40	112.500,00	20.000	20	75
Transbordo	SANTAL VT8 SC	--	68.000,00	20.000	20	80

¹ Para caminhões a vida útil é apresentada em quilômetros, para o restante das máquinas, em horas.

² RF = Fator de reparos e manutenção.

³ Protótipo desenvolvido por Sugar Research Institute, Austrália.

⁴ Protótipo desenvolvido pela FEAGRI/UNICAMP.

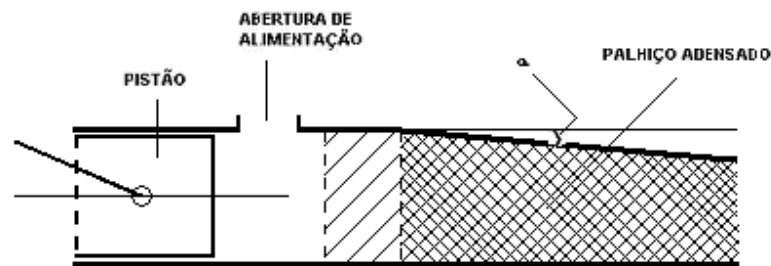
3.2. Massa específica final do palhiço

A massa específica final do palhiço depende do princípio de adensamento utilizado. Nos seis sistemas analisados nesta pesquisa, foram considerados princípios de adensamento que variam do adensamento nulo ou espontâneo, no caso de queda livre, até adensamento de alta pressão.

3.2.1. Princípios de adensamento

A seguir são apresentados os princípios de adensamento analisados neste trabalho para os diferentes sistemas:

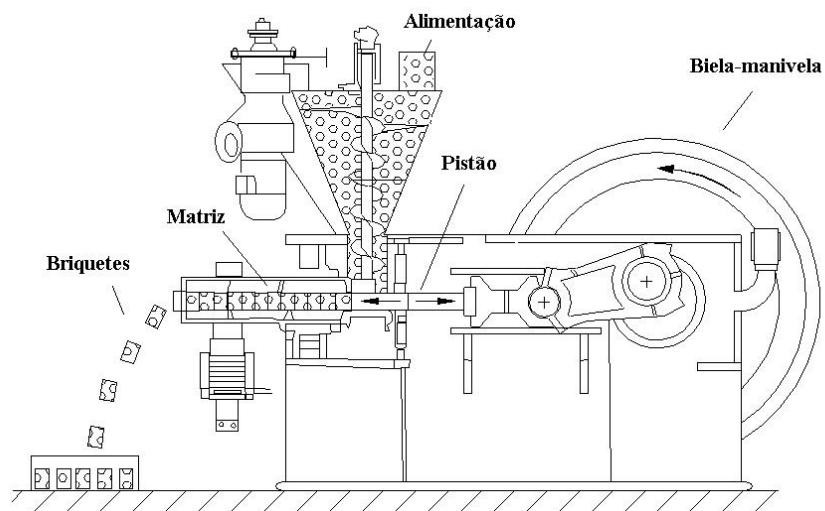
- **Fardo cilíndrico:** prensagem de baixa pressão, com amarração, utilizando mecanismo biela-amanivela ou de rolos;



Fonte: Modificada de Kanafojski, 1972.

Figura 1. Esquema de adensamento, de baixa pressão, por pistão mecânico acionado por biela-manivela.

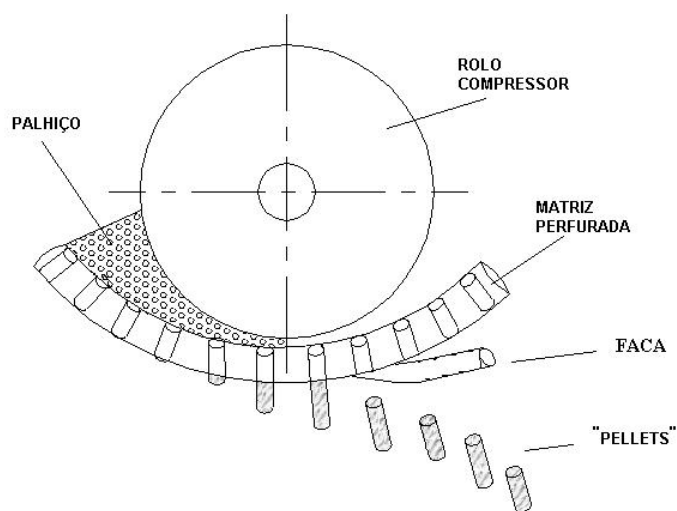
- **Briquetagem:** prensagem de alta pressão, exercida de forma descontínua, sem amarração, utilizando mecanismo biela-manivela;



Fonte: Modificada de Eriksson & Prior, 1990.

Figura 2. Esquema de adensamento, de alta pressão, por pistão mecânico acionado por biela-manivela.

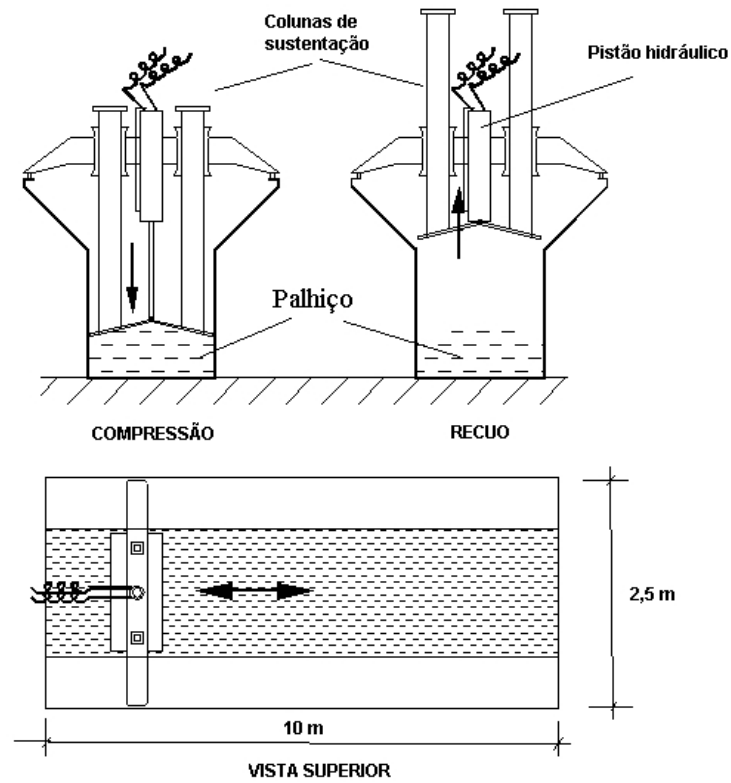
- **Peletização:** prensagem de alta pressão, exercida de forma contínua, sem amarração, utilizando mecanismo de rolos;



Fonte: Modificada de Eriksson & Prior, 1990.

Figura 3. Esquema de adensamento por rolo.

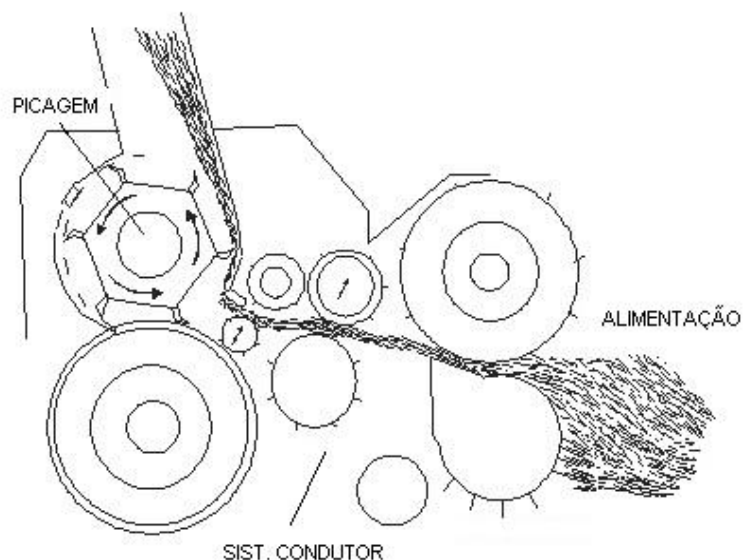
- **Fardo algodoeiro:** pistão hidráulico;



Fonte: Desenho próprio.

Figura 4. Esquema de adensamento por prensa hidráulica.

- **Picado a granel e colheita integral:** queda-livre;



Fonte: Modificada de JF Máquinas Agrícolas.

Figura 5. Esquema de picagem da recolhedora de forragens.

3.3. Caracterização dos sistemas

Na simulação, o recolhimento do palhço pode seguir por dois caminhos. No primeiro caminho o palhço é liberado pelas colhedoras na forma de uma camada espalhada sobre a superfície do solo. O palhço é deixado no solo para secagem por aproximadamente 10 dias, o que reduz sua umidade a pouco mais de 20 % em média (variando de cerca de 15 % a 30 %), segundo Rípoli (2002). Após esse período de secagem natural, o palhço é enleirado visando reunir em uma leira de maior massa, com aproximadamente $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$, o material que estava inicialmente espalhado. A largura de trabalho da enleiradora foi de 7,5 m. O palhço enleirado corresponde, aproximadamente, aos resíduos de cinco fileiras de plantio. Na simulação, considerou-se o enleiramento como sendo realizado com apenas uma passada da enleiradora, visando menor contaminação de terra. Esse material enleirado é posteriormente recolhido de acordo com o sistema utilizado, conforme descrito a seguir. O tratamento dado ao palhço, citado acima, corresponde operações iniciais envolvidas em cinco dos sistemas de recolhimento do palhço considerados nesta análise.

No segundo caminho, o palhiço é coletado por meio de colheita integral, ocorrendo a separação entre a cana e o palhiço na usina, utilizando-se um sistema de limpeza a seco.

As características gerais dos diferentes sistemas de recolhimento do palhiço, considerados neste trabalho, são apresentadas sucintamente a seguir:

A - Fardo cilíndrico

O palhiço enleirado é recolhido pela enfardadora, por meio da qual se realiza uma prensagem de baixa pressão, com amarração, utilizando mecanismo biela-manivela ou de rolos (este último, adotado nesta simulação). Os fardos são liberados pela enfardadora onde permanecem no campo para serem posteriormente carregados e transportados até o pátio de armazenamento, junto à caldeira. No momento da queima, os fardos são picados para facilitar a alimentação da caldeira.



Fonte: Stabra, 2005.

Figura 6. Enleiradora.



Fonte: Stabra, 2005.

Figura 7. Enfardadora.



Fonte: UNICAMP, 2005.

Figura 8. Protótipo de picador de fardo.

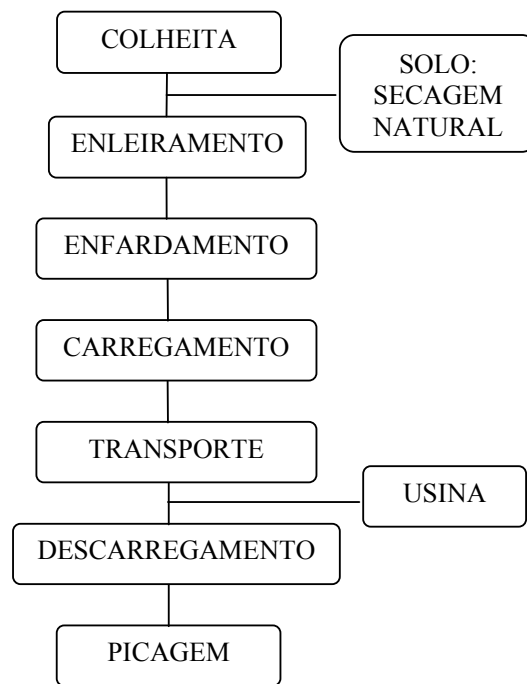


Figura 9. Fluxograma das operações realizadas no sistema fardo cilíndrico.

B - Picado a granel

As leiras são recolhidas pela picadora de forragem, a qual reduz o tamanho do palhiço, para aproximadamente 1 cm, lançando-o pelo princípio de transporte inercial até o transbordo. Este processo de picagem fina com armazenamento por queda livre a granel não envolve a operação de adensamento, portanto resulta em baixa massa específica da carga transportada, da ordem de $85 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Ripoli & Ripoli, 2004; Franco, 2003 e Ideanews, 2002). O transbordo carrega os caminhões que transportam o palhiço picado até o pátio de armazenamento perto das caldeiras.



Fonte: Revista Ideanews, 2002.

Figura 10. Recolhedora de forragens recolhendo o palhiço enleirado.

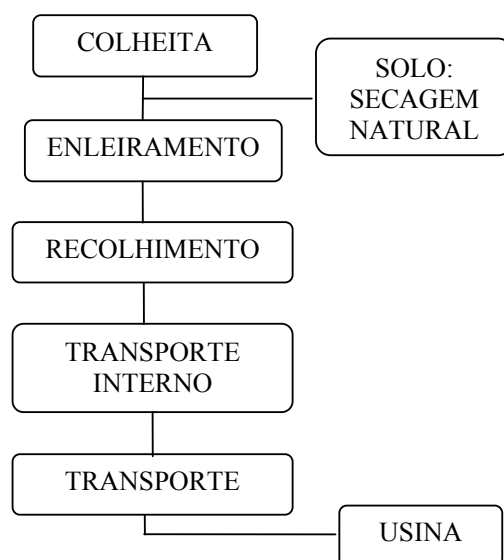


Figura 11. Fluxograma das operações realizadas no sistema picado a granel.

C - Briquetagem

Aqui o processo de recolhimento é semelhante ao sistema anterior. Depois de ser levantado pela picadora de forragens, o palhiço é lançado no transbordo. No entanto, ao invés de levá-lo aos caminhões que farão o transporte até a usina, o transbordo alimenta diretamente no campo as prensas briquetadoras, as quais efetuam uma prensagem de alta pressão, sem

amarração, utilizando mecanismo biela-manivela. Depois de adensado, o palhço na forma de briquetes é transportado até a usina por caminhões.



Fonte: Biomax, 2005.

Figura 12. Briquetadora.

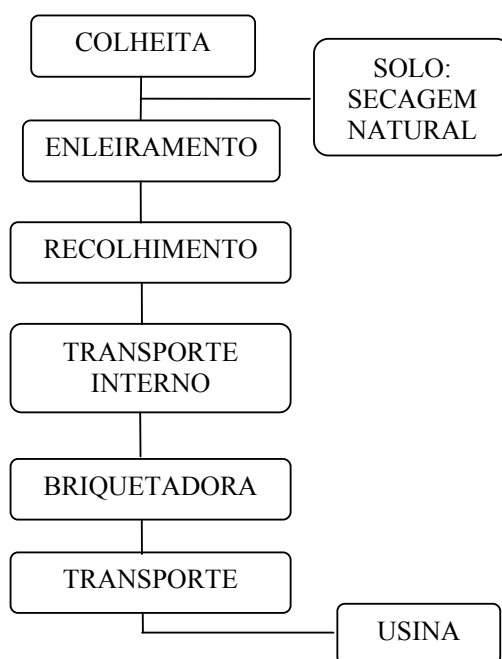
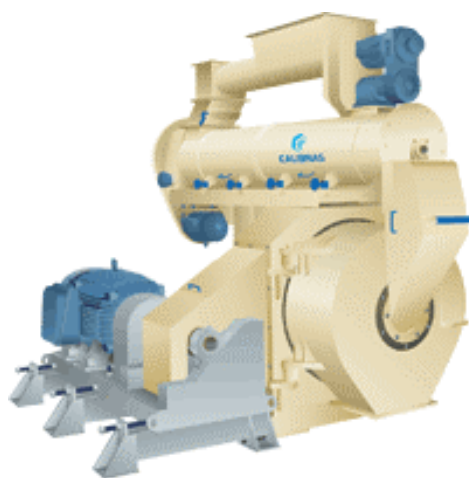


Figura 13. Fluxograma das operações realizadas no sistema de briquetagem.

D – Peletização

Este caminho de recolhimento de palhiço equivale ao de briquetagem, acima descrito, mudando apenas na configuração da prensa que utiliza um processo de adensamento contínuo, com auxílio de rolos que comprimem e forçam a passagem do material através de uma matriz perfurada, com pressão de adensamento suficiente para provocar a coesão das fibras não sendo necessário o uso de amarração como no caso dos fardos.



Fonte: Equipar, 2005.

Figura 14. Peletizadora.

