ENLEIRAMENTO E ENFARDAMENTO PRISMÁTICO DE PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: ALGUNS PARÂMETROS DE DESEMPENHO OPERACIONAL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

HAMILTON FERNANDO TORREZAN

Engenheiro Mecânico

Dissertação apresentada à Escola Superior de
Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de Mestre em
Agronomia, Área de Concentração: Máquinas
Agrícolas.

PIRACICABA

Estado de São Paulo – Brasil

Março, 2003

ENLEIRAMENTO E ENFARDAMENTO PRISMÁTICO DE PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: ALGUNS PARÂMETROS DE DESEMPENHO OPERACIONAL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

HAMILTON FERNANDO TORREZAN

Engenheiro Mecânico

Orientador: Prof. Dr. **TOMAZ CAETANO CANNAVAM RIPOLI**

Dissertação apresentada à Escola Superior de
Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de Mestre em Agronomia,
Área de Concentração: Máquinas Agrícolas.

P I R A C I C A B A

Estado de São Paulo – Brasil

Março - 2003

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Torrezan, Hamilton Fernando

Enleiramento e enfardamento prismático de palhiço de cana-de-açúcar : alguns parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética / Hamilton Fernando Torrezan. - - Piracicaba, 2003.
88 p. : il.

Dissertação (mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2003.
Bibliografia.

1. Cana-de-açúcar 2. Energia de biomassa 3. Enfardadoras 4. Fontes alternativas de energia 5. Mecanização agrícola I. Título

CDD 633.61

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

Para os crentes, Deus está no princípio das coisas.

Para os cientistas no final de toda a reflexão.

(Max Planc)

Aos meus pais,
Arrigo (*in memoriam*) e Catharina,
meus irmãos Maria e Jair, dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador e amigo, Prof. Tomaz Caetano Cannavam Ripoli pela orientação, estímulo e sugestões seguras durante o estudo.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” pela oportunidade de complementação à minha formação profissional.

Ao Prof. Dr. Walter Francisco Molina Jr. pelas sugestões e apoio de campo durante o desenvolvimento deste estudo.

A Profa. Dra. Sonia Maria De Stefano Piedade pelas sugestões e ajuda no delineamento estatístico deste estudo.

Ao Prof. Dr. Cláudio Costa pelas sugestões, correções e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de pós-graduação Domingos Guilherme Pellegrino Cerri, Fábio Henrique Rojo Baio, Juliano Crivelenti Garcia Leal, Júlio César Dalla Mora Esquerdo, Lucy Lancia Pereira, Marco Lorenzo Cannavam Ripoli, Mauricio de Leon e Sérgio Fabrício Bizutti, pela colaboração.

Aos engenheiros agrônomos da Usina Cosan-Costa Pinto, Rodolfo Geraldi, Elder Zotelli, João Américo Beltrame, José Carlos Matyis e José Waldir Pupin, pelo apoio e infra-estrutura disponibilizados, sem os quais seria impossível realizar o trabalho.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
RESUMO.....	xiv
SUMMARY.....	xvi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Área cultivada, produção e colheita de cana-de-açúcar crua.....	2
2.2 Geração de energia por biomassa.....	4
2.3 Potencial energético da cana-de-açúcar e outras fontes de biomassa.....	10
2.4 Desempenho operacional de enfardamento de palhiço de cana-de-açúcar.....	17
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1 Material.....	23
3.1.1 Condições de campo.....	23
3.1.2 Fontes de potência.....	23
3.1.3 Máquinas ensaiadas.....	24
3.1.3.1 Ancinho enleirador.....	24
3.1.3.2 Enfardadora.....	24
3.1.4 Instrumentos para determinações ponderais, dimensionais e volumétricas.....	25
3.1.5 Material de laboratório.....	25

3.1.5.1	Equipamentos para determinação de umidade.....	25
3.1.5.2	Equipamentos para determinação do poder calorífico e terra residual.....	26
3.1.6	Material de escritório.....	26
3.1.7	Outros materiais.....	26
3.2	Métodos.....	27
3.2.1	Caracterização das condições de campo.....	27
3.2.1.1	Caracterização do tipo de solo e umidade.....	27
3.2.1.2	Caracterização do palhiço.....	27
3.2.2	Preparação dos tratamentos.....	28
3.2.2.1	Determinação de tempos e movimentos.....	30
3.2.2.2	Determinação do consumo de combustível.....	30
3.2.2.3	Determinação da área.....	31
3.2.2.4	Codificação dos tratamentos.....	31
3.2.3	Enfardamento.....	32
3.2.3.1	Determinação do consumo de combustível.....	33
3.2.3.2	Determinações dimensionais e ponderais dos fardos.....	33
3.2.3.3	Amostragem do palhiço enfardado.....	33
3.2.4	Determinações de laboratório antes do enfardamento.....	35
3.2.4.1	Caracterização do palhiço.....	35
3.2.4.2	Determinação da umidade.....	36
3.2.4.3	Determinação dos poderes caloríficos superior, inferior e útil.....	37
3.2.5	Caracterização do material amostrado após o enfardamento.....	38
3.2.5.1	Determinação da umidade.....	38
3.2.5.2	Determinações ponderais de terra não aderida ao palhiço.....	38
3.2.5.3	Determinações ponderais de terra aderida ao palhiço.....	40
3.2.6	Avaliação das capacidades efetivas.....	42
3.2.7	Eficiência energética.....	43
3.2.8	Análise estatística.....	43

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1	Caracterização do palhiço.....	45
4.2	Potencial energético.....	49
4.3	Parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética da operação de enleiramento.....	52
4.4	Parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética da operação de enfardamento.....	54
4.5	Análise de terra.....	60
5	CONCLUSÕES.....	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
	APÊNDICE.....	73