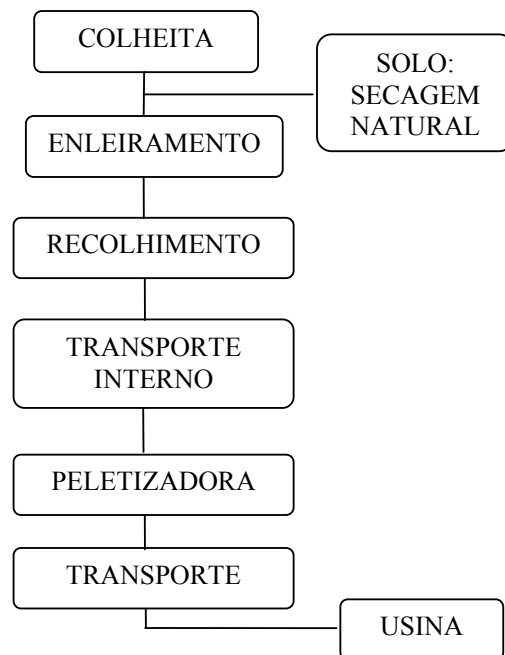


Figura 15. Fluxograma das operações realizadas no sistema de peletização.

E - Fardo algodoeiro

As leiras são levantadas pelo mecanismo recolhedor da picadora de forragem, a qual reduz o seu tamanho para aproximadamente 1 cm e lançam o material pelo princípio de transporte inercial até o transbordo. Em seguida o transbordo irá alimentar a prensa no campo. Neste caso o transbordo tem uma esteira dosadora, acionada por um motor hidráulico, para fazer o abastecimento da prensa de modo uniforme. A prensa opera em um processo intermitente de adensamento de baixa pressão, por meio de pistões hidráulicos, em unidades estacionárias (prensa de algodão), onde o peso próprio do fardo, em função de seu grande tamanho, garante a manutenção de uma maior densidade, portanto não necessitando amarração. O fardo é transportado por um caminhão basculante especial até a usina.



Fonte: Revista Ideanews, 2002.

Figura 16. Fardo depois de adensado pela prensa de algodão.

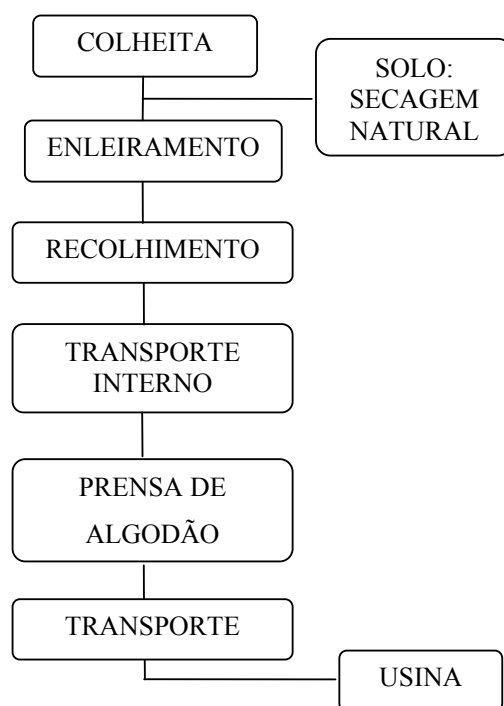


Figura 17. Fluxograma das operações realizadas no sistema Prensa de Algodão.

F – Colheita integral

Neste sistema, a cana é apanhada juntamente com palhiço pela colhedora, que está com os extratores desligados. A cana e o palhiço misturados são lançados, pelo princípio de transporte inercial até o transbordo que os conduzem até o caminhão. Este, por sua vez, faz o transporte desse material até a usina onde são separados em uma unidade de limpeza a seco, envolvendo separação pneumática e mecânica com discos poligonais rotativos.



Figura 18. Colheita integral.



Fonte: Schembri, Hobson & Paddock, 2002.

Figura 19. Protótipo de estação de limpeza.

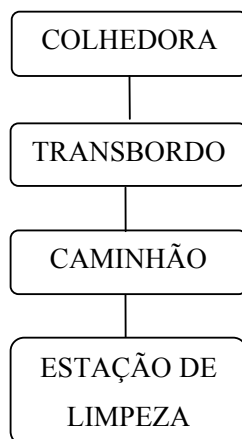


Figura 20. Fluxograma das operações realizadas no sistema de colheita integral.

3.4. Parâmetros administrativos

Os dados da Tabela 3 foram obtidos por contatos pessoais com Departamentos de pessoal de várias usinas, com distribuidoras de combustíveis, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e com revendedores de corda de amarração. Os parâmetros foram fixados entre os meses de outubro e novembro de 2004. A taxa de câmbio foi estabelecida pelo seu valor médio no mês de novembro de 2004.

Tabela 3. Parâmetros administrativos.

Salários (R\$.mês ⁻¹)		Preços		Taxas e encargos	
Tratorista	800,00	Combustível (R\$.litro ⁻¹)	1,60	Taxa de Câmbio (R\$.US\$ ⁻¹)	3,00
		Óleo motor(R\$.litro ⁻¹)	6,00		
Operador	1.000,00	Óleos de transmissão e hidráulico (R\$.litro ⁻¹)	6,50	Encargo sociais (%)	70
Motorista	1.300,00	Energia elétrica (R\$.kwh ⁻¹)	0,22	Taxa de juros (%)	12
		Corda de amarração do fardo (sizal) (R\$.kg ⁻¹)	9,00		

Para as simulações, considerou-se um período anual de uso das máquinas de 210 dias, com aproveitamento de 85 % dos dias úteis de operação (LOPES, 1995). O período anual de uso das máquinas foi determinado mediante contatos pessoais com as usinas. Apesar do

período anual de uso e da quantidade de dias trabalhados apresentarem alta variação, segundo Asae (1994) principalmente em função do clima da região, declividade do terreno, tipo de solo, drenagem, tipo de operação, etc., são valores representativos para uma safra de cana-de-açúcar na região centro-sul (UNICA, 2003). As jornadas de trabalho utilizadas na simulação foram de 24 h.

A quantidade de palhiço foi de 20 Mg·ha⁻¹ (FURLANI NETO, RIPOLI & VILLA NOVA, 1997). Estimando uma taxa de retirada de 50%, a quantidade de palhiço recolhido é cerca de 10 Mg·ha⁻¹, quantidade semelhante à citada por Macedo & Cortez (2000) e Rípoli (2002). As características do palhiço adensado podem ser encontradas na Tabela 4.

Tabela 4. Características do palhiço adensado pelos diferentes processos.

Características	Processo			
	Fardo cilíndrico ⁽¹⁾	Fardo algodoeiro ⁽²⁾	Briquete ⁽³⁾	“Pellet” ⁽³⁾
Massa específica (kg·m ⁻³)	170	160	1.000	1200
Massa específica aparente (kg·m ⁻³)	--	--	500	600
Peso (kg)	231	10.000	2,4	0,01
Volume (m ³)	1,36	62,5	0,002	0,00001
Altura (m)	--	2,5	--	--
Largura (m)	--	2,5	--	--
Comprimento (m)	1,2	10	0,30	0,035
Diâmetro (m)	1,2	--	0,10	0,01

⁽¹⁾ Rípoli (2002) e Bizuti (2003). ⁽²⁾ Ideanews (2002). ⁽³⁾ Seminário Sobre Bagaço de Cana (1983).

É importante destacar a importância da massa específica aparente, que é a densidade resultante de um volume preenchido por um conjunto de peças amontoadas aleatoriamente. De modo geral, segundo Eriksson & Prior (1990), a massa específica aparente é metade da massa específica da peça individual, tanto para briquetes e como para “pellets”.

Após o enleiramento, a massa específica das leiras pode ser calculada através da Equação (3):

$$D_{leira} = \frac{Q_{palhiço} \cdot L_{trab}}{10000} \quad (3)$$

sendo:

- D_{leira} = massa específica da leira, kg·m⁻¹ linear;

- $Q_{\text{palhiço}}$ = quantidade de palhiço espalhado sobre o solo após a colheita, $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$;
- L_{trab} = largura de trabalho, m;

3.5. Tempos de trabalho ¹

Os tempos de trabalho foram estimados por intermédio de contatos pessoais com as usinas.

Tempo produtivo (T_{prod}): é o tempo em que a máquina está efetivamente realizando sua função produtiva.

Tempo auxiliar (T_{aux}): corresponde ao tempo que máquina utilizou para realizar funções auxiliares necessárias à função produtiva, porém durante esse período ela não realiza efetivamente sua função produtiva.

Tempo perdido (T_{perd}): é o período que a máquina estava disponível para efetuar sua função produtiva, mas não foi utilizada em função de situações gerenciais.

Tempo manutenção (T_{manut}): são as horas usadas para manutenção e reparos mecânicos da máquina, tanto preventivos quanto corretivos.

Jornada diária de trabalho (J_{trab}): é a somatória dos tempos produtivo, auxiliar, perdido e de manutenção.

3.6. Eficiências de tempo ²

Após as estimativas dos tempos, as eficiências puderam ser calculadas. A eficiência geral do sistema de aproveitamento de palhiço pode ser dividida em quatro componentes principais, associadas com as características intrínsecas da operação e da área, do gerenciamento, da própria máquina e das determinações administrativas da direção da empresa.

3.6.1. Eficiência teórica (Ef_t)

É a relação entre o tempo que a máquina está desempenhando efetivamente sua função produtiva, ou seja, processando o palhiço, e o tempo total que a máquina permaneceu

¹ Definições adaptadas de Fernandes (2000) e Nuñez Gago (1986).

² Adaptado de Fernandes (2000) e Nuñez Gago (1986).

em operação (tempo registrado pelo horímetro ou com motor funcionando) incluindo tempos auxiliares, necessários para a realização da operação, ou seja, inerentes à mesma, mas que durante os quais não existe processamento efetivo de palhiço, como, por exemplo, manobras de cabeceiras, desembuchamentos, deslocamentos entre talhões, etc., é dada pela Equação (4):

$$Ef_{oper} = \frac{T_{prod}}{T_{prod} + T_{aux}} \cdot 100 \quad (4)$$

3.6.2. Eficiência de utilização (Ef_{util})

Conforme pode ser visto na Equação (5), corresponde à relação entre o tempo em que a máquina esteve efetivamente em funcionamento, que será admitido igual ao tempo registrado pelo horímetro, e o período em que a máquina estava disponível, porém não foi utilizada por ocasião de situações gerenciais do sistema e que independem da máquina, por exemplo, paradas da carregadora por falta de caminhão ou vice-versa, paradas por chuva ou excesso de orvalho, falta de programação sobre a próxima área a ser processada, etc. Esta eficiência depende fundamentalmente do gerenciamento do sistema, o qual envolve uma logística cujo grau de complexidade aumenta com o número de operações e máquinas envolvidas, e principalmente, quando existe interação direta entre os mesmos, como é o caso das operações de carregamento e transporte ou picagem e transporte.

$$Ef_{util} = \frac{T_{prod} + T_{aux}}{T_{prod} + T_{aux} + T_{perd}} \cdot 100 \quad (5)$$

3.6.3. Eficiência de disponibilidade (Ef_d)

Corresponde à relação entre o tempo em que a máquina esteve disponível para operar e às horas da jornada diária de trabalho, que inclui o tempo necessário para a manutenção das máquinas e durante o qual não está disponível para operar, de acordo com a Equação (6). Esta eficiência permite estimar o tempo que a máquina estará disponível diariamente para operar.

$$Ef_{disp} = \frac{T_{prod} + T_{aux} + T_{perd}}{T_{prod} + T_{aux} + T_{perd} + T_{man}} \cdot 100 \quad (6)$$

3.6.4. Eficiência de aproveitamento (Ef_a)

Como pode ser vista na Equação (7), corresponde à relação entre a jornada de trabalho e às 24 horas do dia. A jornada de trabalho é determinada pela direção da empresa em função fundamentalmente das condições de luminosidade, aspectos legais relacionados com a mão-de-obra, segurança, qualidade das operações, capacidade de investimento em máquinas e sazonalidade das operações.

$$Ef_{\text{aprov}} = \frac{J_{\text{trab}}}{24} \cdot 100 = \frac{T_{\text{prod}} + T_{\text{aux}} + T_{\text{perd}} + T_{\text{man}}}{24} \cdot 100 \quad (7)$$

3.6.5. Eficiência geral (Ef_{geral})

Representa a parte, das 24 horas do dia, em que a máquina está efetivamente desempenhando sua função produtiva e corresponde ao produto das quatro eficiências segundo a Equação (8).

$$Ef_{\text{geral}} = Ef_a \times Ef_d \times Ef_u \times Ef_d = \frac{T_{\text{prod}}}{24} \cdot 100 \quad (8)$$

3.7. Capacidades³

Uma vez estabelecidas as eficiências, pode-se determinar as capacidades de trabalho correspondentes, que representam na realidade parâmetros de desempenho do sistema que podem alertar para a necessidade de melhorar eficiências baixas e prejudiciais ao desempenho global do sistema, mas com potencial de aprimoramento. A capacidade de cada operação foi expressa em termos de toneladas processadas por dia, considerando que a capacidade teórica das máquinas em funcionamento ininterrupto deve ser corrigida por quatro eficiências, associadas aos tempos necessários para outras atividades do que apenas a operação específica das máquinas.

^{3 3} Adaptado de Fernandes (2000), Nuñez Gago (1986), Mialhe (1974) e Balastreire (1990).

3.7.1. Capacidade teórica (C_T)

Representa a quantidade teórica de palhiço que a máquina conseguiria processar por unidade de tempo se o funcionamento fosse ininterrupto.

a) Capacidade teórica da enleiradora

$$C_{Enl_T} = \frac{Q_{Palhiço} \cdot V \cdot L_{Trab}}{10} \quad (9)$$

sendo:

- C_{Enl_T} = capacidade teórica da enleiradora, Mg·h⁻¹;
- $Q_{Palhiço}$ = quantidade de palhiço espalhado sobre o solo após a colheita, kg·ha⁻¹;
- L_{Trab} = largura de trabalho, m;

b) Capacidade teórica da enfardadora e da recolhadora de forrageem

$$C_{EF_T} = D_{leira} \cdot V \quad (10)$$

sendo:

- C_{EF_T} = capacidade teórica da enfardadora ou recolhadora de forragens, Mg·h⁻¹;
- D_{Leira} = massa específica da leira, kg·m⁻¹ linear;
- V = velocidade, km·h⁻¹;

c) Capacidade teórica da carregadora

$$C_{Crg_T} = \frac{3600 \cdot \text{Peso}}{\text{Ciclo} \cdot 1000} \quad (11)$$

sendo:

- C_{Crg_T} = capacidade teórica da carregadora, Mg·h⁻¹;
- Peso = massa do fardo, kg;
- Ciclo = tempo gasto para a carregadora carregar ou descarregar o fardo, seg.;

d) Capacidade teórica do caminhão

$$CCam_T = \frac{J_{trab} \cdot 60}{CicloC} \quad (12)$$

onde:

$$- \quad CicloC = \frac{2 \cdot Dist}{V_m \cdot 60} + T_{descarg} + \frac{TON}{CCrg_T \cdot 60} \quad (13)$$

sendo:

- CicloC = tempo que o caminhão gasta para ser carregado, levar o palhiço até a usina e retornar, minutos;
- Dist = distância de transporte, km;
- V_m = velocidade média do caminhão carregado e vazio, $km \cdot h^{-1}$;
- $T_{descarg}$ = tempo médio de descarregamento do caminhão, minuto;
- TON = capacidade de carga do caminhão, Mg;
- $CCrg_T$ = capacidade teórica da carregadora, $Mg \cdot h^{-1}$;

e) Capacidade teórica do transbordo

$$CTrans_{pot} = \frac{60 \cdot N \cdot Carga}{t_1 + t_2} \quad (14)$$

sendo:

- $CTrans_{pot}$ = capacidade teórica do transbordo, $Mg \cdot h^{-1}$;
- N = quantidade de transbordo por trator;
- Carga = capacidade de carga de cada transbordo, Mg;
- t_1 = tempo médio para se encher todos os transbordos do trator, minuto;
- t_2 = tempo médio para o transbordo levar o material colhido e descarregá-lo no caminhão, minuto;

f) Capacidade teórica da prensa de algodão

$$CP_{pot} = \frac{60 \cdot P_f}{[(N_b \cdot t_1) + t_2 + t_3] \cdot 1000} \quad (15)$$

sendo:

- CP_{pot} = capacidade teórica da prensa, $Mg \cdot h^{-1}$;
- P_f = massa do fardo, Mg;
- N_b = quantidade de bassboy por fardo;
- t_1 = tempo médio para cada bassboy abastecer a prensa, minuto;
- t_2 = tempo médio para o bassboy ser enchido pela recolhedora de forragens, minuto;
- t_3 = tempo médio para o transbordo levar o material colhido e descarregá-lo no caminhão, minuto;

g) Capacidade teórica da briquetadora, peletizadora e estação de limpeza

Para a briquetadora e peletizadora, os dados foram conseguidos por meio do teste desenvolvido pela Copersucar utilizando bagaço de cana (SEMINÁRIO SOBRE BAGAÇO DE CANA, 1983), pois não foi encontrado, na bibliografia consultada, nenhum trabalho a respeito de briquetagem e peletização de palhiço. Já com relação a estação de limpeza os dados utilizados foram conseguidos em Hobson et al. (2002).