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 (A) Amostragem do palhiço existente no campo após a colheita mecanizada. (B) Palhiço coletado e ensacado e o aspecto do terreno após a coleta.....	27
2 Esquema de operação de enleiramento simples; LL = Largura da leira; LE = Largura da faixa enleirada.....	28
3 Esquema de operação de enleiramento duplo; LL = Largura da leira; LE = Largura da faixa enleirada.....	29
4 (A), (B) Esquemas de operação do enleiramento triplo; LL = Largura da leira; LE = Largura da faixa enleirada.....	29
5 (A) Ancinho em operação; (B) Vista parcial da área enleirada.....	30
6 Esquema representativo da área dos ensaios e a distribuição dos tratamentos.....	32
7 (A) Enfardadora operando sobre a leira; (B) Enfardadora operando após o descarregamento do fardo anterior.....	33
8 (A) Determinação dimensional fardos; (B) Determinação ponderal dos fardos; (C) Carregamento dos fardos; (D) Transporte dos fardos.	34
9 (A) Fardos após a amostragem na usina; (C) Amostra obtida pela sonda da usina; (D) Amostra, sub-amostra e identificação.....	35
10 (A) Determinação da massa das amostras obtidas; (B) Separação do material; (C) Material separado (ponteiros, colmos e suas frações e terra).....	36

11 Fluxograma da determinação da umidade do palhiço antes do enfardamento.....	37
12 Fluxograma da determinação, por peneiramento, da terra não aderida ao palhiço.....	39
13 (A) Amostras do palhiço lavado e secando no chão, ao Sol; (B) Palhiço sendo moído no moinho; (C) Palhiço moído coletado; (D) Palhiço moído embalado e identificado.....	41
14 (A) Cadinhos, com palhiço moído, na mufla após 4 horas; (B) Cadinho e cinzas após esfriarem em dessecador.....	42
15 Fluxograma da determinação por cinzas da terra aderida ao palhiço..	44
16 Produtividade do palhiço - Valor obtidos neste estudo e valores encontrados na bibliografia.....	48
17 PCI - Resultados obtidos neste estudo e em algumas bibliografias consultadas.....	51
18 Potencial energético do palhiço. Valores obtidos neste estudo e em algumas bibliografias consultadas.....	52
19 Massa específica dos fardos. Valores obtidos neste estudo e em algumas bibliografias consultadas.....	57
20 Massa de palhiço enfardado. Valores obtidos neste estudo e em algumas bibliografias consultadas.....	59
21 Porcentagem de terra no fardo. Valores obtidos neste estudo e em algumas bibliografias consultadas.....	62

LISTA DE TABELAS

	Página
1 Diferenças na emissão de CO ₂ (futuro e hoje). Uso parcial do palhiço e maiores eficiências de conversão.....	5
2 Estimativa do potencial da biomassa seca de resíduos de colheita para as principais regiões produtoras do país (folhas verdes, secas e ponteiros), em 10 ⁶ t.....	7
3 Valores médios da caracterização do palhiço e potencial energético segundo Ripoli et al. (1991).....	8
4 Caracterização dos constituintes da biomassa.....	9
5 Valores da energia da palha e outros combustíveis, em MJ.kg ⁻¹	12
6 Valores médios de carbono (%), hidrogênio (%), umidade (%), poderes caloríficos superior, inferior e útil (kcal.kg ⁻¹).....	12
7 Estimativa de poderes caloríficos (PCI), percentagem de resíduo, umidade e cinzas de bagaço e folhas e ponteiros de cana-de-açúcar.	13
8 Determinação da energia contida no resíduo pós-colheita.....	14
9 Descrição dos tratamentos, massas, massas específicas e quantidades de terra dos fardos médias e capacidades das enfardadoras.....	18
10 Desempenhos operacionais de enfardamento de resíduos de colheita, obtidos por Molina Júnior, 1995.....	19
11 Resultados obtidos com as enfardadoras Claas 1200 e Case 8575....	20
12 Desempenhos operacionais médios das operações de mecanização no recolhimento de palhiço de cana-de-açúcar.....	21

13	Desempenho operacional de enfardadora de fardos retangulares e cilíndricos, segundo Howe & Sreesankon (1990).....	22
14	Caracterização dos constituintes do palhiço existente sobre o terreno e sua estimativa da produtividade, antes da operação de enleiramento.....	45
15	Valores médios da caracterização do palhiço e potencial energético segundo Ripoli et al. (1991).....	46
16	Poderes caloríficos e umidade do palhiço.....	49
17	Parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética das operações de enleiramento.....	53
18	Parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética das operações de enfardamento.....	55
19	Quantidades de terra nos fardos (%).....	60
20	Caracterização das amostragens de 1 m ² do palhiço existente sobre o terreno, antes da operação de enleiramento.	74
21	Determinações volumétricas, temporais no enleiramento simples.....	74
22	Larguras da área no tratamento de enleiramento simples equivalentes a 6 leiras.....	74
23	Comprimentos da área no tratamento de enleiramento simples, em metros.....	75
24	Determinações volumétricas e temporais no tratamento de enleiramento duplo.....	75
25	Tempos dos ciclos operacionais (repetições) no tratamento de enleiramento do tratamento duplo, em segundos.....	75
26	Larguras das áreas no tratamento de enleiramento duplo, em metros	75
27	Comprimento das áreas no tratamento de enleiramento duplo, em metros.....	76
28	Determinações volumétricas e temporais no tratamento de enleiramento triplo.....	76
29	Larguras da área no tratamento de enleiramento triplo, em metros....	76

30	Comprimento das áreas no tratamento de enleiramento triplo, em metros.....	76
31	Tempos dos ciclos operacionais (repetições) no tratamento de enleiramento do tratamento triplo.....	77
32	Dimensões e massas dos fardos. Distâncias e tempos de enfardamento, por repetição no tratamento de enleiramento simples (S).....	77
33	Massa, em quilogramas, das amostras obtidas pela sonda da usina e das quantidades de terra obtidas por peneiramento no tratamento de enleiramento simples (S).....	77
34	Massa, em quilogramas, das sub-amostras para determinação da umidade do palhiço enfardado obtidas pela sonda da usina no tratamento de enleiramento simples (S).....	77
35	Dimensões e massas dos fardos. Percursos e tempos de enfardamento, por repetição, no tratamento de enleiramento duplo (D).....	78
36	Massa, em quilogramas, das amostras obtidas pela sonda da usina e das quantidades de terra obtidas por peneiramento no tratamento de enleiramento duplo (D).....	78
37	Massa das sub-amostras, em quilogramas, para determinação da umidade do palhiço enfardado obtidas pela sonda da usina no tratamento de enleiramento duplo (D)	79
38	Dimensões e massas dos fardos. Percursos e tempos de enfardamento, por repetição, no tratamento triplo (T).....	79
39	Massa das amostras, em quilogramas, obtidas pela sonda da usina e das quantidades de terra obtidas por peneiramento no tratamento triplo (T).....	79
40	Massa das sub-amostras, em quilogramas, para determinação da umidade do palhiço enfardado obtidas pela sonda da usina no tratamento de enleiramento triplo (T)	80

41	Resultados de análise granulométrica e umidade do solo, em %.....	80
42	Resultados das sub-amostras de terra, em gramas, obtidas por meio de bateria de peneiras no tratamento de enleiramento simples (S) e queimadas em mufla.....	80
43	Resultados das sub-amostras de terra obtidas por meio de bateria de peneiras no tratamento de enleiramento duplo (D) e queimadas em mufla.....	81
44	Resultados das sub-amostras de terra obtidas por meio de bateria de peneiras no tratamento de enleiramento triplo (T) e queimadas em mufla.....	81
45	Cinzas de folhas de palhiço lavadas e não lavadas no tratamento de enleiramento simples (SL e SS respectivamente) para a determinação de terra aderida as folhas.....	82
46	Cinzas de folhas de palhiço lavadas e não lavadas no tratamento de enleiramento duplo (DL e DS respectivamente) para a determinação de terra aderida as folhas.....	84
47	Cinzas de folhas de palhiço lavadas e não lavadas no tratamento de enleiramento triplo (TL e TS respectivamente) para a determinação de terra aderida as folhas.....	86

ENLEIRAMENTO E ENFARDAMENTO PRISMÁTICO DE PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: ALGUNS PARÂMETROS DE DESEMPENHO OPERACIONAL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

Autor: HAMILTON FERNANDO TORREZAN

Orientador: Prof. DR. TOMAZ CAETANO C. RIPOLI

RESUMO

O presente estudo visou avaliar alguns parâmetros de desempenho operacional das operações de enleiramento e enfardamento prismático de palhiço de cana-de-açúcar colhida mecanicamente, sem queima prévia, e de suas eficiências energéticas. Os ensaios de campo foram realizados em área da Cosan-Usina Costa Pinto, Município de Piracicaba, SP. A localização geográfica do centro do talhão é Latitude: 22° 40' 30" Sul, Longitude: 47° 36' 38" Oeste e Altitude de 605m. A variedade de cana-de-açúcar era a RB 82 5336, plantada em espaçamento de 1,40 m, em seu terceiro corte, com 11 meses de idade e apresentou uma produtividade média de colmos de 78,00 t.ha⁻¹. O canavial da área de estudo foi colhido por colhedora de cana-de-açúcar. O palhiço foi amostrado e analisado antes das operações de enleiramento e enfardamento. Foram obtidos, como resultados os índices médios de: folhas de 69,93%, frações de colmos de 21,44%, ponteiros de 2,27% e matéria estranha total de 6,36%. A produtividade média estimada apresentou uma grande variabilidade com coeficientes de variação 33,00%. Os valores médios obtidos do palhiço: de poderes caloríficos superiores de

18,43 MJ.kg⁻¹, inferior de 17,00 MJ.kg⁻¹ e útil de 12,94 MJ.kg⁻¹. O potencial energético do palhço determinado confirmou ser uma função varietal e apresentou valor médio de 342,48 GJ.ha⁻¹. Estimou-se para um hectare de palhço o equivalente energético a 30,52 t de madeira, 15,16 t de carvão e de 11648,58 a 10104,17 L de óleo combustível. Foram realizados três tratamentos de enleiramentos: simples, duplo e triplo. A retirada de palhço foi efetuada por meio de ancinho e de enfardadora prismática para fenação e foi viável do ponto de vista operacional e de eficiência energética, sendo que o enleiramento no tratamento de enleiramento simples apresentou os melhores resultados, com a maior capacidade efetiva média de 83,06 t.ha⁻¹, a menor média de consumo de combustível de 0,18 L.t⁻¹ e eficiência energética positiva de 99,95%. Nas operações de enfardamento os fardos no tratamento de enleiramento triplo apresentaram a maior massa específica média de 221,11 kg.m⁻³ e as maiores médias de porcentagem de terra. As massas de terra no fardo aumentaram com enleiramentos sucessivos, e o tratamento de enleiramento triplo resultou em médias de terra nos fardo de 6,41%, contra 6,31% e 5,71% dos tratamentos de enleiramento duplo e simples, respectivamente. A operação de enfardamento do tratamento de enleiramento triplo foi a que obteve melhores resultados, apresentando as capacidades efetivas médias de 20,29 t.h⁻¹ e 1,45 ha.h⁻¹ e o consumo de combustível por tonelada de palhço enfardado em 1,37 L.t⁻¹. A alta eficiência energética total de 99,53% indica que seja tecnicamente viável o recolhimento do palhço.

Palavras chave: Energia de biomassa, enfardadoras, fontes alternativas de energia, mecanização agrícola .

Windrowing and prismatic baling of sugarcane trash: some operational acting parameters and energy efficiency.

Author: Hamilton Fernando Torrezan

Adviser: Prof. Dr. Tomaz Caetano C. Ripoli

SUMMARY

This study was carried out aiming to evaluate some parameters of operational acting of windrowing and prismatic baling operations sugarcane trash picked mechanically without a previous burning and energy efficiency. The field tests were performed in a sugar cane trash field in Piracicaba, State of São Paulo, Brazil. The geographic location of the area is: latitude 22° 40' 30" S, longitude 47° 36' 38" W and altitude of 605m. The sugar-cane variety was RB 82 5336, planted in spacing of 1.40 m, in its third cut, with 11 months and it presented an average productivity of stalks of 78.00 t.ha⁻¹. The sugar cane field of the studied area was picked by a sugarcane harvester. Samples of the trash were analyzed before the windrowing and baling operations. From the trash analysis, before baling, the following average results were obtained: leaves indexes of 89.93%, 21,44% of stalks fractions, 2.27% of tops and 6.36% of total strange matter. The estimated productivity and index presented a great variability with coefficients of variation 33.00% and 68.00% respectively. From the sampled trash, were obtained average values of gross heat of 18.43 MJ.kg⁻¹, low heat of 17.00 MJ.kg⁻¹ and useful heat of 12.94 MJ.kg⁻¹. The energy potential of the trash presented average value of 342.48 GJ.ha⁻¹ confirmed to be a