3.7.2. Capacidade efetiva (C_{ef})

É o trabalho que a máquina realizou na prática, conforme a Equação (16):

$$C_{ef} = C_T \cdot \frac{Ef_{geral}}{100} \quad (16)$$

3.7.3. Capacidade diária (C_{dia})

Representa a quantidade de palhiço que a máquina consegue processar por dia. É dada pela Equação (17):

$$C_{\text{dia}} = C_T \cdot \frac{E_{\text{fgeral}}}{100} \cdot 24 = C_{\text{ef}} \cdot 24 \quad (17)$$

3.8. Capacidade volumétrica dos transportes

A capacidade volumétrica da carreta dos transbordos e da carroceria dos caminhões é de cerca de 20 m³ e 80 m³, respectivamente, de acordo com os catálogos dos fabricantes. Sendo utilizados nesta análise, 2 carretas por transbordo e 2 carrocerias por caminhão, para os sistemas de picado a granel, colheita integral, briquetagem e peletização. Para os sistemas fardo cilíndrico e fardo algodoeiro utilizou-se caminhão de 1 carroceria.

3.9. Carga efetiva

A carga efetiva é a carga que o veículo de transporte leva realmente. Como visto na Equação (18), ela varia de acordo com o grau de adensamento do palhico atingido nos diversos sistemas e com a capacidade volumétrica dos transbordos e dos caminhões. A carga efetiva é limitada em, no máximo, 8 Mg em cada carreta do transbordo, segundo o fabricante, e em 45 Mg para o caminhão, conforme a Resolução nº 12/98, do CONTRAN.

$$\text{CargaEf} = \frac{\text{VolCarga} \cdot \text{MEp}}{1000} \quad (18)$$

sendo:

- CargaEf = carga efetiva, Mg;
- VolCarga = capacidade volumétrica do transporte; m³;
- MEp = massa específica do palhico; kg·m⁻³.

3.10. Balanço energético

Simulou-se o balanço energético para cada sistema de recolhimento do palhico com base na metodologia proposta por Ripoli (1991). Este parâmetro representa, nesta análise, a relação entre a energia contida no palhico e a energia empregada para seu recolhimento.

O balanço energético foi determinado através da seguinte Equação (19):

$$BE = \left(1 - \frac{CC \cdot D_C \cdot PC_d}{PC_P} \right) \cdot 100 \quad (19)$$

sendo:

- BE = Balanço Energético, %;
- CC = consumo de combustível, L·h⁻¹;
- D_C = massa específica do combustível, kg·L⁻¹;
- PC_d = poder calorífico do combustível, kcal·L;
- PC_P = poder calorífico do palhiço, kcal·kg.

3.11. Custos

a) Reparos e Manutenção

Refere-se às despesas necessárias para deixar as máquinas em condição de uso e garantir um padrão de desempenho. De acordo com Molin & Milan (2002), é a razão entre o valor de aquisição das máquinas e sua vida útil, multiplicada pelo fator RF, que é uma porcentagem do valor de aquisição da máquina (Tabela 2), variando em função do tipo de máquina (ASAE, 1994), Equação (20):

$$CRM = \left[\frac{VA}{VU \cdot C_{ef}} \right] \cdot \left[\frac{RF}{100} \right] \quad (20)$$

sendo:

- CRM = custo de reparo e manutenção, R\$·Mg⁻¹;
- VA = valor aquisição, R\$;
- VU = vida útil do equipamento, horas;
- C_{ef} = Capacidade efetiva, Mg·h⁻¹;
- RF = Fator de reparos e manutenção, %.

b) Mão-de-obra

Refere-se às despesas com salários pagos aos operadores das máquinas. O custo da mão-de-obra é calculado levando-se em consideração o período total da safra, o salário dos

operadores, com seus respectivos encargos sociais (70 % de acréscimo no valor do salário), e em função do uso anual das máquinas, de acordo com a Equação (21):

$$C_{m-o} = \frac{\left(1 + \frac{PTS}{30}\right) \cdot \text{Salário} \cdot (1 + \text{Encargos Sociais})}{C_{dia} \cdot PTS} \quad (21)$$

sendo:

- C_{m-o} = Custo operador, R\$.Mg⁻¹;
- PTS = Período total da safra, dia;
- Salário = salário do operador, R\$.mês⁻¹;
- Encargos Sociais (FGTS, INSS, 13º salário, etc.), decimal;
- Uso anual = Uso anual da máquina, Mg.ano⁻¹;
- C_{dia} = Capacidade diária, Mg.dia⁻¹.

c) Depreciação e Juros

A depreciação foi calculada de acordo com o método proposto pela Asae (1994). Este método também é denominado por Noronha (1981) e Hofmann et al. (1987) como Método do Fundo de Recuperação do Capital. Como pode ser visto na Equação (22), a taxa de depreciação contém o fator de recuperação de capital (FRC) que permite a recuperação de um fundo, cuja quantia é igual ao valor de aquisição do trator menos seu valor residual, no período de sua vida útil (anos), recebendo uma anuidade cujo valor cresce a uma determinada taxa anual. Porém, Asae (1994) propõe que um juro simples seja somado à depreciação para estimar o custo de capital durante a vida da máquina. Por esse método, o investimento na máquina é multiplicado pelo fator de recuperação de capital (FRC) resultando, durante a vida da máquina, numa série de anuidades, que incluem os custos da depreciação e do capital.

$$\text{Depreciação} = (VA - VR) \cdot FRC + (VR \cdot \text{Juros}) \quad (22)$$

onde:

$$FRC = \frac{\text{Juros} \cdot (1 + \text{Juros})^{\text{Vida}}}{[(1 + \text{Juros})^{\text{Vida}}] - 1} \quad (23)$$

$$\text{Vida} = \frac{\text{Vida Útil}}{\text{Uso Anual}} \quad (24)$$

sendo:

- VA = Valor de aquisição da máquina, R\$;
- VR = Valor residual da máquina, R\$;
- FRC = fator de recuperação do capital, decimal;
- Juros, decimais;
- Vida útil = Vida útil da máquina, anos.

d) Taxas, garagem e seguro

Os gastos com taxas, garagem e seguros são estimados como 2 % do valor de aquisição da máquina, sendo 1 %, 0,75 % e 0,25 % para cada um, respectivamente (ASAE, 1994).

e) Combustíveis

O consumo de combustível foi calculado com base na potência do motor das máquinas e considerando uma porcentagem de utilização dessa potência, visto que para qualquer operação a potência total do motor deve ser maior que a requerida pelo implemento, ou seja, o motor deve dispor de uma reserva de potência para vencer sobrecargas instantâneas normais da operação. Portanto, o motor utiliza apenas parte de sua potência na maior parte de seu tempo de funcionamento. Esta porcentagem de potência utilizada depende da natureza da operação, sendo mais elevada em operações pesadas, como o preparo do solo, que pode atingir 60 % da potência do motor. Operações leves como carregamento com garra hidráulica, que opera bastante tempo sem carga, podem utilizar, em média 25%, da potência do motor. A porcentagem de utilização de potência para diversas operações agrícolas é apresentada por Nogueira (1987). O consumo específico dos motores de combustão interna, ciclo diesel, constitui parâmetro estabilizado para a tecnologia usada atualmente nos referidos motores. Foi adotado neste trabalho um consumo específico de 170 g/cv-h.

$$CC = \frac{P_{\text{Maq}} \cdot P_M \cdot C_{\text{esp.}}}{D_c \cdot 1000} \quad (25)$$

sendo:

- CC = consumo de combustível, L·h⁻¹;
- P_{Maq} = potência da máquina, cv;
- P_M = porcentagem média da potência utilizada, decimal;
- C_{esp} = consumo específico, g/cv-h;
- D_c = massa específica do combustível, kg·L⁻¹.

$$C_{\text{COMB}} = \frac{CC}{C_{\text{ef}}} \cdot P_{\text{COMB}} \quad (26)$$

sendo:

- C_{COMB} = Custo combustível, R\$·Mg⁻¹;
- P_{COMB} = Preço combustível, R\$·L⁻¹;
- C_{ef} = Capacidade efetiva, Mg·h⁻¹.

f) Lubrificantes

Segundo Asae (1994), se os filtros de óleo são trocados regularmente conforme as recomendações dos fabricantes, o custo dos lubrificantes é igual a 15 % do custo do combustível.

3.12. Análise de sensibilidade

Para a análise de sensibilidade, o custo de cada parâmetro envolvido no recolhimento do palhiço, para cada sistema, foi acrescido individualmente de 1% no seu valor e, posteriormente, foi comparado com o custo total originalmente calculado.

Os parâmetros analisados foram:

- Distância de Transporte;
- Massa específica final do palhiço;
- Salário da mão-de-obra;

- Encargos sociais;
- Juros;
- Jornadas de trabalho;
- Preço de combustível;
- Preço dos lubrificantes;
- Preço da energia elétrica;
- Corda de amarração do fardo;
- Dias úteis de safra;
- Valor de aquisição do equipamento;
- Vida útil das máquinas;
- Valor residual das máquinas;
- Carga do caminhão;
- Carga do transbordo;
- Eficiência geral;
- Capacidade teórica;
- Tempos perdido;
- Tempo de manutenção;
- Tempo auxiliar do transbordo, do Bassboy e da Prensa de algodão;
- Número de viagens por dia do caminhão;
- Consumo de energia elétrica;

4. Resultados e Discussão

Nesta análise comparativa, foram avaliados as diversas operações e seus respectivos parâmetros que compõem cada sistemas de recolhimento de palhiço. Inicialmente, analisaram-se as variáveis que influenciaram o transporte do material. Em seguida foi analisado o consumo de energia pelos processos de recolhimento. Estudou-se, também, o montante de investimento necessário em máquinas para cada sistema. Por último, observou-se a sensibilidade de cada parâmetro sobre o custo final de recolhimento do palhiço.

Para todas as simulações efetuadas foram considerados parâmetros correspondentes a desempenhos altos, que corresponderiam a sistemas consolidados operando próximos de sua máxima eficiência.

4.1. Massa específica do palhiço

No adensamento do palhiço pelos processos de fardo cilíndrico e fardo algodoeiro, sua massa específica atinge pouco menos de $200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Ripoli, 2002, Bizuti, 2003 e Ideanews, 2002). No caso do adensamento pelos processos de peletização e briquetagem, considerou-se a massa específica do palhiço como semelhante à atingida pelo bagaço e pela serragem quando também adensados por esses processos. A massa específica desses materiais situa-se em torno de $1.000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Seminário Sobre Bagaço de Cana, 1983 e Eriksson & Prior, 1990), porém a massa específica aparente fica reduzida a cerca de $500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Eriksson & Prior, 1990), para ambos processos. No sistema picado a granel, não há operação de adensamento, contudo, ocorre uma acomodação natural do palhiço nos compartimentos de carga devido à queda livre do palhiço no momento do recolhimento e à trepidação dos transbordos e dos caminhões ao realizarem o transporte. Como resultado dessa acomodação o palhiço tem uma massa específica, por volta de $85 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Ripoli & Riploi, 2004; Franco, 2003 e Ideanews, 2002), maior do que “in natura”, isto é, na forma que ele está no campo após a colheita, que neste caso está em torno de $60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Ideanews, 2002).

No sistema de colheita integral a massa específica da carga transportada também é afetada por causa dos rebolos de cana colhidos juntamente. A massa específica da carga quando se transporta apenas rebolos é de cerca de $450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Contudo, o palhiço é

transportado juntamente com os rebolos, perfazendo uma massa específica de carga de cerca de $350 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

4.2. Capacidade de Carga dos Veículos de transporte

Para a simulação, foi considerando um caminhão do tipo “Romeu e Julieta” com capacidade de carga de 80 m^3 . A influência da massa específica do material sobre a carga transportada pode ser vista na Tabela 5 para os processos de recolhimento do palhiço em estudo. Apesar do volume da carroceria ser semelhante nos processos, a carga transportada varia drasticamente entre eles.

Tabela 5. Estimativa dos parâmetros da operação de transporte em cada sistema.

	Sistemas					
	Picado a granel	Fardo algodoeiro	Fardo cilíndrico	Briquetag.	Peletiz.	Colheita integral
Carga efetiva (Mg) ¹	6	10	11,5	35	35	28
Viagens ²	156	100	87	29	29	36
Caminhões ³	18	9	9	3	3	5

¹ Carga efetiva (Mg) do caminhão para uma capacidade volumétrica da carga de 80 m^3 ;

² Número de viagens realizadas pelos caminhões nos sistemas, para transportar $1000 \text{ Mg}\cdot\text{dia}^{-1}$;

³ Quantidade de caminhões para transportar $1000 \text{ Mg}\cdot\text{dia}^{-1}$.

Para o sistema picado a granel, apesar de a massa específica da carga transportada aumentar devido à trepidação do caminhão, como isto acontece durante a viagem esse adensamento não foi considerado nos cálculos, pois não afeta a capacidade de carga do caminhão, uma vez que, não se acrescenta mais carga ao longo do caminho. Para o processo utilizado por esse sistema, o fator que limita a capacidade de carga dos veículos de transporte não é o peso de carga, mas seu volume. A Resolução 12/98 do CONTRAN restringe o comprimento máximo de um veículo com reboque em 19,80m, a largura máxima em 2,60m e a altura máxima em 4,40m. Entretanto, o comprimento total do veículo fica reduzido a 15,8 m após diminuir 2,5 m, para a motorização e cabine localizadas na frente do veículo. O comprimento, também, diminui após reduzir um espaço de 1,5 m para espaçamento entre caixa principal e reboque. A altura da carga fica reduzida em 1,5 m para acomodar as rodas, a transmissão e a suspensão do veículo, além de 1 m para viabilizar o transporte em pranchas, mesmo que rebaixadas. Por sua vez, a largura do veículo fica reduzida, ainda, em

aproximadamente 0,2 m para acomodar as paredes laterais das carrocerias. O volume útil tem, deste modo, aproximadamente 80 m³.

Portanto, neste processo o peso da carga transportada não alcança o peso bruto total permitido por lei, de 45 toneladas. O caminhão é sub-utilizado e em decorrência disso, é necessário um maior número de viagens e, conseqüentemente, um maior número de caminhões, como visto na Tabela 5. Considerando que, de acordo com a legislação, o fator limitante é o volume de carga, o desafio reside na maximização da carga, através do aumento de massa específica da carga transportada, para um volume máximo que não ultrapasse os limites das dimensões dos veículos, estabelecidos por lei para a circulação em vias públicas.

O sistema de fardo algodoeiro também apresenta grande número de viagens, mesmo atingindo massa específica final do palhiço maior que no sistema picado a granel. O fardo resultante do adensamento tem dimensões (2,5 x 2,5 x 10 m) e peso de cerca de 10 Mg, por isso transporta-se apenas um fardo por vez e, conseqüentemente, o caminhão aqui também é subutilizado e precisa realizar mais viagens. Neste caso também não é possível aumentar o volume transportado, pois o fardo tem as medidas da prensa onde foi adensado e mesmo que as dimensões da prensa fossem aumentadas, o fardo resultante ultrapassaria os limites da lei da balança.

Para o processo de transporte utilizado pelo sistema de fardo cilíndrico, como nos sistemas anteriores, o elevado número de viagens ocorre pelo fato de que o peso da carga transportada é inferior ao peso bruto total permitido pela Lei da balança, resultando, mais uma vez, em uma subutilização do caminhão. Considerando que o fardo tenha 1,2 m de diâmetro e de comprimento e que a carroceria do caminhão tenha 12,3 m de comprimento e 2,45 m de largura, conclui-se que é possível acomodar na carroceria duas fileiras com dez fardos.

Com relação à altura, a Equação (28) permite que se calcule a altura da carga com várias camadas de fardo. Portanto a altura da carga formada por duas camadas de fardo atinge 2,4 m, conforme pode ser calculado pela Equação (28). Segundo o catálogo do fabricante, os caminhões utilizados possuem a plataforma de carga da carroceria com 1,5 m de altura, desta forma, é possível concluir que a altura total do veículo, com a carga, chegue a 3,9 m, ficando assim, dentro das normas do CONTRAN. No entanto, ao acrescentar mais uma camada de fardo (três camadas) a altura total do veículo chegaria a 4,8 m, portanto ultrapassando os limites estabelecidos pela Lei da balança.

Assim sendo, conclui-se que a utilização de caminhão com prancha rebaixada possibilitaria transportar maior quantidade de fardos. Pois, neste caso a plataforma de carga da carroceria tem 1 m de altura e, segundo a Equação (28), a altura da carga com três camadas chegaria a 3,3 m e a altura total do veículo ficaria com 4,3 m, deste modo, dentro da lei.