varietal function. It was considered for a hectare of trash the equivalent energy of 30,52 t of wood, 15,16 t of coal and from 11648,58 to 10104,17 L of fuel oil. Three different windrowing process were carried out, where the simple windrowing treatment consisted of a simple windrow formed by only one passage of the rake, the double of a windrow formed by two simple windrows and the triple by three simple windrows. The picking of sugarcane trash, by means of rake and prismatic baler was viable from the operational and of energy efficiency stand points. The windrowing in the treatment of simple windrowing presented the best results, with the effective capacity of 83.06 t.ha^{-1} , consumption of fuel of 0.18 L.t^{-1} and 99.95% of positive energy efficiency. In bales obtained in the treatment of triple windrowing presented the largest specific mass average of 221.11 kg.m^{-3} and the largest averages of soil percentage. The soil masses in the bales increased with successive windrowing, and the triple windrowing treatment resulted in 6.41% of soil in the bale, against 6.31% in treatments of double windrowing and 5.71% in the simple windrowing. The baling operation in the triple windrowing treatment obtained better results, presenting the effective capacities of 20.29 t.h^{-1} and 1.45 ha.h^{-1} and fuel consumption of for baled in 1.37 L.t^{-1} . The high total energy efficiency of 99.53% indicates that is technically viable the withdrawal of the trash.

Keywords: Biomass energy, balers, alternative energy sources, farming mechanization.

1 INTRODUÇÃO

A ordem de grandeza dos números do setor sucroalcooleiro no Brasil faz com que a cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) se torne a principal fonte de biomassa energética do país, com uma estimativa, para 2003, de uma área cultivada próxima de cinco milhões de hectares e uma produção em torno de 326 milhões de toneladas de colmos cana-de-açúcar. Uma grande parte dos canaviais, ainda, é queimada como prática de pré-colheita, todavia, existe uma pressão da sociedade quanto à eliminação dessa prática nas proximidades dos centros urbanos, além de existência da lei 11241 que impõe prazos para a eliminação do uso fogo na colheita da cana-de-açúcar. Com a queima do canavial perde-se uma considerável quantidade de biomassa que poderia, ser recolhida para seu aproveitamento energético nas usinas e destilarias.

Desta forma é necessário e justificado o desenvolvimento de sistemas que permitam o aproveitamento do palhiço para fins energéticos, transformando as atuais usinas e destilarias em, também, produtoras de energia elétrica através da co-geração.

O objetivo deste trabalho foi avaliar alguns parâmetros de desempenho operacional das operações de enleiramento e enfardamento prismático sobre palhiço de cana-de-açúcar e suas eficiências energéticas.

A hipótese de trabalho deste estudo foi a de que é viável, do ponto de vista operacional e de eficiência energética, a retirada do palhiço de cana-de-açúcar, colhida sem queima prévia, por meio de ancinho enleirador e enfardadora de fardos prismáticos para feno e forragem.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Área cultivada, produção e colheita de cana-de-açúcar crua.

A produção brasileira de cana-de-açúcar no ano safra 2001-2002 foi de $285,77 \cdot 10^6$ toneladas em área de $4,73 \cdot 10^6$ hectares segundo a FNP (2003). A mesma fonte estimou para 2002-2003 uma produção de $326,76 \cdot 10^6$ toneladas de colmos, com uma área colhida de $4,96 \cdot 10^6$ hectares.

De acordo com a Banco de Dados de Biomassa no Brasil, publicado pela Universidade de São Paulo (2002), a cana de açúcar é um dos principais produtos agrícolas brasileiros, sendo cultivada desde a época da colonização. Os números do setor sucroalcooleiro no país não deixam tratar a cana-de-açúcar, apenas como mais um produto, "... mas sim como o principal tipo de biomassa energética, base para todo o agronegócio sucroalcooleiro, representado por 350 indústrias de açúcar e álcool e 1.000.000 empregos diretos e indiretos em todo o Brasil".

Carvalho et al. (1996) estudaram os efeitos de restos culturais da colheita, com e sem queima prévia, na rebrota e na produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar e constataram que o palhiço inteiro, resultante do corte de cana crua, resultou em redução da rebrota inicial nas variedades SP70-1143 e RB72454, mas não afetou o número de colmos finais.

Abramo Filho et al. (1993) estudaram os resíduos da colheita mecanizada de cana crua e encontraram uma camada de 8 a 10 cm de palhiço fazendo com que a temperatura do solo fosse 5°C mais baixa que a ambiente. Os autores comentam que as quantidades físicas de resíduos resultantes da colheita da cana dependem de uma série de condições intrínsecas à máquina colhedora, à planta e ao manejo da cultura. Foi notada também, entre outras

observações, uma maior manutenção da umidade do solo e controle de uma grande variedade de plantas daninhas.

De acordo com a Cooperativa de Produtores de Cana, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo (COPERSUCAR, 2001a) estudos mostraram que a única maneira eficaz de evitar a erosão hídrica nas áreas agricultáveis é impedir o seu início, utilizando técnicas que evitem o impacto direto das gotas de chuva sobre a superfície do solo. O autor recomenda manter o solo coberto através de material orgânico, protegendo-o das intempéries, especialmente durante as reformas de canaviais, utilizando-se de adubação verde e rotação com leguminosas e a adoção de sistema de preparo do solo onde se realiza o mínimo de operações motomecanizadas e na época correta. O artigo cita que o manejo conservacionista de solos viabiliza tecnicamente o preparo reduzido em áreas de cana-de-açúcar colhida sem queimar e, ainda, propicia redução de custos da ordem de 30% quando comparado ao uso de grade e subsolador convencional.

De acordo com Ripoli & Villanova (1992) a queimada de canaviais deve ser combatida, não somente pelo aspecto de agressão ao ambiente, mas basicamente por “tratar-se de um desperdício violento de energia, num país carente de energia! Desperdício este caracterizado pela queima do palhiço (pontas, folhas verdes e palha) de cana-de-açúcar”. Segundo os autores, em trabalhos desenvolvidos pelo Departamento de Engenharia Rural da ESALQ, o palhiço equivale a 32%, em média, de toda biomassa aérea produzida por um canavial.