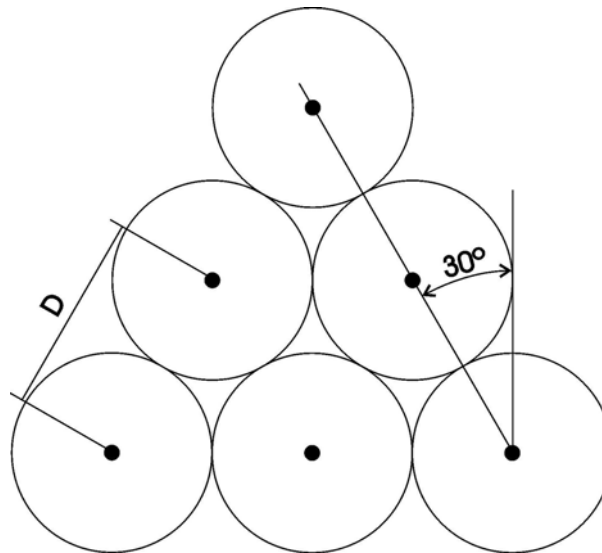


Figura 21. Desenho ilustrativo da acomodação dos fardos na carroceria do caminhão.

De acordo com a Equação (28) abaixo é possível determinar a altura da carga do caminhão em função da acomodação de duas ou três pilhas de fardos na carroceria.

$$H_C = D_F (1 + (N_F - 1) \cos 30^\circ) \quad (28)$$

sendo:

- H_C = altura da carga, m;
- D_F = diâmetro do fardo, m;
- N_F = número de fardos empilhados;

Por outro lado, pelos processos de alta pressão (peletização e briquetagem) atinge-se alta massa específica, por isso o volume a ser transportado é menor. Nestes sistemas o peso passa a ser o fator limitante devido à lei da balança, pois se o caminhão fosse carregado completamente o peso da carga ultrapassaria o peso bruto total de 45 toneladas permitidas pelo CONTRAN.

4.3. Custo transporte

Como pode ser visto na Figura 22, o custo do transporte diminui com a elevação da massa específica da carga transportada. Também é evidente que com pequeno adensamento da carga transportada consegue-se significativa redução do custo, visto que, aumentando-se a massa específica do palhiço “in natura” consegue-se redução de quase metade do valor do custo de transporte. A partir de cerca de 200 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ de massa específica, observa-se uma queda menos acentuada no custo. A aproximadamente 500 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, não se nota redução no custo de transporte. As massa específicas, consideradas na Figura 22, para os sistemas de briquetagem e peletização foram suas respectivas massa específicas aparente de 500 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e 600 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. As peças individuais de materiais biológicos adensados por estes processos atingem cerca de 1.000 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, entretanto quando estas peças individuais são reunidas, a massa específica resultante desse volume geralmente é a metade da massa específica da peça individual, segundo Eriksson & Prior (1990).

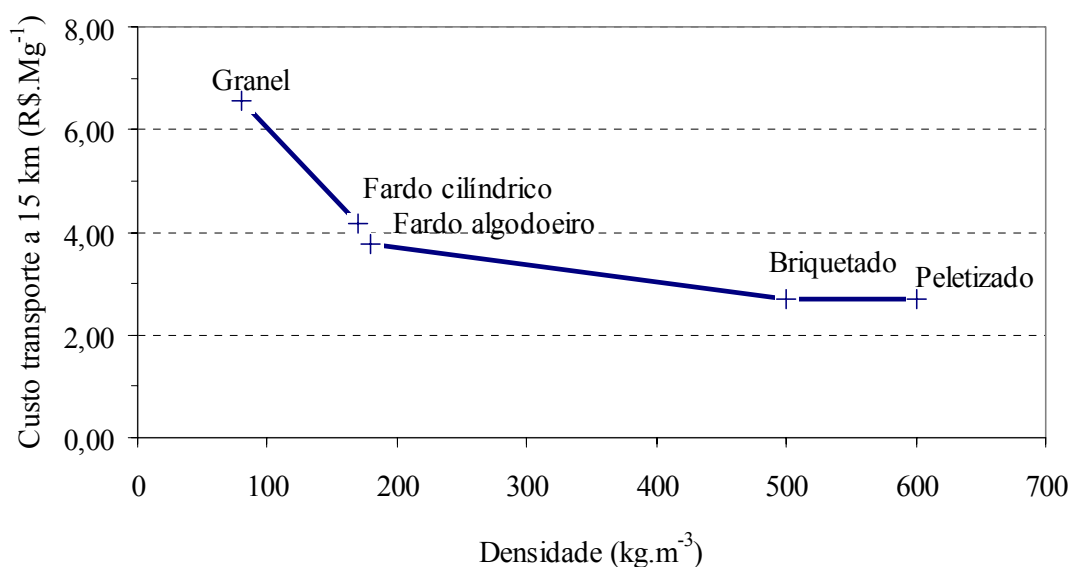


Figura 22. Estimativa do custo do transporte ($\text{R}\$. \text{Mg}^{-1}$) em função da variação da massa específica de carga ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Apesar de existir experiências de peletização e briquetagem com bagaço, não foi encontrada informação sobre estes processos utilizando palhiço. Cabe ressaltar que os

processos de adensamento do palhicho pelos sistemas de briquetagem e peletização, embora não tenham sido utilizados em escala piloto ou comercial, foram consideradas nesta análise por se tratarem de processos com características bem diferenciadas em termos da maior massa específica atingida e da possibilidade do manuseio a granel sem amarração para manter uma maior densidades de carga.

A principal diferença observada é quanto ao tamanho das fibras que compõem o palhicho. Enquanto o bagaço é formado por fibras de tamanho reduzido, devido ao preparo e à moagem para extração do caldo, o palhicho é composto por fibras longas, de maior tamanho, mesmo depois de ser picado pela recolhadora de forragens, o que poderá causar certa dificuldade quanto à durabilidade da aglomeração, para ambos sistemas.

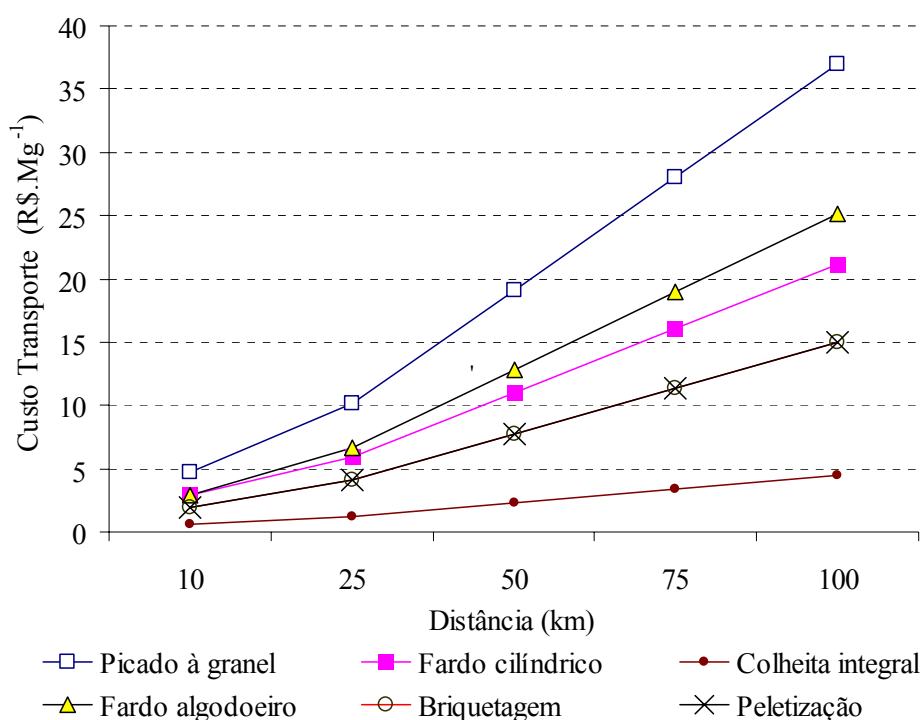


Figura 23. Simulação do custo do transporte ($\text{R}\$. \text{Mg}^{-1}$) em função da distância de transporte (km).

Na Figura 23, nota-se que a distância de transporte tem grande influência na formação do custo de recolhimento do palhicho, uma vez que este encarece significativamente com o seu aumento. Através da simulação de custo realizado pelo presente trabalho, o sistema de colheita integral que alcançou $0,59 \text{ R}\$. \text{Mg}^{-1}$, foi o sistema que obteve menor custo de transporte para distância de 10 km. Os sistemas de briquetagem e peletização apresentaram

custos iguais de $1,97 \text{ R\$}\cdot\text{Mg}^{-1}$. Para os sistemas de fardo cilíndrico e de fardo algodoeiro o custo transporte foi de $2,91 \text{ R\$}\cdot\text{Mg}^{-1}$ e $2,95 \text{ R\$}\cdot\text{Mg}^{-1}$, respectivamente. E, finalmente, para o picado a granel o custo foi $4,77 \text{ R\$}\cdot\text{Mg}^{-1}$. Neste último sistema, caso seja considerada uma distância de transporte de 17 km, o custo chega a $7,3 \text{ R\$}\cdot\text{Mg}^{-1}$ ficando bem próximo do relatado pela Usina Costa Pinto (Grupo COSAN) citado por Franco (2003) que é de $8,90 \text{ R\$}\cdot\text{Mg}^{-1}$, quando o palhiço era transportado à 17 km.

Para longas distâncias, a diferença nos custos acentua-se por causa da diferença do grau de adensamento atingido pelo palhiço. Sistemas que atingem maior adensamento, como nos sistemas de briquetagem e peletização têm custo de transporte menor, principalmente por causa da otimização do caminhão, que acaba transportando maior carga e realizando menos viagens. O custo alcançou $15,02 \text{ R\$}\cdot\text{Mg}^{-1}$ para ambos os sistemas à distância de 100 km.

O custo do transporte à longa distância é mais oneroso no sistema picado a granel, $36,95 \text{ R\$}\cdot\text{Mg}^{-1}$, em vista da baixa massa específica do material transportado, que não atinge a carga limite, necessitando maior número de viagens e maior quantidade de caminhões e transbordos. Para o sistema fardo algodoeiro o custo de transporte à 100 km alcançou $25,16 \text{ R\$}\cdot\text{Mg}^{-1}$. Para o fardo cilíndrico, foi de $21,13 \text{ R\$}\cdot\text{Mg}^{-1}$. O sistema de colheita integral apresentou custo de transporte de $4,51 \text{ R\$}\cdot\text{Mg}^{-1}$.

O custo de transporte do sistema de colheita integral refere-se ao custo de transporte apenas do palhiço. Uma vez que, aproximadamente, 20% da carga transportada é palhiço, segundo Nery, (2000) e Leon, (2000). Por isso, para o sistema de colheita integral, optou-se no presente trabalho em ratear o custo entre a cana e o palhiço em relação à proporção da carga transportada relacionada a cada um.

O tipo de sistema a ser usado no recolhimento pode ser escolhido em função da distância do local onde seria recolhido o palhiço. Pois, é possível usar diferentes sistemas, variando-os de acordo com a distância a ser transportado e para qual finalidade terá o palhiço.

Caso o palhiço tivesse a finalidade de ser utilizado na geração de energia, mediante sua queima em caldeiras, e as áreas de produção fossem próximas à usina, neste caso, uma boa opção seria a utilização de sistemas de recolhimento com menor investimento, tais como o picado a granel ou colheita integral. Contudo se o palhiço, a ser recolhido, fosse produzido longe da usina e sua finalidade fosse a venda para terceiros, como cama de frango ou cobertura morta, o uso de sistemas de enfardamento seria mais adequado.

4.4. Consumo e custo do combustível

Atualmente, como o objetivo principal do recolhimento do palhço é o aproveitamento de energia, deve-se avaliar a demanda de combustível fóssil como porcentagem da energia renovável recuperada, isto é, fazer um balanço energético.

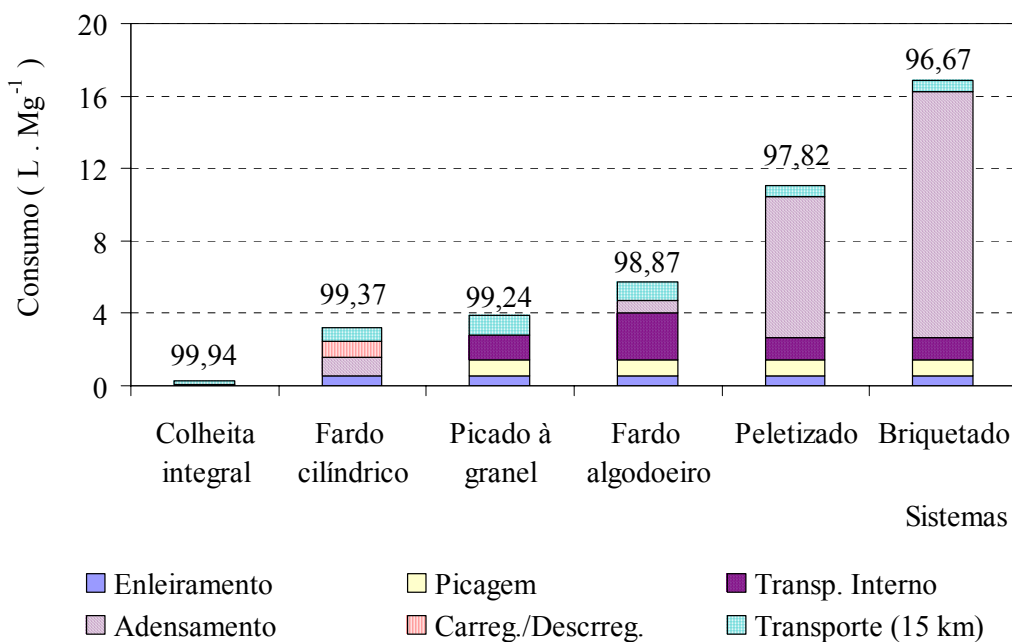


Figura 24. Estimativa da demanda por combustível fóssil ($L \cdot Mg^{-1}$) exigida por tipo operação de cada sistema.

Observa-se na Figura 24 que o sistema de colheita integral tem menor demanda por combustível, apresentando consumo de $0,3 L \cdot Mg^{-1}$ de palhço recolhido, seguido pelos sistemas fardo cilíndrico com $3,2 L \cdot Mg^{-1}$, picado a granel com $3,9 L \cdot Mg^{-1}$ e de fardo algodoeiro consumindo $5,7 L \cdot Mg^{-1}$. Já em um segundo nível, o sistema de briquetagem mostrou maior demanda, consumindo $16,9 L \cdot Mg^{-1}$ de combustível seguido pela peletização, $11,0 L \cdot Mg^{-1}$. O sistema picado a granel tem maior consumo quando comparado com o consumo determinado por Franco (2003), de $3,35 L \cdot Mg^{-1}$, neste caso observa-se que o trabalho desta autora não teve como objeto de estudo o consumo de combustível do caminhão, o que explica o maior consumo de combustível encontrado na presente análise. No sistema fardo cilíndrico, por sua vez, o consumo de combustível estimado pela atual análise foi bastante superior ao encontrado por Bizuti (2003) de $0,82 L \cdot Mg^{-1}$ para enleiramento simples, o qual

também não considerou o consumo do caminhão, assim como, da carregadora e descarregadora, consumos estes considerados no presente estudo. Molina et. al (1995) determinaram um consumo de $3,87 \text{ L}\cdot\text{Mg}^{-1}$, neste caso, como no anterior, apesar de também não ter sido considerado o consumo do transporte assim como do carregamento e descarregamento, mesmo assim esse consumo foi maior que o calculado pelo atual trabalho. Isso pode ser explicado, pois foi utilizado trator de grande potência, como citado pelos próprios autores.

No sistema picado a granel, a operação de transporte de estrada e de transporte interno são as responsáveis pelo maior consumo de combustível, cerca de 30% e 40% do consumo total respectivamente, devido ao fato de ser um sistema de baixo adensamento e por isso necessitando de maior número de viagens dos caminhões e transbordos.

Nos sistemas de peletização e briquetagem a operação de adensamento é responsável pelo maior consumo (70% e 80% do total, respectivamente), porque o adensamento é realizado por máquinas de baixo desempenho, menos de $4 \text{ Mg}\cdot\text{h}^{-1}$, acionadas no campo pela tomada de força do trator. Portanto, a maior demanda por combustível acontece pelo fato das máquinas serem de baixa eficiência.

No sistema fardo cilíndrico as operações de adensamento (por volta de 30%) e de carregamento e descarregamento dos fardos do caminhão (aproximadamente 30 %), são as responsáveis por grande parte do consumo.

As operações de transporte e picagem do sistema de colheita integral foram as que tiveram maiores demandas por combustível, por volta de 50% e 40% do total de combustível consumido.

4.5. Balanço energético

Considerando, o poder calorífico do diesel como sendo $10.700 \text{ kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$ e sua massa específica a 20°C , como $830 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (SOARES, 2000) assim como o poder calorífico do palhico como de $4.500 \text{ kcal}\cdot\text{kg}$ (RIPOLI, 1991), determinou-se o balanço energético do recolhimento do palhico pelos diversos sistemas. A colheita integral foi o sistema que proporcionou melhor eficiência energética, visto que seu balanço energético foi de 99,94 %, mostrando que gastou para seu recolhimento, na forma de combustível fóssil, 0,06 % do total da energia contida no palhico.

Os sistemas fardo cilíndrico e picado a granel apresentaram balanço energético de 99,37 % e 99,24 %, respectivamente. Mostrando que, para recolherem o palhicho, o consumo de energia, como combustível fóssil, pelas máquinas foi aproximadamente 0,7 % da energia contida no palhicho recolhido, para ambos. O sistema de fardo algodoeiro teve eficiência energética de 98,87 %. No caso do sistema fardo cilíndrico o balanço energético encontrado por Bizuti (2003) em seu trabalho de 99,93 %, quando se utilizou a enleiradora com uma passada, foi maior que o encontrado na presente análise. Isso pode ser explicado pelo fato de que naquele trabalho, não se analisou o transporte dos fardos, o que resulta em menor consumo de combustível pelo sistema, uma vez que não se considerou o consumo dos caminhões. O balanço energético não foi calculado por Molina et. al (1995), porém com os dados apresentados é possível calculá-lo como sendo 98,84 %, de média dos dois tratamentos. Neste caso, o balanço energético foi menor que o encontrado nesta análise, mesmo também não se analisando o transporte, contudo como os próprios autores citaram o trator utilizado era superestimado à enfardadora, resultando em um maior consumo.

Os sistemas de peletização e briquetagem são os de menores eficiência energética 97,82% e 96,67%, respectivamente, consumindo-se, na forma de combustível fóssil, por volta de 2 a 3 % da energia contida no palhicho, para recuperá-lo.

4.6. Relação entre princípios de compactação e investimentos

A Tabela 6 resume dois indicadores para cada máquina das operações envolvidas nos sistemas de recolhimento de palhicho em estudo. O primeiro indicador é a capacidade diária, já descrita anteriormente. O segundo indicador é demanda de investimento em máquinas necessárias para se processar o palhicho. O investimento é apresentado como a relação entre o valor de aquisição e a capacidade diária. A Tabela 6 mostra a elevada capacidade diária da enleiradora, em torno de $400 \text{ Mg} \cdot \text{dia}^{-1}$, a qual, resulta em baixa demanda de investimento destas máquinas. Contudo, o enleiramento apresenta um efeito negativo na qualidade da palhicho em função da intensa incorporação de terra que provoca durante o enleiramento. Segundo Bizuti (2003) a porção de terra encontrada no fardo foi de 10,6 %, quando a enleiradora é passada apenas uma vez, e 8,1 % quando a enleiradora é passada duas vezes. Molina et. al (1995) obteve 3,2 % de terra no fardo. Moraes & Hassuani (1994) encontraram

aproximadamente 6 % de terra, também no fardo. Franco (2003), por sua vez, relatou 8,4 % de terra no palhiço recolhido pela recolhadora de forragens.

Tabela 6. Simulação dos indicadores de Capacidade diária e Demanda de Investimento para as máquinas das operações envolvidas no recolhimento da palhiço.

Máquina	Capacidade diária (Mg·dia ⁻¹)	Preço da máquina (R\$)	Investimento (R\$·Mg ⁻¹ ·dia ⁻¹)
Enleiradora	389	16.000,00	41,13
Picadora de fardos	486	20.000,00	41,15
Carregadora	350	45.000,00	128,57
Enfardadora	259	43.000,00	166,02
Transbordo ¹	417	136.000,00	326,14
Prensa de algodão	200	72.600,00	363,00
Recolhedora de forragens	306	150.000,00	490,20
Bass boy	61	50.800,00	832,79
Transmódulo	111	123.200,00	1.112,61
Transbordo ²	110	136.000,00	1.236,34
Peletizadora	57	112.500,00	1.973,68
Estação de limpeza	1.920	6.000.000,00	3.125,00
Briquetadora	31	250.000,00	8.064,52

¹ Para o sistema colheita integral. ² Para os sistemas picado a granel, briquetagem e peletização.

Por meio da simulação, comparando-se os princípios de adensamento, observa-se na Tabela 6, que a demanda de investimento pelas máquinas de alta pressão, peletizadoras e briquetadoras, foi respectivamente cerca de 10 e 50 vezes superior que no caso da enfardadora, que é uma máquina de adensamento de baixa pressão. Comparadas com a prensa de algodão, a qual também é uma máquina de baixa pressão, estas máquinas ainda tiveram maior demanda por investimento, cerca de 5 e 20 vezes maior. Este comportamento surge, em boa medida, pela diferença de capacidade operacional diária dessas prensas. No caso da peletizadora e da briquetadora, que são prensas de alta pressão, atingindo massa específicas entre 500 a 1.000 kg·m⁻³, respectivamente (Eriksson & Prior, 1990). A capacidade diária de ambas não ultrapassou 100 Mg·dia⁻¹, de acordo com a simulação realizada no presente trabalho. Por outro

lado, a capacidade estimada das prensas de baixa pressão foi aproximadamente $200 \text{ Mg}\cdot\text{dia}^{-1}$, sob condições equivalentes de jornada de trabalho e eficiências, como também pode ser visto na Tabela 6.

A simulação mostrou que enfardadora e da recolhadora de forragens apresentaram capacidades diárias similares, entre 200 a $300 \text{ Mg}\cdot\text{dia}^{-1}$, mas custos e condição final do palhico diferentes. A estimativa da massa específica atingida pelo palhico, na carroceria do caminhão quando processado pela recolhadora de forragens, foi da ordem de $80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, próximo ao citado por Ripoli & Ripoli (2004); Franco (2003) e Ideanews (2002). De acordo com Bizuti (2004); Ripoli (2003) e Molina (1995) a enfardadora atinge massa específicas próximas de $200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, valor semelhante ao alcançado pela prensa de algodão (Ideanews, 2002). Por outro lado, a simulação mostrou que o investimento necessário para a recolhadora de forragens foi quase o triplo do necessitado para a enfardadora.

Como pode ser visto na Tabela 6, a capacidade diária da enfardadora simulada por este trabalho foi maior do que a apresentada pela Copersucar (1999), que foi de $216 \text{ Mg}\cdot\text{dia}^{-1}$, para a enfardadora de maior capacidade e $43,2 \text{ Mg}\cdot\text{dia}^{-1}$ para a de menor capacidade. E também superior ao apresentado por Molina et al. (1995) que foi de $26,6 \text{ Mg}\cdot\text{dia}^{-1}$.

4.7. Investimento

A Figura 25 mostra uma estimativa do montante de investimento em máquinas para se processar 1.000 Mg de palhico por dia. É possível observar que o menor investimento foi o do sistema fardo cilíndrico, com cerca de $2,5$ milhões de reais.

Para o sistema de colheita integral o investimento foi de $3,5$ milhões de reais. A maior demanda está relacionada com a estação de limpeza, que apesar de ter grande capacidade (aproximadamente $2.000 \text{ Mg}\cdot\text{dia}^{-1}$) tem alto custo de construção da planta, próximo de 6 milhões de reais. Todavia, o valor total do investimento neste sistema, de modo geral, está entre os mais baixos, pois não é preciso adquirir novos equipamentos, tais como enfardadora, recolhadora de forragens, etc., uma vez que aproveita-se o maquinário já utilizado pela cana.

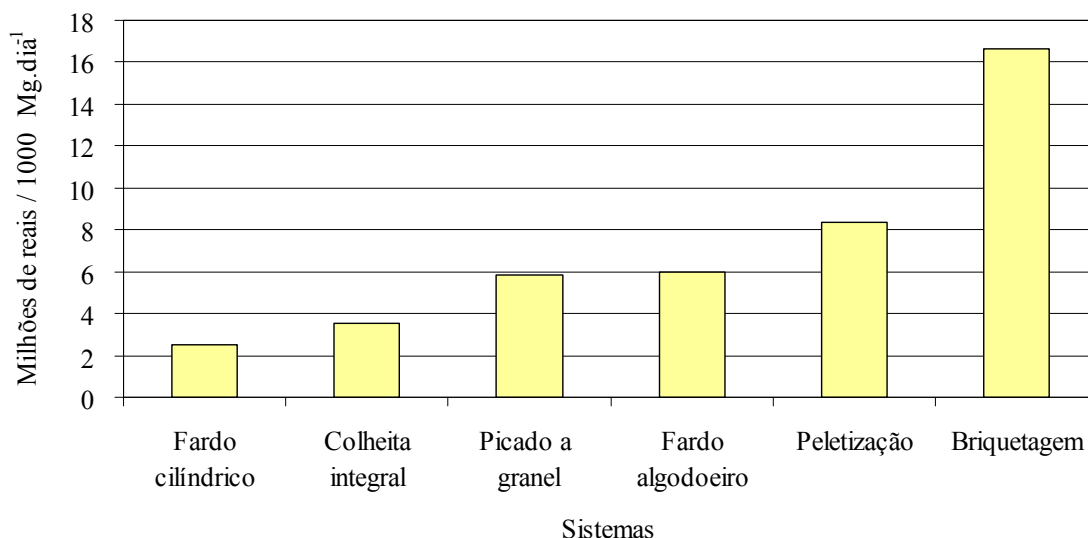


Figura 25. Estimativa da demanda de investimento para as operações envolvidas no recolhimento do palhço (milhões de reais/1.000 Mg.dia⁻¹).

Nos sistemas picado a granel e fardo algodoeiro o investimento para se processar 1.000 Mg de palhço por dia, chegou próximo de 6 milhões de reais. No caso do picado a granel, o alto investimento ficou por conta da necessidade de se adquirir maior quantidade de máquinas de transporte (caminhões e transbordos). Para o sistema fardo algodoeiro o grande investimento está relacionado à aquisição de prensa de algodão e o transmódulo, que é um caminhão basculante com uma esteira alimentadora tipo roll-on/roll-off.

Já os sistemas de peletização e briquetagem foram os que apresentaram maiores investimentos, aproximadamente 8 milhões de reais e 16 milhões de reais, respectivamente. Isso é decorrente do fato das máquinas peletizadora e briquetadora serem máquinas de baixa capacidade operacional, em torno de 50 Mg.dia⁻¹, sendo preciso, portanto, maior número de máquinas para se processar quantidades semelhantes de palhço a dos outros sistemas.

4.8. Custo total

O custo total do palhço em três distâncias de recolhimento (15, 50 e 100 km.) pode ser visto na Figura 26, a seguir. Podemos observar que o menor custo, de 12,65 R\$.Mg⁻¹ foi o apresentado pelo sistema de colheita integral. O custo deste sistema foi pouco influenciado pela distância de transporte, visto que ele aumentou pouco mais de 10% para distância de 50

km e quase 30% para distância de 100 km. Cabe ressaltar, que no sistema de colheita integral, a colheita da cana é realizada simultaneamente com o recolhimento do palhicho. O custo final acaba sendo diluído entre a cana e o palhicho. Portanto, para o cálculo do custo de recolhimento por este sistema, considerou-se a porção referente apenas ao palhicho, que representa 20 % da carga transportada (Nery, 2000 e Leon, 2000). A cana contribui com os outros 80 %, desse modo, os custos foram divididos proporcionalmente com o palhicho.

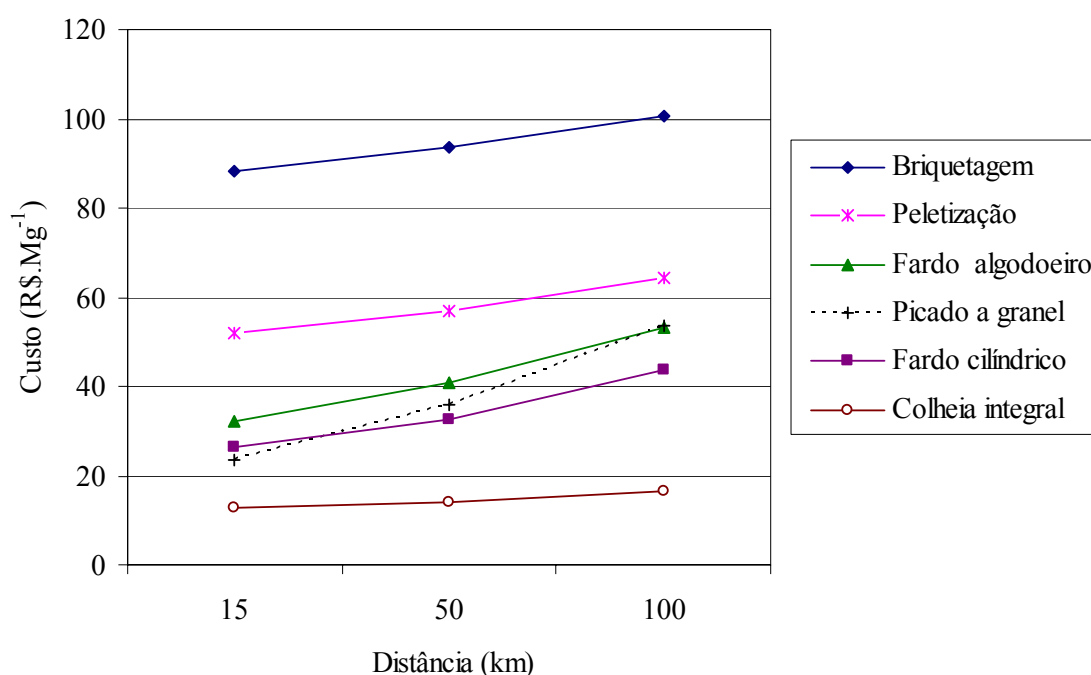


Figura 26. Estimativa do custo total do palhicho recolhido nos vários sistemas, em três distâncias (15, 50 e 100 km).

O sistema picado a granel teve custo de 23,34 R\$.Mg⁻¹. Porém, o custo final desse sistema foi o mais influenciado pela distância de transporte, aumentando cerca de 50%, quando a distância passa de 15 km para 50 km. O seu custo total também é maior que o do sistema fardo cilíndrico, quando a distância é superior a 30 km. E para distâncias acima de cerca de 75 km, o sistema picado a granel apresenta custo de recolhimento maior que o do sistema fardo algodoeiro, inclusive. Esse aumento ocorre, principalmente, porque nesse sistema de recolhimento de palhicho transporta-se material muito volumoso, o que acaba aumentando o custo do transporte, pois é necessário realizar muitas viagens e,

conseqüentemente, apresentando maior consumo de combustível e necessidade de se adquirir maior número de veículos transportadores.

O custo de recolhimento estimado por esta simulação, para o sistema picado a granel a 15 km de distância de transporte, está próximo do fornecido pela Usina Costa Pinto (Grupo COSAN) de 20,67 R\$.Mg⁻¹, segundo Franco (2003), para uma distância de transporte de 17 km. É importante destacar que, no estudo dessa autora, o palhiço era descarregado pela recolhadora de forragens diretamente no caminhão, portanto, eliminado-se uma operação e, conseqüentemente, reduzindo-se o custo final. Na presente análise há uma operação a mais, pois o palhiço é descarregado em transbordos e posteriormente descarregado em caminhões. Nota-se que, nesta análise optou-se por este caminho visando potencializar o transporte, visto que aqui se utiliza caminhão do tipo Romeu e Julieta, de maior carga, e evita-se o trânsito de máquinas pesadas causadoras de compactação do solo.

Por sua vez, o custo de recolhimento do palhiço encontrado na presente simulação por meio do sistema de fardo cilíndrico, de 26,47 R\$.Mg⁻¹, não concorda com o citado no estudo realizado pelo Office of Energy Bureau of Science and Tachnology & Usaid/Thailand (1991) de cerca 70 R\$.Mg⁻¹. Contudo, nesse caso a colheita da cana foi manual sem queima, fato que aumenta o custo final. Na presente análise os custo também foram menor que os custos encontrados por Molina et al. (1995), próximo de 50,00 R\$.Mg⁻¹ e pela Copersucar (1999) de cerca de 60,00 R\$.Mg⁻¹. Estes trabalhos, todavia, foram conduzidos sem considerar as interferências que alguns parâmetros gerenciais podem ter sobre os custos. No atual trabalho e para todos os sistemas, foram consideradas máximas eficiências de um sistema já consolidado e trabalhando com alto desempenho.

O custo de recolhimento do palhiço pelo sistema fardo algodoeiro foi de 32,22 R\$.Mg⁻¹. Este sistema também apresentou considerável elevação do custo para distâncias maiores, chegando a aproximadamente 30% de acréscimo a 50 km de distância e pouco mais de 60% para distância de 100 km. O custo de recolhimento pelo sistema fardo algodoeiro foi maior que o apresentado pela Ideanews (2002) de 17,00 R\$.Mg⁻¹, todavia, esse teste demonstrativo também foi conduzido sem considerar as eficiências que têm grande influência nos custos finais.