Segundo a COPERSUCAR (2001c) através do projeto BRA/96/G31 o sistema de produção de cana-de-açúcar sem a utilização da queimada vem sendo implantado nas áreas canavieiras da região sudeste do Brasil. A característica deste sistema é a grande quantidade dos restos vegetais, remanescentes sobre o solo após a colheita. Entre os benefícios citados destacam-se: proteção contra erosão, redução da amplitude da variação térmica e aumento nas taxas de infiltração de água no solo, maior

disponibilidade de água devido à redução da evaporação, controle de plantas daninhas, possibilidade de utilização de parte da palhço para a geração de energia e outros fins. Essa referência relaciona, ainda, os problemas decorrentes da colheita de cana crua: riscos de incêndio durante e após a colheita, dificuldades nas operações de cultivo mecânico e adubação das soqueiras, retardamento ou falhas na brotação e redução da produtividade, sob baixas temperaturas e/ou alta umidade no solo, aumento das populações de pragas. O estudo verificou que a quantidade de palhço suficiente para um controle de plantas daninhas foi da ordem de 7,50 a 9,00 t.ha⁻¹ (matéria seca), quando uniformemente distribuídas sobre o solo. Nessas condições, a eficiência de controle, foi considerada igual ou maior do que a que se consegue através de aplicações bem sucedidas de herbicidas.

Manechini (2000), em estudos do efeito do palhço da cana sobre o controle de plantas daninhas, chegou a conclusão que, acima de 66% dos resíduos da cana deixados no campo estes controlaram ervas daninhas anuais com eficiência acima de 90%, sendo competitivo com herbicida de maior sucesso empregado na produção de cana-de-açúcar.

2.2 Geração de energia por biomassa

De acordo Ripoli et al. (1998) a prática da queima nas áreas de cana-de-açúcar ocorre na época da colheita, de maio a novembro na região sudeste e de setembro a fevereiro na região nordeste do Brasil, causando problemas ambientais. Os autores consideram, ainda, que se o palhço não fosse queimado, este poderia melhorar as condições do solo pois é uma boa fonte de matéria orgânica e nitrogênio.

A COPERSUCAR (1998b), estudando a geração de energia por biomassa (bagaço e palhço de cana-de-açúcar), concluiu que a redução na queima de cana antes da colheita e a maior eficiência na produção de energia leva a uma redução significativa na emissão líquida de CO₂. A análise considerou como base a situação atual média e três cenários:

- hoje – 100% da cana colhida inteira com palha (R1);
- futuro – 55% da cana sem queimar, com recuperação de 100% do palhiço (R2);
- futuro – 55% da cana sem queimar, com recuperação de 50% do palhiço (R3).

Os resultados encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Diferenças na emissão de CO₂ (futuro e hoje). Uso parcial do palhiço e maiores eficiências de conversão.

Cenários	Diesel usado na agricultura (kgCO ₂ .t cana ⁻¹)	Substituição de combustível fóssil (kgCO ₂ .t cana ⁻¹)	Diferença na emissão total (kgCO ₂ .t cana ⁻¹)	Brasil: 300.10 ⁶ t cana.ano ⁻¹ (10 ⁶ .tCO ₂ .ano ⁻¹)
R1	+2,1	-139,0	-137,0	-41,1
R2	+7,3	-139,0	-132,0	-39,6
R3	+2,3	-87,5	-85,0	-25,5

Fonte: COPERSUCAR (1998b).

Estudando os impactos da geração de energia por biomassa Santisirisoboom et al. (2001) concluem que a biomassa tem um grande potencial na co-geração de energia elétrica em curto a médio período. Os autores propõem uma taxaço no custo dos combustíveis com base na eliminação de CO₂ (US\$ 7,50.t⁻¹) além de uma diminuição de 20% dos níveis atuais. Os autores concluem que, deste modo, a biomassa passa a ser competitiva com o os combustíveis fósseis.

Segundo Stout (1984) a biomassa é toda matéria orgânica com a exceção dos combustíveis fósseis. A biomassa para combustível inclui resíduos agrícolas, culturas para uso como combustível, subprodutos do processamento de alimentos, resíduos florestais e lixo urbano.

Koopmans & Koppejan (1997) citam que a biomassa é uma fonte importante de energia na maioria dos países asiáticos. Quantias significativas

de madeira, carvão e outras fontes de energia, tais como, resíduos agrícolas como esterco e folhas são usadas em aplicações domésticas e industriais e entre as aplicações domésticas principais estão cozinhar e aquecer. As aplicações industriais variam de processamento mineral como a fabricação de tijolos, azulejos e cerâmicas, processamento agrícola e alimentício, processamento de metais, tingimento de tecidos e outros. Além destas aplicações, os combustíveis de biomassa também são usados para co-geração de energia, por exemplo, o uso do bagaço na indústria de açúcar (vapor e eletricidade) e resíduos de palma de óleo (vapor e eletricidade).

Graham (1997) estabelece que a “bioenergia” de biomassa na Índia, com foco na zona rural onde vivem 844.10⁶ habitantes (75% da população), supre todas as necessidades básicas, sem rompimento da produção de alimentos e sem impactos nos ecossistemas naturais.

Segundo Brito (1986), a biomassa pode constituir a base de um modelo de desenvolvimento tecnológico e industrial auto-sustentado, baseado em dados concretos da realidade regional e na integração do homem a um ambiente econômico em harmonia com seu ambiente, além de ser uma simples fonte de energia alternativa.

O artigo “Energia elétrica reforça receita das usinas” (2000), publicado no Jornal de Piracicaba, trouxe previsões da Eletrobrás, onde entre outras é necessário ampliar a capacidade energética instalada para cumprir as projeções de crescimento econômico até 2008. Neste contexto, a base instalada no país deveria subir dos atuais 61,3 mil MW para 106,6 mil MW em 2008 - o que significaria injetar no sistema mais 45 mil megawatts provenientes de novas fontes. O setor sucroalcooleiro tem capacidade para produzir 11% desse volume pela co-geração de energia através da queima do bagaço de cana. Por isso, a co-geração é considerada uma das alternativas viáveis para diminuir os impactos da crise energética.