Em um segundo nível, encontram-se os sistemas de adensamento por alta pressão apresentando maiores custos que os demais sistemas. Para distâncias menores, o palhiço

recolhido pelo sistema de peletização teve custo de 51,99 R\$.Mg⁻¹ e pelo sistema de briquetagem 88,34 R\$.Mg⁻¹. Para uma distância de transporte de 50 km, o custo teve ligeiro aumento de cerca de 6% para o sistema de briquetagem, e de 10% para o sistema de peletização. Por outro lado, quando a distância foi de 100 km, o custo aumentou aproximadamente 15% e 25%, respectivamente. O custo de transporte apresentando por ambos sistemas é menor que o dos outros, contudo, o custo total de recolhimento do palhico por estes dois sistemas é maior pelo fato da baixa eficiência das máquinas adensadoras, o que resulta em maior consumo de combustível e maior necessidade de investimento.

4.9. Análise de sensibilidade

a) Fardo cilíndrico

Tabela 7. Variação no custo final de recolhimento do palhico pelo sistema de fardo cilíndrico, quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor.

Parâmetros	Abreviatura	Variação (% * 1000)
Corda de amarração do fardo	LAF	368,46
Valor de aquisição das máquinas	VA	245,84
Preço de combustível	COMB	223,55
Distância de Transporte	DIST	114,30
Salário da mão-de-obra	SAL	109,36
Tempo perdido	TPERD	105,16
Tempo de manutenção	TMANUT	90,54
Juros	JUROS	57,60
Encargos sociais	ENSOC	45,03
Preço da energia elétrica	ELETR	20,60
Preço dos lubrificantes	LUB	0,00
Valor residual do equipamento	VR	-10,67
Carga do caminhão	CARGC	-69,10
Dias úteis de safra	DUT	-96,71
Vida útil do equipamento	VU	-186,85
Massa específica final do palhico	MEf	-478,33
Eficiência geral	EFG	-532,70
Capacidade teórica	CPOT	-551,11
Jornada de trabalho	JT	-794,06

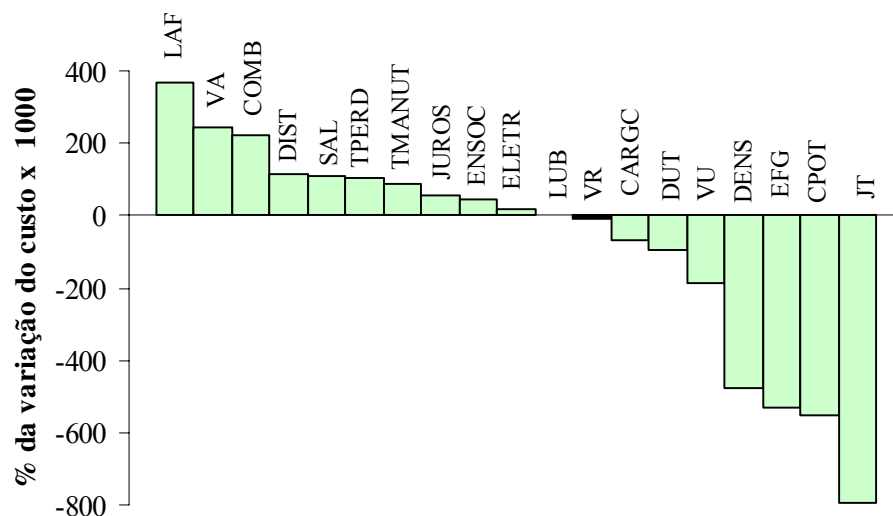


Figura 27. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema de fardo cilíndrico, quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor.

Como pode ser visto na Tabela 7 e na Figura 27, para o sistema de fardo cilíndrico, o custo de recolhimento do palhiço foi mais sensível positivamente ao parâmetro corda de amarração do fardo (LAF), necessária para evitar que o relaxamento do material desagregue o fardo logo após sua saída da câmara de compressão. Quando seu valor foi aumentado em 1 %, o custo final de recolhimento aumentou cerca de 0,3 %. Isso ocorre principalmente pela quantidade de corda utilizada (cerca de 250 g por fardo) e pelo seu alto valor unitário (9,00 R\$.kg⁻¹), o que resulta em um custo aproximado de 10,00 R\$.Mg⁻¹ de palhiço enfardado, representando por volta de 60 % do custo da enfardadora e quase 40 % do custo total do enfardamento. O custo de amarração concorda com o Seminário Sobre Bagaço de Cana (1983) no qual é relatado um custo de amarração dos fardos de aproximadamente 50 % do custo total de enfardamento. Também está bastante próximo ao citado pela análise realizada pelo Office of Energy Bureau of Science and Tachnology & Usaid/Thailand (1991) que foi de aproximadamente 8,00 R\$.Mg⁻¹.

Por outro lado, aumentando-se a Jornada de Trabalho em 1 %, há uma redução no custo de quase 0,8 %, sendo este o parâmetro de maior sensibilidade para a redução do custo final. A capacidade teórica (CPOT) e a eficiência geral (EFG) também tiveram grande influência na diminuição do custo de recolhimento, com redução de cerca de 0,55 %, para

ambos, quando seus valores foram, individualmente, aumentados em 1 %. Em seguida, quando se aumentou o valor em 1% da massa específica final do palhiço (MEf), reduziu-se seu custo final em pouco menos 0,5%. Isso mostra da importância de se utilizar, neste sistema, máquinas de alta capacidade de trabalho e que realiza um grande adensamento dos fardos, pois resultaria em um menor custo de recolhimento do palhiço. Outro fator notável seria o bom gerenciamento da operação, tendo em vista que a eficiência geral também tem grande influencia na redução dos custos, principalmente com relação às medidas gerenciais para a diminuição dos tempos perdidos (TPERD) e de manutenção (TMANUT). Nota-se que a energia elétrica é a necessária para acionar o picador de fardo.

b) Picado a granel

Tabela 8. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema picado a granel quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor.

Parâmetros	Abreviatura	Variação (% * 1000)
Valor de aquisição das máquinas	VA	521,07
Tempo auxiliar do transbordo	TAUXT	421,45
Preço de combustível	COMB	305,49
Tempo perdido	TPERD	299,34
Distância de Transporte	DIST	229,12
Tempo de manutenção	TMANUT	177,67
Salário da mão-de-obra	SAL	173,44
Juros	JUROS	136,64
Encargos sociais	ENSOC	65,02
Preço dos lubrificantes	LUB	0,00
Valor residual do equipamento	VR	-33,08
Carga do transbordo	CARGT	-152,39
Carga do caminhão	CARGC	-195,74
Dias úteis de safra	DUT	-236,95
Vida útil do equipamento	VU	-362,34
Capacidade teórica	CPOT	-1.126,55
Eficiência geral	EFG	-1.131,60
Jornada de trabalho	JT	-1.788,23

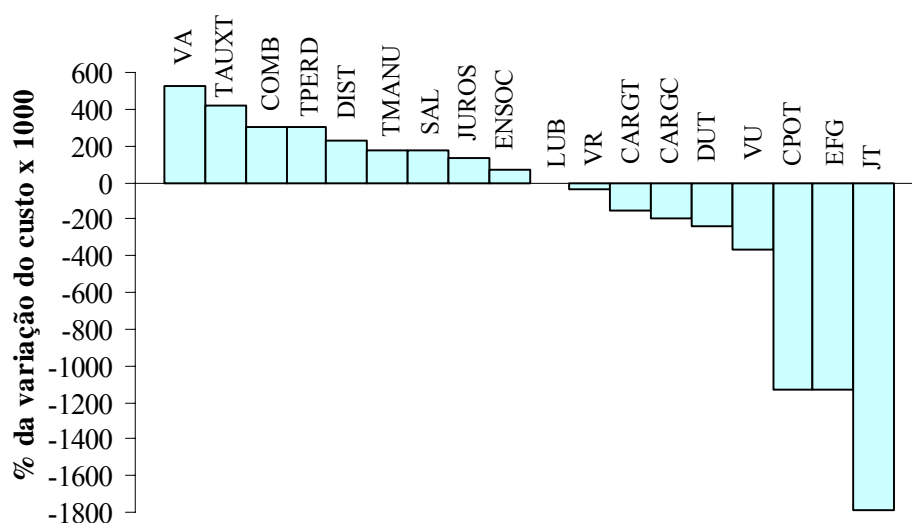


Figura 28. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema picado a granel, quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor.

Para o sistema picado a granel, os parâmetros cujo aumento mais oneraram o custo de recolhimento do palhiço foram o valor de aquisição das máquinas (VA) com cerca de 0,50 % e tempo auxiliar do transbordo (TAUXT) com cerca de 0,4 % de aumento no custo final de recolhimento (Tabela 8 e Figura 28). O tempo auxiliar do transbordo refere-se aos tempos necessários para encher as duas carretas do transbordo, levar e despejar o material recolhido no caminhão. Neste sistema, observa-se que a considerável sensibilidade apresentada pelo valor de aquisição das máquinas é explicada pela necessidade de se adquirir maior número de transbordos e caminhões, visto que a carga efetiva é baixa. Ressalta-se, também, que o preço do combustível (COMB) influencia positivamente no custo final do palhiço, cerca de 0,3%, visto que se trata de palhiço não adensado e, conseqüentemente, a carga transportada tem grande volume, obrigando os transbordo e os caminhões a realizarem maior número de viagens, logo, apresentando maior consumo de combustível.

Por outro lado, o parâmetro que mais reduziu o custo de recolhimento foi a jornada de trabalho (JT), pois quando foi aumentada em 1 % do seu valor, o custo final diminuiu pouco menos de 2 %. Em seguida, a eficiência geral (EFG) e capacidade teórica (CPOT), reduziu o

custo em cerca de 1,0 %, quando cada uma foi acrescida em 1%. Mais uma vez nota-se a importância do bom gerenciamento na redução dos custos de recolhimento do palhico.

c) Colheita integral

Tabela 9. Variação no custo final de recolhimento do palhico pelo sistema de colheita integral quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor.

Parâmetros	Abreviatura	Variação (% * 1000)
Valor de aquisição das máquinas	VA	678,74
Preço da energia elétrica	ELETR	257,99
Tempo perdido	TPERD	217,33
Juros	JUROS	143,90
Tempo de manutenção	TMANUT	128,30
Tempo auxiliar do transbordo	TAUXT	57,90
Distância de Transporte	DIST	51,29
Preço de combustível	COMB	41,46
Salário da mão-de-obra	SAL	21,28
Encargos sociais	ENSOC	8,76
Preço dos lubrificantes	LUB	0,00
Carga do caminhão	CARGC	-32,86
Carga do transbordo	CARGT	-47,10
Valor residual do equipamento	VR	-49,50
Dias úteis de safra	DUT	-166,64
Vida útil do equipamento	VU	-512,23
Capacidade teórica	CPOT	-695,26
Eficiência geral	EFG	-815,37
Jornadas de trabalho	JT	-1.209,41

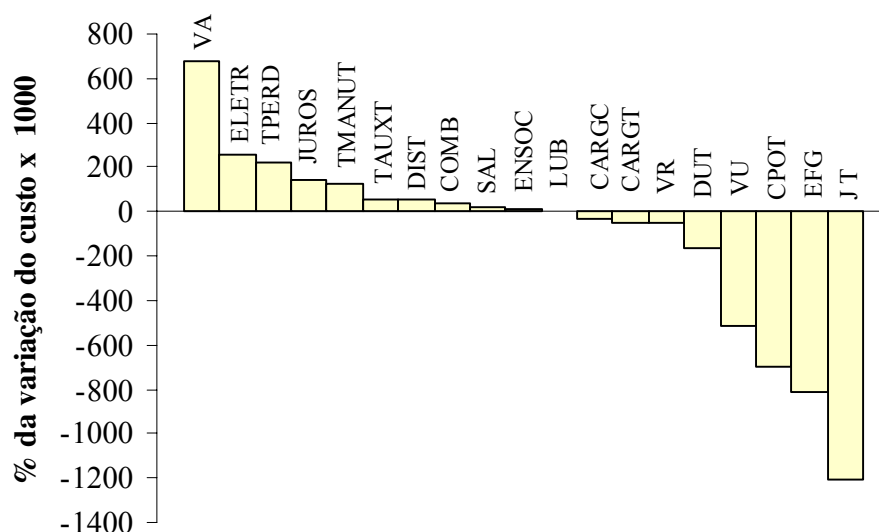


Figura 29. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema de colheita integral, quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor.

Como pode ser visto na Tabela 9 e na Figura 29, o valor de aquisição das máquinas (VA), por sua vez, foi o parâmetro responsável pelo maior aumento do custo final de recolhimento do palhiço, aumentando-se em 1% seu valor, o custo final aumentou cerca de 0,7%. Mesmo com o aproveitamento da frota da colheita da cana, este parâmetro foi influenciado, principalmente, pela elevada demanda de investimento pela construção da estação de limpeza, 6 milhões de reais, aproximadamente. Em seguida o preço da energia elétrica (ELETR) e o tempo perdido (TPERD) foram os parâmetros que mais contribuíram para elevação do custo final do palhiço, por volta de 0,25 % e 0,2 %, respectivamente. Neste caso a energia elétrica é a necessária para acionar a estação de limpeza.

A jornada de trabalho (JT), quando seu valor foi aumentado em 1 %, também foi o parâmetro de maior sensibilidade, alcançando pouco mais 1% de redução do custo final. A eficiência geral (EFG) e a capacidade teórica (CPOT), reduziram o custo do recolhimento em 0,8 % e 0,7 %, quando aumentadas em 1% dos seus valores, individualmente.

d) Fardo algodoeiro

Tabela 10. Variação no custo final de recolhimento do palhico pelo sistema de fardo algodoeiro quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor.

Parâmetros	Abreviatura	Variação (% * 1000)
Valor de aquisição das máquinas	VA	484,65
Tempo auxiliar do bassboy	TAUXB	483,81
Preço de combustível	COMB	327,19
Tempo perdido	TPERD	314,60
Salário da mão-de-obra	SAL	188,15
Tempo de manutenção	TMANUT	184,82
Tempo auxiliar da prensa	TAUXP	170,94
Distância de Transporte	DIST	114,71
Juros	JUROS	91,58
Encargos sociais	ENSOC	77,48
Preço dos lubrificantes	LUB	0,00
Valor residual do equipamento	VR	-19,12
Carga do caminhão	CARGC	-69,80
Dias úteis de safra	DUT	-98,10
Massa específica final do palhico	MEf	-238,32
Vida útil do equipamento	VU	-251,78
Carga do transbordo	CARGT	-306,00
Capacidade teórica	CPOT	-1.078,08
Eficiência geral	EFG	-1.084,50
Jornadas de trabalho	JT	-1.678,55

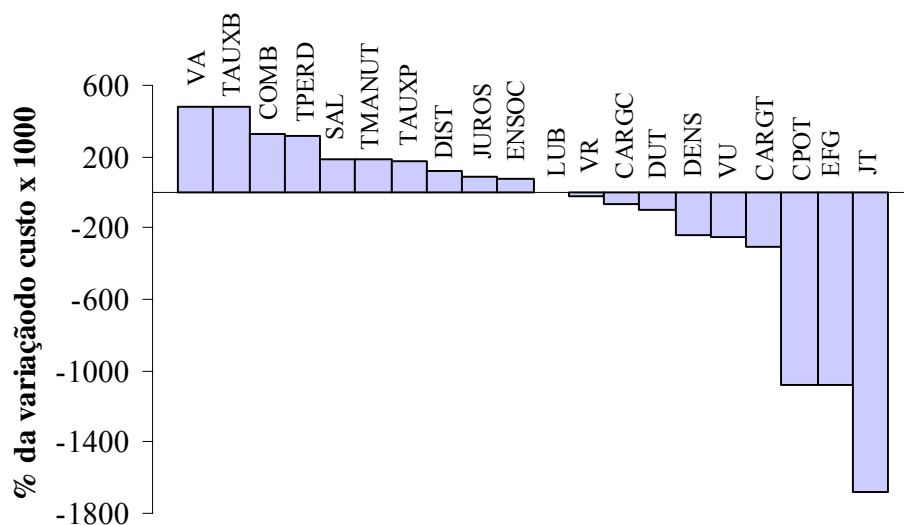


Figura 30. Variação no custo final de recolhimento do palhicho pelo sistema de fardo algodoeiro, quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor.

No sistema fardo algodoeiro foram os parâmetros valor de aquisição das máquinas (VA) e o tempo auxiliar do bassboy (TAUXB) aqueles que mais influenciaram positivamente o custo de recolhimento do palhicho, aumentando em cerca de 0,5% o custo final quando seus valores foram aumentados, individualmente, em 1%. Neste caso o que pesa mais é o valor de aquisição da prensa de algodão, que apesar dela não ter um valor tão alto comparado com outras máquinas, é uma máquina relativamente de baixa capacidade, havendo a necessidade de se adquirir grande número de prensas. Por outro lado, o tempo auxiliar do bassboy tem grande influência porque o transporte do palhicho do local de recolhimento até a prensa é feito por apenas por uma carreta. Isso é necessário porque a alimentação da prensa tem de ser feita cuidadosa e uniformemente pelo bassboy, que é dotado de uma esteira dosadora, o que acarreta em uma maior demora para alimentar a prensa.

Aqui a maior redução no custo final, por volta de 1,7 %, também aconteceu quando a jornada de trabalho (JT) foi aumentada em 1 %, seguida pela capacidade teórica (CPOT) e eficiência geral (EFG) com cerca de 1 % de redução no custo de recolhimento do palhicho.

e) Briquetagem e Peletização

Tabela 11. Variação no custo final de recolhimento do palhico pelo sistema de briquetagem quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor.

Parâmetros	Abreviatura	Variação (% * 1000)
Valor de aquisição das máquinas	VA	518,71
Preço de combustível	COMB	351,04
Tempo perdido	TPERD	242,36
Salário da mão-de-obra	SAL	130,25
Tempo de manutenção	TMANUT	127,95
Tempo auxiliar do transbordo	TAUXT	108,66
Juros	JUROS	91,93
Encargos sociais	ENSOC	53,63
Distância de Transporte	DIST	24,45
Massa específica final do palhico	MEf	0,00
Massa específica aparente	MEAPAR	0,00
Preço dos lubrificantes	LUB	0,00
Carga do caminhão	CARGC	-17,79
Valor residual do equipamento	VR	-39,20
Carga do transbordo	CARGT	-39,29
Dias úteis de safra	DUT	-129,09
Vida útil do equipamento	VU	-412,24
Eficiência geral	EFG	-1.041,77
Capacidade teórica	CPOT	-1.185,41
Jornadas de trabalho	JT	-1.518,97

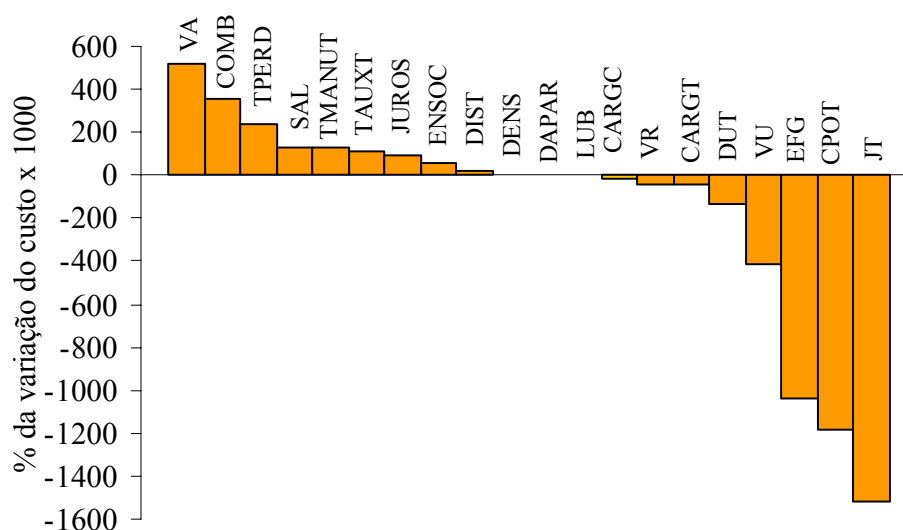


Figura 31. Variação no custo final de recolhimento do palhico pelo sistema de briquetagem, quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor.

Tabela 12. Variação no custo final de recolhimento do palhico pelo sistema de peletização quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor.

Parâmetros	Abreviatura	Variação (% * 1000)
Valor de aquisição das máquinas	VA	461,46
Preço de combustível	COMB	390,88
Tempo perdido	TPERD	256,09
Tempo auxiliar do transbordo	TAUXT	184,65
Salário da mão-de-obra	SAL	147,84
Tempo de manutenção	TMANUT	139,64
Juros	JUROS	82,47
Encargos sociais	ENSOC	60,80
Distância de Transporte	DIST	41,55
Massa específica final do palhico	MEf	0,00
Massa específica aparente	MEAPAR	0,00
Preço dos lubrificantes	LUB	0,00
Valor residual do equipamento	VR	-22,39
Carga do caminhão	CARGC	-30,23
Carga do transbordo	CARGT	-66,77
Dias úteis de safra	DUT	-120,24
Vida útil do equipamento	VU	-367,61
Capacidade teórica	CPOT	-1.075,13
Eficiência geral	EFG	-1.077,90
Jornadas de trabalho	JT	-1.563,23

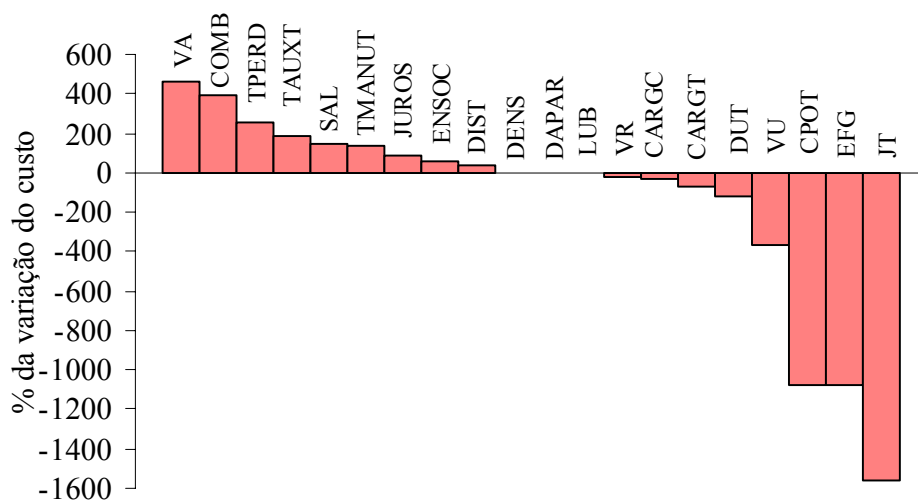


Figura 32. Variação no custo final de recolhimento do palhiço pelo sistema de peletização, quando cada parâmetro é acrescido individualmente em 1 % do seu valor.

Tanto para o sistema de briquetagem quanto para o peletização, o valor de aquisição das máquinas (VA) e o preço do combustível (COMB) foram os parâmetros que mais tiveram influência no aumento do custo final de recolhimento do palhiço. Estes parâmetros influenciaram positivamente em cerca de 0,5% e 0,4%, respectivamente, o custo final quando se aumentou 1% dos seus valores, individualmente. Isso ocorre, principalmente, pelo fato de as máquinas serem de alto valor e terem elevada demanda por combustível para seu acionamento, visto que são máquinas de baixa capacidade.

Na briquetagem e na peletização, a jornada de trabalho (JT), igualmente em todos os sistemas, foi o parâmetro de maior sensibilidade na redução do custo, diminuiu em 1,5% o custo final após ser aumentada em 1% em seu valor. Em seguida eficiência geral (EFG) e a capacidade teórica (CPOT) diminuíram por volta de 1 % o custo de recolhimento do palhiço, quando seus valores foram, individualmente, aumentados em 1 %.

É interessante destacar que tanto a massa específica final do palhiço quanto a massa específica aparente não tiveram influência no custo de recolhimento para os sistemas de briquetagem e peletização. Isso é explicado pelo fato de que mesmo aumentando tanto o grau de adensamento do palhiço quanto a massa específica aparente da carga, o peso total bruto

permitido pelo CONTRAN seria atingido, e não se poderia levar mais carga mesmo sobrando espaço na carroceria do caminhão.

Por outro lado, a jornada de trabalho, em todos os sistemas, foi o parâmetro que mais contribuiu para a redução dos custos de recolhimento, demonstrando a importância de se trabalhar com máxima jornada diária.

Outro ponto importante para se destacar é o valor do salário da mão-de-obra. Tendo em vista que, também de modo geral em todos sistemas, sua contribuição no aumento dos custos ser relativamente baixa, torna-se interessante remunerar, de modo justo, a mão de obra.

5. Conclusões

- Há a necessidade de se aprimorar as tecnologias de adensamento desenvolvidas para o manuseio de pequenos volumes, visando o manuseio dos grandes volumes de biomassa energética;
- O sistema de colheita integral apresentou menor custo total, seguido pelos sistemas picado a granel, fardo cilíndrico, fardo algodoeiro, Peletizado e Briquetado;
- No sistema de colheita integral os custos fixos e variáveis acabam sendo rateados entre a cana e o palhico com o aproveitamento da frota já utilizada para a cana, a qual encontra-se atualmente otimizada em termos de gerenciamento, tecnologia e manutenção;
- A briquetadora e a peletizadora conseguem o maior grau de compactação entre os sistemas analisados, mas a baixa eficiência da operação de adensamento, juntamente com sua alta demanda de energia, elevam o custo final do recolhimento do palhico;
- O sistema picado a granel, apesar de eliminar os custos associados com as operações de recolhimento e adensamento do palhico, se equipara aos sistemas de fardo cilíndrico e fardo algodoeiro pelo seu maior custo do transporte;
- Numa mesma agroindústria pode ser recomendável a co-existência do sistema de fardo cilíndrico juntamente com o sistema picado a granel sendo que o primeiro seria utilizado em distâncias acima de 30 km, e o segundo nas distâncias menores.
- Os fatores que mais influenciaram o custo de recolhimento de palhico para os sistemas analisados são o valor de aquisição dos equipamentos, a jornada de trabalho, a eficiência global da operação e o consumo de combustível.

REFERÊNCIAS

- ASAE. **ASAE Standards 1994: Standards Engineering Practices Data**, ASAE EP 496.2. Agricultural machinery management. St. Joseph, MI, 1994, p. 335-340.
- BALASTREIRE, L.A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 307 p.
- BANCHI, A.D.; MACHADO M.C. Controle do planejamento das operações motomecanizadas e operadores. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 4, 1988, Piracicaba. **Seminário...** São Paulo: Copersucar, 1988. p.413-429.
- BELLETTI, A. Sweet sorghum: from harvesting to storage. In: FERRERO, G.L; GRASSI, G.; WILLIAMS, H.E. (Ed.). **Biomass Energy: From harvesting to storage**. London: Elsevier, 1987. p.129⁻¹35.
- BIZUTI, S.F.G. **Enleiramento e enfardamento cilíndrico de palhço de cana-de-açúcar: alguns parâmetros e desempenho operacional e eficiência energética**. 2003. 75 p. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- BRAUNBECK, O. A.; MACEDO, I.; CORTEZ, L. Increasing the available biomass from sugarcane for energy conversion. In: INTERNATIONAL WORKSHOP IMPLEMENTATION STRATEGIES FOR BIOMASS UTILIZATION IN EUROPE AND DEVELOPING COUNTRIES. 2001, Suécia, **Resumos...** Suécia: Stadshotellet, 2001 p.19-21.
- CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres. Resolução no. 12, de 06 de setembro de 1998. Diário Oficial, Brasília.
- COPERSUCAR. Projeto BRA/96G31: Geração de energia por biomassa bagaço da cana-de-açúcar e resíduos. **STAB**, Piracicaba, v.17, n.3, p.66-68, jan./fev. 1999.
- COPERSUCAR. Equipamentos para transbordo de cana picada. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 5, 1991, Piracicaba. **Seminário...** Piracicaba: Copersucar, 1991. p. 247-250.
- CORRÊA NETO, V.; TOLMASQUIM, M.MG. Avaliação econômica da co-geração em ciclo combinado com gaseificação de biomassa e gás natural no setor sucroalcooleiro. **Revista Brasileira de Energia**. Rio de Janeiro, v. 8, n.2, p. 35-60. Jun. 2001.
- CORTEZ, L.A.B.; BAJAY, S.V.; BRAUNBECK, O.A. Uso de resíduos agrícolas para fins energéticos: o caso da palha de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Energia**, Rio de Janeiro, v. 7, n.1, p. 65-81, 1999.
- ELETOBRAS. Projeto 4: A oferta de energia elétrica, subprojeto “Resíduos de cana de açúcar”. Rio de Janeiro, 1993.

- ERIKSSON, S.; PRIOR, M. **The briquetting of agricultural wastes for fuel**. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1990.
- FERNANDES, A.C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. Piracicaba: STAB. 2000.193 p.
- FIGUEIREDO FILHO, O.; ARRAES, N. A. M. Corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar: Análise de sensibilidade dos parâmetros que influenciam no custo dos sistemas. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 4, 1988, Piracicaba. **Seminário...** São Paulo: Copersucar, 1988. p.315-341
- FIGUEIREDO FILHO, O.; BANCHI, A. D.; BRAUNBECK, O. A. Transporte de cana-de-açúcar – incidência das principais variáveis na capacidade de transporte da frota. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 2, 1984, Piracicaba. **Seminário...** São Paulo: Copersucar, 1984. p.387-401
- FORUM DE COGERAÇÃO E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, 2001, Piracicaba. **Anais...** São Paulo: INEE, 2001. 49 p.
- FRANCO, F.N. **Alguns parâmetros de desempenho operacional de um sistema de recolhimento de palhico de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) a granel**. 2003. 113 p. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- FURLANI NETO, V.L.; RIPOLI, T.C.C.; VILLA NOVA, N.A. Biomassa de cana-de-açúcar: energia contida no palhico remanescente de colheita mecânica. **STAB**, Piracicaba, v.15, n.4, p.24-27, mar/abr. 1997.
- GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.M.G. (Org.). Present status of biomass use in Brazil. In: INTERNATIONAL SEMINAR USP-PETROBRÁS ON BIOMASS FOR ENERGY PRODUCTION. 2000. São Paulo. **Seminário...** São Paulo: Copersucar, 2000. 49 p.
- GONZÁLEZ, M. & MUÑOZ, G. Experimental Determination of the Optimal Parameters of the Mechanical Densification Process of Fibrous Materials for Animal Feed. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING / CIGR, 15, ASAE Paper Number: 021072
- HIRAI, J.M.; KÖLLER, H.W.; RODRIQUES, L. Comparativo técnico econômico do sistema Rodotrem versus Treminhão. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 6, 1994, Piracicaba. **Seminário...** São Paulo: Copersucar, 1994. p. 309-311.
- HOBSON, P. A. et al. Development of a factory based dry cane separation plant for increased recovery of biomass fuel. In: ISSCT ENGINEERING WORKSHOP, 2002, Berlim. **Abstracts...** Berlim: Technical University Berlin/ Berlin Sugar Institute, 2002.
- HOFFMANN, R. et al. **Administração da empresa agrícola**. 5 ed. São Paulo: Pioneira, 1987. 325 p.
- IDEANEWS. Com maior densidade. **Revista Ideanews**. Ribeirão Preto: Grupo Gráfico São Francisco, ano 3, n.19, p. 28-31, abr., 2002. Mensal.