Em uma avaliação preliminar do potencial energético da cana, Walter (1993) considera que para cada tonelada de cana limpa tem-se 250 kg de

biomassa na forma de pontas e folhas e 250 kg na forma de bagaço com 50% de umidade.

Molina Júnior (1991), Ripoli (1991); Tillman (1994) e Furlani Neto (1995) apresentaram resultados de diversas variedades de cana-de-açúcar, sobre a variabilidade espacial referente ao número de colmos industrializáveis por metro linear de fileira de plantio, no momento da operação de colheita: 7,2 a 10,9; 9,2 a 13,6; 7,0 a 16,0 e 10,1 a 12,3, respectivamente.

A COPERSUCAR (2001b) descreve que, embora o número de variedades cultivadas no país ultrapasse algumas dezenas, é razoável considerar que o índice de resíduos de colheita, em matéria seca, de 140 kg por tonelada de cana-de-açúcar seja representativo para a média das áreas de cana-de-açúcar nas diferentes regiões produtoras. Na Tabela 2 tem-se a estimativa do potencial da biomassa com base na safra 97/98, para a cultura canavieira.

Tabela 2. Estimativa do potencial da biomassa seca de resíduos de colheita para as principais regiões produtoras do país (folhas verdes, secas e ponteiros), em 10⁶ t.

Locais	Produção de colmos	Potencial de resíduos secos
São Paulo	181,50	25,40
Centro Sul	249,70	35,00
Norte-Nordeste	51,90	7,20
Brasil	301,60	42,20

Fonte: COPERSUCAR (2001b)

Estudando o potencial energético de resíduos de colheita de cana crua, Ripoli et al. (1991) determinaram as características do palhiço de cinco variedades de cana-de-açúcar de segundo corte. Os dados médios encontram-se na Tabela 3.

Em ensaio de enfardamento de resíduos de cana-de-açúcar, Molina Júnior (1991) recolheu, em média, 9,50 t.ha⁻¹ (matéria seca) e 12,55 t.ha⁻¹ (matéria úmida) de resíduos de colheita mecanizada.

Tabela 3. Valores médios da caracterização do palhiço e potencial energético segundo Ripoli et al. (1991).

Variáveis		SP70-1284	SP70-6163	SP70-1143	SP71-1406	NA5679
U	(%)	44,30	50,36	47,39	38,03	46,11
PE	(t.ha ⁻¹)	13,37	23,57	22,14	27,42	21,53
PA	(t.ha ⁻¹)	77,20	74,92	88,27	75,64	75,53
IP	(%)	17,00	32,00	25,00	36,00	30,00
PEP	(Mcal.t ⁻¹)	29245,50	45721,10	42615,1	58711,70	52623,60
PEP	(Mcal.ha ⁻¹)	2187,40	1939,80	1924,8	2141,20	2444,20
ELA	(LA.ha ⁻¹)	5792,00	9054,00	8439,0	11627,00	10421,00

U=Umidade; PE=produtividade; PA=Produtividade agrícola de colmos, IP=Índice de palhiço; PEP=Potencial energético do palhiço; ELA=Equivalente litros de álcool por hectare; LA = litros de álcool.

Abramo Filho et al. (1993) estudaram os resíduos da colheita mecanizada de cana crua e encontraram 21,3 t.ha⁻¹ de palhiço com umidade de 22,34% , 6,92% de terra junto ao palhiço, 90% de matéria orgânica e 6,8% de cinzas.

Estudando três variedades de cana-de-açúcar Ripoli et al. (1990) concluíram que o palhiço varia de 17 a 31% em peso, em relação à quantidade de colmos industrializáveis, contidos no canavial.

Molina Júnior et al. (1995) encontraram para a variedade SP706163 (segundo e terceiro cortes), no momento da colheita, valores de 33,85 (±9,83) t.ha⁻¹ de palhiço.

Ripoli et al. (1995), estudando o corte manual da cana crua, caracterizaram os constituintes das biomassas de duas variedades de cana-de-açúcar conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Caracterização dos constituintes da biomassa.

Características		SP 71 1406		SP 71 6163	
Condições		Crua	Queimada	Crua	Queimada
Massa de ponteiros	(t.ha ⁻¹)	8,02	5,91	5,07	6,86
Massa de folhas verdes	(t.ha ⁻¹)	16,87	10,26	12,64	10,50
Massa de palhas	(t.ha ⁻¹)	8,36	0,33	8,64	0,28
Índice de palhiço	(%)	25,00	15,00	28,00	16,00

Fonte: Ripoli et al. (1995).

Sayigh (1999) estabelece que a energia renovável é uma “commodity” como qualquer outra forma de energia e tem seu maior papel no encontro das necessidades globais de demanda de energia e no combate do perigo do aquecimento global. O autor comenta as previsões da “Shell International Petroleum Company” sobre o cenário do mercado de energia, que para o ano de 2060, o uso de energias renováveis no mundo poderá atingir 70% da energia utilizada, contra os 5% atuais.

A combustão, segundo Jenkins et al. (1998), pode ser aplicada a biomassa integral ou a parte remanescente de processos de separação bioquímicos como a fermentação. A combustão da biomassa, ao contrário das estratégias bioquímicas ou termoquímicas, é essencialmente não seletiva e reduz o combustível a produtos simples. Tipicamente a biomassa é formada por 30-40% de oxigênio, 30-60% de carbono, 5-6% de hidrogênio, menos de 1% de nitrogênio, enxofre e cloro. Nas culturas anuais o potássio excede 1%.

Cock et al. (2000) em estudo de viabilidade técnica e econômica de geração de eletricidade a partir de resíduos de colheita de cana-de-açúcar crua na Colômbia, concluíram que se os custos de recolhimento no campo e

transporte para o local de geração de eletricidade forem reduzidos para menos de US\$ 8,00 por tonelada de resíduo, com umidade de 35%, a geração de eletricidade seria um excelente investimento. Os autores citam que a maioria das variedades de cana-de-açúcar cultivadas na Colômbia produzem mais de 30% de resíduos.