- JAKEWAY, L. A. Application of cane and forage harvesters for biomass fuel recovery. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CROP HARVESTING AND PROCESSING, 2003, Louisville, Kentucky. **Proceedings...** Louisville: Graeme Quick, 2003. ASAE Publication Number 701P1103e.
- KANAFOSJSK, C. (org.) **Agricultural Machines, Theory and Construction**. Vol. 2. Washington: U.S. Department and the National Science Foundation, 1972. p.231-253
- LÉON, M. J. **Avaliação de desempenho operacional de duas colhedoras em cana (*Saccharum spp.*) crua**. 2000. 112 p. Tese (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- LOPES, M. B. **Simulação de um sistema de carregamento e transporte de cana-de-açúcar**. 1995. 143 p. Tese (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- MACEDO, I.C.; CORTEZ, L.A.B. Sugar-cane industrial processing in Brazil. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S.V.; ROTHMAN, H. (Ed.). **Industrial uses of biomass energy**. London: Taylor-Francis, 2000. p. 140-154.
- MIALHE, L.G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1974. 301 p.
- MOLIN, J. P.; MILAN, M. Trator-implemento: dimensionamento, capacidade operacional e custo. In: GONÇALVES, J. L. M.; STAP, J. L.(Ed.). **Conservação e cultivos de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. p. 409-436.
- MOLINA JR., W.F. RIPOLI, T.C.; GERALDI, R.N.; AMARAL, J.R. Aspectos econômicos e operacionais do enfardamento de resíduo de colheita de cana-de-açúcar para aproveitamento energético. **STAB**, Piracicaba, v.13, n.5, p.28-31, mai./jun. 1995.
- MORAES, E.E.; HASSUANI, S.J. Colheita de cana sem queimar e aproveitamento dos resíduos vegetais. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 6, 1994, Piracicaba. **Seminário...** São Paulo: Copersucar, 1994. p. 305-308.
- MOREIRA, J. R. Etanol from cellulosic materias. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S.V.; ROTHMAN, H. (Ed.). **Industrial uses of biomass energy**. London: Taylor-Francis, 2000. p. 228-229.
- NERY, M. S. **Desempenho operacional e econômico de uma colhedora em cana crua**. 2000. 108 p. Tese (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- NOGUEIRA, L.A.H. **Análise da utilização de energia na produção de álcool de cana de açúcar**. 1987. 180 f. Tese (doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

- NORONHA, J.F. **Projetos agropecuários: administração financeira, orçamentação e avaliação econômica**. Piracicaba: FEALQ, 1981. 275 p.
- NUÑEZ GAGO; J. S. Corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar: comparação de sistemas alternativos. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 3, 1986, Piracicaba. **Seminário...** São Paulo: Copersucar, 1986. p. 489-522.
- OFFICE OF ENERGY BUREAU OF SCIENCE AND TACHNOLOGY; USAID/THAILAND. **Baling sugarcane tops and leaves: The Thai experience**. Virginia, USA: Winrock International Institute for Agricultural Development, 1991. 90 p.
- O Estado de São Paulo. Nova tecnologia da Dedini pode dobrar produção de álcool no País. **O Estado de São Paulo**. São Paulo, 23 de junho de 2003. Caderno Economia, p. 5
- REIS, B.O. et al. Produção de briquetes energéticos a partir de Carços de açaí. In: AGRENER 2002: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Resumos...** Campinas: Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético. 2002. p. 121.
- RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: T.C.C.Ripoli, 2004. 302 p.
- RIPOLI, M.L.C.; TORREZAN, H.F.; RIPOLI, T.C.C.; GAMERO, C.A. 2004. Windrow and prismatic baling of sugar cane vegetal residues: some operational parameters and energetic efficiency. In: ASAE /CSAE Meeting Paper no. 046171.
- RIPOLI, M.L.C.; RIPOLI, T.C.C.; MOLINA, W.F. Effects of two different base cutters in green cane mechanical harvest. In: ASAE INTERNATIONAL ANNUAL MEETING. 2003. Paper Number: 031016.
- RIPOLI, M.L.C. **Mapeamento do palhiço enfardado de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) e do seu potencial energético**. 2002. 91 p. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- RIPOLI, T.C.C. et al. Equivalente energético da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19.,1990, Piracicaba, 1990, p. 249-262.
- RIPOLI, T.C.C.; MOLINA, W.F.; COELHO, J.J.D.; SACCOMANO, J.B.. Estudio sobre enfardamiento de residuos de cosecha de caña verde. **STAB**, Piracicaba, v.11, n.4, p.29-31, mar./abr, 1991.
- RIPOLI, T.C.C. **Utilização do material remanescente da colheita da cana-de-açúcar (*Sachcarum spp.*)** – Equacionamento dos balanços energéticos e econômicos. Piracicaba, 1991. 150p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura“Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S.V.; ROTHMAN, H. (Ed.). **Industrial uses of biomass energy**. London: Taylor-Francis, 2000. 277 p.

- SACH, H.O. Das verdichten von halmgütern in straagpressen. Fortschritt-Ber, VDI-Z., Rihe 14, Düsseldorf, 1965, no. 4 apud KANAFOSJSK, C. (org.) **Agricultural Machines, Theory and Construction**. Vol. 2. Washington: U.S. Department and the National Science Foundation, 1972. p.231-253
- SCHEMBRI, M.G.; HOBSON, P.A.; PADDOCK, R. The development of a prototype factory-based trash separation plant. **Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.**, Vol. 24, 2002.
- SEMINÁRIO SOBRE BAGAÇO DE CANA, 1983, Piracicaba. **Seminário...** Piracicaba: Copersucar, 1983. 32 p.
- SOARES, G.F.W., VIEIRA, L.S.R.; NASCIMENTO, M.V.G. Operação de um grupo gerador diesel utilizando óleo vegetal bruto como combustível. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3, 2000, Campinas. **Proceedings online...** Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?>
- SOTELO, R.C.; CORREA, J.L. Resíduos da colheita. In: INSTITUTO CUBANO DE PESQUISA DOS DERIVADOS DA CANA (ICIDCA). **Manual dos derivados da cana-de-açúcar**: diversificação, matérias-primas, derivados do bagaço, derivados do melaço, outros derivados, resíduos, energia. Brasília: ABIPTI, 1999. p. 63-68.
- UNICA. Início da produção no Centro-Sul. **Boletim Unica**. São Paulo: Unica, ano 6, n.52, p.1, mar./abr. 2003. Bimestral.
- WALTER, A. New technologies for modern biomass energy carriers. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S.V.; ROTHMAN, H. (Ed.). **Industrial uses of biomass energy**. London: Taylor-Francis, 2000. p. 200-253.
- WHITE, L. P.; PLASKETT, L.G. **Biomass as fuel**. Londres: Academic Press, 1981. 213 p.
- WOOD, J.; HALL, D.O. **Bioenergy for development**: technical and environment dimensions. Roma: FAO, 1995. Reimpressão. 300 p.

ANEXOS

Tabela 1. Estimativa das eficiências (%) das operações no sistema de fardo cilíndrico.

Operações	Eficiência (%)				
	Operacional	Utilização	Disponibilidade	Aproveitamento	Geral
Enleiramento, Enfardamento e Picagem	80	86	88	100	60
Transporte e Carreg./Descarreg.	80	81	88	100	57

Tabela 2. Estimativa das eficiências (%) das operações no sistema picado a granel.

Operações	Eficiência (%)				
	Operacional	Utilização	Disponibilidade	Aproveitamento	Geral
Enleiramento	80	86	88	100	60
Recolhedora de forragens e Transporte	80	81	88	100	57
Transporte interno (transbordo)	80	77	92	100	57

Tabela 3. Estimativa das eficiências (%) das operações no sistema briquetagem e peletização.

Operações	Eficiência (%)				
	Operacional	Utilização	Disponibilidade	Aproveitamento	Geral
Enleiramento	80	86	88	100	60
Recolhedora de forragens e Transporte	80	81	88	100	57
Transporte interno (transbordo)	80	77	92	100	57
Briquetagem	85	82	92	100	64

Tabela 4. Estimativa das eficiências (%) das operações no sistema fardo algodoeiro.

Operações	Eficiência (%)				
	Operacional	Utilização	Disponibilidade	Aproveitamento	Geral
Enleiramento	80	86	88	100	60
Recolhedora de forragens e Transporte	80	81	88	100	57
Transporte interno (transbordo) e abastecimento da prensa	80	77	90	100	55
Prensagem	80	71	88	100	50

Tabela 5. Estimativa das eficiências (%) das operações no sistema de colheita integral.

Operações	Eficiência (%)				
	Operacional	Utilização	Disponibilidade	Aproveitamento	Geral
Colheita	80	50	83	100	33
Transporte interno (transbordo)	80	77	92	100	57
Transporte	80	81	88	100	57
Estação de limpeza	80	76	88	100	53

Tabela 6. Estimativa das capacidades das operações no sistema de fardo cilíndrico.

Operações	Capacidades		
	Teórica (Mg·h ⁻¹)	Efetiva (Mg·h ⁻¹)	Diária (Mg·dia ⁻¹)
Enleiramento	27	16,2	389
Enfardamento	18	10,8	259
Carregamento/Descarreg.	27	15	350
Transporte	4,5	2,5	108
Picagem	30	20,3	486

Tabela 7. Estimativa das capacidades das operações no sistema picado a granel.

Operações	Capacidades		
	Teórica (Mg·h ⁻¹)	Efetiva (Mg·h ⁻¹)	Diária (Mg·dia ⁻¹)
Enleiramento	27	16,2	389
Recolhedora de forragens	22,5	12,8	306
Transporte interno (transbordo)	8	5	110
Transporte	4,3	2,3	55

Tabela 8. Estimativa das capacidades das operações no sistema de briquetagem.

Operações	Capacidades		
	Teórica (Mg·h ⁻¹)	Efetiva (Mg·h ⁻¹)	Diária (Mg·dia ⁻¹)
Enleiramento	27	16	389
Recolhedora de forragens	22,5	12,8	306
Transporte interno (transbordo)	8	5	110
Briquetadora	2,0	1,3	31
Transporte	21,7	12,3	296

Tabela 9. Estimativa das capacidades das operações no sistema de peletização.

Operações	Capacidades		
	Teórica (Mg·h ⁻¹)	Efetiva (Mg·h ⁻¹)	Diária (Mg·dia ⁻¹)
Enleiramento	27	16	389
Recolhedora de forragens	22,5	12,8	306
Transporte interno (transbordo)	8	5	110
Peletizadora	3,5	2,2	54
Transporte	21,7	12,3	296

Tabela 10. Estimativa das capacidades das operações no sistema fardo algodoeiro.

Operações	Capacidades		
	Teórica (Mg·h ⁻¹)	Efetiva (Mg·h ⁻¹)	Diária (Mg·dia ⁻¹)
Enleiramento	27	16	389
Recolhedora de forragens	22,5	12,8	306
Transporte interno (transbordo) e abastecimento da prensa	5	3	61
Prensagem	13	8	200
Transporte	8,2	4,6	111

Tabela 11. Estimativa das capacidades das operações no sistema de colheita integral.

Operações	Capacidades		
	Teórica (Mg·h ⁻¹)	Efetiva (Mg·h ⁻¹)	Diária (Mg·dia ⁻¹)
Transporte interno (transbordo)	30,7	17,4	417
Transporte	16,1	9,1	219
Estação de limpeza	150	80	1.920

Tabela 12. Estimativa dos custos e parâmetros das máquinas envolvidas no sistema picado a granel⁴.

Custos	Enleiradora	Trator da enleiradora	Recolhedora de forragens	Trator da recolhedora de forragens	Transbordo	Caminhão
Mão-de-obra (R\$.Mg ⁻¹)	--	0,16	--	0,15	1,93	1,29
Reparos e Manutenção (R\$.Mg ⁻¹)	0,06	0,49	0,38	0,81	2,02	0,66
Uso anual (Mg·ano ⁻¹)	69.401	69.401	54.621	54.621	19.656	13.709
Vida útil (anos)	2,3	2,8	4,7	2,8	4,7	15,6
Fator de Recuperação do Capital (%)	50	44	29	44	29	14
Depreciação e Juros (R\$.Mg ⁻¹)	0,11	0,52	0,71	0,85	3,04	1,44
Taxas, Garagem e Seguro (R\$.Mg ⁻¹)	0,01	0,03	0,05	0,05	0,24	0,20

⁴ Os custos e parâmetros da Enleiradora, Trator da enleiradora, Recolhedora de forragens, Trator da recolhedora de forragens, Transbordo utilizadas na simulação do sistema Picado a granel, são iguais aos do sistema Briquetadora e Peletizadora, uma vez que as operações por elas realizadas são idênticas nos três sistemas.

Tabela 13. Estimativa dos custos e parâmetros das máquinas envolvidas no sistema fardo cilíndrico.

Parâmetros	Enleiradora	Trator da enleiradora	Enfardadora	Tratores da enfardadora	Carreg./ Descarreg.	Caminhão	Picador
Mão-de-obra (R\$.Mg ⁻¹)	--	0,21	--	0,24	0,90	1,23	0,44
Reparos e Manutenção (R\$.Mg ⁻¹)	0,08	0,67	0,41	1,30	0,30	0,88	0,04
Depreciação e Juros (R\$.Mg ⁻¹)	0,14	0,71	1,66	1,61	0,31	2,95	0,06
Taxas, Garagem e Seguro (R\$.Mg ⁻¹)	0,006	0,04	0,03	0,07	0,02	0,47	0,01
Uso anual (Mg.ano ⁻¹)	4.284	4.284	4.284	4.284	5.040	14.414	86.751
Vida útil (anos)	2,3	2,8	2,3	2,8	3,0	26,7	4,7
Fator de Recuperação do Capital (%)	52	44	52	44	42	13	29
Corda de amarração do fardo (R\$.Mg ⁻¹)	--	--	9,75	--	--	--	--
Energia Elétrica (R\$.Mg ⁻¹)	--	--	--	--	--	--	0,55

Tabela 14. Estimativa dos custos e parâmetros das máquinas envolvidas no sistema de briquetagem.

Custos	Briquetadora	Trator da Briquetadora	Caminhão
Mão-de-obra (R\$.Mg ⁻¹)	6,94	1,99	0,35
Reparos e Manutenção (R\$.Mg ⁻¹)	7,35	8,07	0,29
Uso anual (Mg.ano ⁻¹)	5.462	5.462	49.980
Vida útil (anos)	4,7	2,8	23,3
Fator de Recuperação do Capital (%)	29	44	13
Depreciação e Juros (R\$.Mg ⁻¹)	11,79	6,63	0,87
Taxas, Garagem e Seguro (R\$.Mg ⁻¹)	0,92	0,45	0,14

Tabela 15. Estimativa dos custos e parâmetros das máquinas envolvidas no sistema de peletização.

Custos	Peletizadora	Trator da Peletizadora	Caminhão
Mão-de-obra (R\$.Mg ⁻¹)	3,97	1,14	0,35
Reparos e Manutenção (R\$.Mg ⁻¹)	1,89	3,59	0,29
Uso anual (Mg.ano ⁻¹)	9.559	9.559	49.980
Vida útil (anos)	4,7	2,8	23,3
Fator de Recuperação do Capital (%)	29	44	13
Depreciação e Juros (R\$.Mg ⁻¹)	3,03	4,43	0,87
Taxas, Garagem e Seguro (R\$.Mg ⁻¹)	0,24	0,20	0,14

Tabela 16. Estimativa dos custos e parâmetros das máquinas envolvidas no sistema fardo algodoeiro.

Custos	Bass Boy	Prensa de algodão	Trator da Prensa	Transmódulo
Mão-de-obra (R\$.Mg ⁻¹)	3,50	1,06	0,30	0,83
Reparos e Manutenção (R\$.Mg ⁻¹)	2,32	0,35	0,96	0,37
Uso anual (Mg.ano ⁻¹)	12.755	35.700	35.700	21.420
Vida útil (anos)	3,0	4,7	2,8	15,6
Fator de Recuperação do Capital (%)	42	29	44	14
Depreciação e Juros (R\$.Mg ⁻¹)	4,71	0,52	1,01	0,80
Taxas, Garagem e Seguro (R\$.Mg ⁻¹)	0,23	0,04	0,05	0,12

Tabela 17. Estimativa dos custos e parâmetros das máquinas envolvidas no sistema de colheita integral.

Custos	Colhedora	Transbordo	Caminhão	Estação de limpeza
Mão-de-obra (R\$.Mg ⁻¹)	0,37	0,34	0,51	0,11
Reparos e Manutenção (R\$.Mg ⁻¹)	2,50	1,13	0,36	3,00
Uso anual (Mg.ano ⁻¹)	102.816	73.552	34.986	342.720
Vida útil (anos)	2,8	4,7	26,7	4,7
Fator de Recuperação do Capital (%)	44	29	13	29
Depreciação e Juros (R\$.Mg ⁻¹)	2,64	0,81	1,22	4,51
Taxas, Garagem e Seguro (R\$.Mg ⁻¹) ¹	0,14	0,06	0,19	0,35

¹ Para a Estação de Limpeza não há o custo de garagem.

Tabela 18. Estimativa da potência média utilizada, consumo de combustível e custos do combustível e dos lubrificantes dos tratores, colhedora e carregadora utilizadas na simulação do custo de recolhimento do palhico.

Máquina	Potência utilizada (%)	Consumo horário de combustível (L·h ⁻¹)	Consumo de combustível por massa de palhico recolhido (L·Mg ⁻¹)	Custo do combustível (R\$.Mg ⁻¹)	Custo dos lubrificantes (R\$.Mg ⁻¹)
Trator acionando a enleiradora	40	8,7	0,54	0,86	0,13
Trator acionando a enfardadora	40	11,2	1,02	1,64	0,25
Trator acionando a colhedora de forragens	40	11,1	0,87	1,39	0,21
Trator acionando a briquetadora	63	17,3	13,56	21,69	3,25
Trator acionando a peletizadora	63	17,3	7,75	12,40	1,86
Trator acionando a prensa de algodão	25	5,4	0,65	1,04	0,16
Transbordo com palhico apenas	30	6,52	1,42	2,27	0,34
Transbordo na colheita integral	30	6,52	0,38	0,61	0,09
Bass boy	30	6,64	2,62	4,20	0,63
Carregadora	30	6,63	0,44	0,70	0,11

Tabela 19. Estimativa da potência média utilizada, consumo de combustível e custos do combustível e dos lubrificantes dos caminhões utilizados nos diferentes sistemas para a simulação do custo de recolhimento do palhico.

Máquina	Potência utilizada (%)	Consumo de combustível por massa de palhico transportado (L·Mg ⁻¹)	Custo do combustível (R\$.Mg ⁻¹)	Custo dos lubrificantes (R\$.Mg ⁻¹)
Caminhão (fardo cilíndrico)	18,5	0,75	1,20	0,18
Caminhão (picado a granel)	18,5	1,05	1,68	0,25
Caminhão (briquetagem e peletização)	18,5	0,60	0,96	0,14
Transmódulo (fardo algodoeiro)	18,5	1,05	1,68	0,25
Caminhão (colheita integral)	18,5	1,05	1,68	0,25