2.3 Potencial energético da cana-de-açúcar e outras fontes de biomassa

O poder calorífico tem sido freqüentemente usado como um coeficiente para a avaliação da importância econômica relativa dos diversos combustíveis. De acordo com Mialhe (1980), o poder calorífico é a quantidade de calor liberado por um combustível durante a sua combustão completa e que quando o combustível contém hidrogênio, um dos produtos da combustão é a água, que existirá nas formas líquida, vapor ou líquida mais vapor. Se a água for condensada, a bomba calorimétrica registra uma quantidade de calor maior do que se a água existisse na forma de vapor. Deste modo, distinguem-se os poderes caloríficos como:

- poder calorífico superior (PCS), quando a água é completamente condensada;
- poder calorífico inferior (PCI), quando a água, formada durante a combustão, existe inteiramente no estado de vapor.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) através da norma NBR 8633, estabelece o poder calorífico superior como sendo o número de unidades de calor liberadas pela combustão de uma unidade de massa de uma substância, em bomba calorimétrica, em atmosfera de oxigênio, a volume constante e sob condições específicas, de modo que toda a água proveniente da combustão esteja no estado líquido.

Doat (1977) propôs a transformação do poder calorífico superior em poder calorífico inferior, com base nas informações sobre a quantidade de hidrogênio do combustível, calor absorvido para vaporização da água e da proporção da água formada na combustão. O autor propõe a Equação 1.

$$PCI = PCS - 600 \cdot 9 \cdot H / 100 \quad (1)$$

Considerando os coeficientes:

PCI (kcal.kg⁻¹) = poder calorífico inferior;

PCS (kcal.kg⁻¹) = poder calorífico superior;

H (%) = teor de hidrogênio do material;

600 = valor médio da energia absorvida por kg de água para atingir a temperatura de vaporização;

9 = múltiplo do peso do hidrogênio no combustível, fornecendo o peso da água formada na combustão.

O autor propõe, ainda, a transformação do poder calorífico inferior em poder calorífico útil (PCU), onde se considera a umidade do material, pela Equação 2.

$$PCU = PCI \cdot \left[\frac{100 - E}{100} \right] - 6 \cdot H \quad (2)$$

Considerando os coeficientes:

PCU (kcal.kg⁻¹) = poder calorífico útil;

E (%) = umidade do material com base em peso úmido;

6 = fator de conversão referente à energia de evaporação da água de formação.

Em estudo para avaliação da energia potencial da biomassa não industrializável de canaviais, Molina Júnior et al. (1995), encontraram para o palhicho de cana-de-açúcar (variedade SP70-6163 - segundo e terceiro cortes) os poderes caloríficos inferior e útil da ordem de 3.982,57±796,97 kcal.kg⁻¹ e 2.991,38±1096,08 kcal.kg⁻¹, o que confere a um hectare de canavial energia equivalente a até 19.202,52 litros de etanol ou a 7.626,53 litros de óleo diesel, ou a 67,08 t de madeira ou, ainda a 37,64 t de bagaço.

Os valores comparativos de poderes caloríficos de combustíveis, segundo Staniforth (1982), são encontrados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores da energia da palha e outros combustíveis, em MJ.kg⁻¹.

Materiais	Poderes caloríficos inferiores
Palha (15% de umidade)	15
Madeira (15% de umidade)	15
Carvão de boa qualidade	30
Óleo combustível	40-45

Fonte: Staniforth (1982).

Estudando o potencial energético de resíduos de colheita de cana crua Ripoli et al. (1991) determinaram, para cinco variedades de cana-de-açúcar, de segundo corte os dados (médios) apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Valores médios de carbono (%), hidrogênio (%), umidade (%), poderes caloríficos superior, inferior e útil (kcal.kg⁻¹).

Variáveis	Ponteiros	Folhas Verdes	Palhas
Carbono (%)	42,11	43,41	41,76
Hidrogênio (%)	6,25	6,38	6,26
Umidade (%)	76,79	66,21	8,81
Poder Calorífico Superior (kcal/kg)	4318,7	4400,6	4339,0
Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	3981,4	4095,6	4001,4
Poder Calorífico Útil (kcal/kg)	888,0	1344,8	3609,0

Fonte: Ripoli et al. (1991).

Segundo Koopmans & Koppejan (1997), os resíduos constituem a maior parte da produção total anual de biomassa e são uma importante fonte de energia tanto para uso doméstico como para propósitos industriais. A Tabela 7 compila estimativas da porcentagem de resíduos, umidade, cinzas e poderes

caloríficos para o bagaço e para folhas e ponteiros de cana-de-açúcar de outros autores citados por estes

Tabela 7. Estimativa de poderes caloríficos (PCI), percentagem de resíduo, umidade e cinzas de bagaço e folhas e ponteiros de cana-de-açúcar.

Referências	Resíduos (%)	Umidades (%)	PCI (MJ.kg ⁻¹)	Cinzas (%)
Bagaço				
Vimal (1979) ¹	0,33	48,0	9,22	2,0
Webb (1979) ²	0,29	52,0	9,29	3,2
AIT-ECC (1983) ³	0,14	50,0	-	3,9
Strehler & Stutzle (1987) ⁴	1,16	40 - 60	7,75	-
Bhattacharya et al. (1993) ⁵	0,29	49	18,10	-
Ryan & Openshaw (1991) ⁶	0,1-0,3	-	-	10-12
Folhas e ponteiros				
Vimal (1979) ¹	0,1	75,0	-	-
AIT-ECC (1983) ³	0,13	50,0	17,41	1,2
USAID (1989) ⁷	0,30	-	15,81	-

Fonte: Koopmans & Koppejan (1997).

Cock et al. (2000) citam que os resíduos da maioria das variedades de cana cultivadas na Colômbia apresentam poder calorífico útil de 10.000 kJ.kg⁻¹ com umidade de 35%.

¹ VIMAL, O. P. Residue utilization, management of agricultural and agro industrial residues of selected tropical crops (Indian experience). In: WORKSHOP ON AGRICULTURAL AND AGROINDUSTRIAL RESIDUE UTILIZATION IN ASIA AND PACIFIC REGION, s.l., 1979. **Proceedings**. S.l.: UNEP/ESCAP/FAO, 1979. 1v.

² WEBB, B. Technical aspects of agricultural and agro industrial residues utilization. In: WORKSHOP ON AGRICULTURAL AND AGROINDUSTRIAL RESIDUE UTILIZATION IN ASIA AND PACIFIC REGION, s.l., 1979. **Proceedings**. S.l.: UNEP/ESCAP/FAO, 1979. 1v.

³ AIT-ECC. Evaluation and selection of ligno-cellulose wastes which can be converted into substitute fuels. Project submitted to EEC, Belgium. 1983. s.ed., 1983. 1v.

⁴ STREHLER, A.; STUTZLE, W. Biomass residues. In: HALL, D. O.; OVEREND, R. P. **Biomass renewable energy**. s.l.: s.ed., 1987. 1v.

⁵ BHATTACHARYA, S.C.; PHAM, H.L.; SHRESTHA, R. M; Vu, Q. V. CO₂ emissions due to fossil and traditional fuels, residues and waste in Asia. In: AIT WORKSHOP ON GLOBAL WARMING ISSUES IN ASIA. Bangkok, 1992. **Proceedings**. Bangkok: AIT, 1992. 1v.

⁶ RYAN, P.; OPENSHAW, K. **Assessment of biomass energy resources**: a discussion on it's needs and methodology. s.l.: World Bank, 1991. 1v.

⁷ USAID. **Baling sugarcane tops and leaves**: The Tai experience. s.l.: USAID, 1989. 1v.

De acordo com Odum et al. (2002) a quantidade de energia contida em um barril de petróleo é de cerca de 6,3 GJ.

Furlani Neto et al. (1997) determinaram que o potencial energético total de resíduo é uma função varietal, não dependendo de ser cana crua ou queimada. Os autores concluíram com base no índice total de energia que a queima do canavial promoveu uma perda energética de 39,2% para a variedade SP71-1406 e de 59,4% para as SP71-6363, conforme resultados obtidos na Tabela 8.

Tabela 8. Determinação da energia contida no resíduo pós-colheita.

Variedades	Tipos	Resíduos (t)	PCS (Mcal.t ⁻¹)	Energia Mcal.ha ⁻¹	Índice total de energia (%)
SP71-1406	Cana crua	13.514	4.365	58.998,6	(100)
SP71-1406	Cana queimada	8.091	4.430	35.843,1	(60,8)
SP71-6363	Cana crua	24.316	4.660	113.312,5	(100)
SP71-6363	Cana queimada	10.250	4.485	45.971,2	(40,6)

PCS = poder calorífico superior.

Fonte: Furlani Neto et al. (1997)

Pinto (1992), em estudos para o aproveitamento de bagaço e do palhiço de cana-de-açúcar em programas energéticos comunitários, concluiu que o Estado de São Paulo tem capacidade para geração de 2000MW e 3000MW no Brasil. O autor salienta que a co-geração nas usinas e destilarias é realizada no período da seca, quando o déficit de energia elétrica poderia ser suprido por termogeração.

Ripoli et al. (1998) estimaram que com uma área cultivada com cana-de-açúcar de $4,2 \cdot 10^6$ ha é possível produzir, a partir da biomassa, $213,3 \cdot 10^6$

Barris Equivalentes de Petróleo – BEP.ano⁻¹, sendo 82,6.10⁶ BEP.ano⁻¹ de bagaço, 61,76.10⁶ BEP.ano⁻¹ de álcool e 69,6.10⁶ BEP.ano⁻¹ de palhiço.

Ripoli (2002) estudando o mapeamento de palhiço enfardado de cana-de-açúcar através de GPS, determinou o seu potencial energético, em termos de equivalente barril de petróleo (EBP.ha⁻¹), da ordem de 11,22 com desvio padrão de 1,45.

O palhiço de cana de açúcar e o bagaço têm um potencial real para melhorar a matriz energética brasileira, segundo Ripoli et al. (2000). Os autores desenvolveram a Equação 3 para estimar o número de pessoas que poderiam ser servidas com energia elétrica gerada a partir do palhiço (biomassa).

$$Pd = \frac{Pu \cdot \alpha \cdot Ac \cdot Qt \cdot Ef}{1314 \cdot Cd} \quad (3)$$

Considerando os coeficientes:

Pd	=	Número de pessoas servidas/ano;
Pu (MJ. t ⁻¹)	=	Energia contida no palhiço com umidade “U”;
α (%)	=	Quantidade de palhiço a ser utilizado para produzir energia;
Ac (ha.a ⁻¹)	=	Área colhida, por ano, com palhiço para produzir energia;
Qt (t.ha ⁻¹)	=	Quantidade de palhiço no campo após a colheita;
Ef (%)	=	Eficiência do processo;
Cd (kWh.d ⁻¹)	=	Consumo médio diário por pessoa.

Ripoli (1991) estimou, para as variedades SP 711406 e NA 5679, no Estado de São Paulo, o equivalente energético do palhiço em equivalente barril de petróleo (EPB). O valor médio foi 30,89 EPB.ha⁻¹ de palhiço. Para cálculo da eficiência energética que é “...a relação entre a quantidade de energia, na forma de combustível consumido pelas máquinas envolvidas nas operações e a quantidade de energia existente na forma de palhiço”. O autor determinou a Equação 4.

$$BE = \left(1 - \frac{CC}{PEP} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

Considerando os coeficientes:

BE (%) = Eficiência energética;

CC (MJ.kg⁻¹) = Consumo equivalente de combustível;

PEP (MJ.kg⁻¹) = Potencial energético do palhiço.

De acordo com Castro (2001), uma tonelada de cana produz cerca de 240 kg de bagaço e tem potencial para gerar 70 kWh, dos quais, 30 são utilizados na produção de açúcar e álcool. Se as 131 usinas e destilarias do Estado de São Paulo gerassem 40 kWh de energia elétrica excedente por tonelada de cana, a produção seria equivalente à de duas turbinas da Usina Hidrelétrica de Itaipu, ou seja, 1,5 GW. O autor ainda afirma que a região de Ribeirão Preto produz 900 mil hectares de cana, e se fosse utilizado todo o palhiço produzido, exclusivamente na geração de energia elétrica, o número de residências atendidas seria de 6,36 milhões.

Segundo Gopinath (1998) o potencial do palhiço de cana-de-açúcar como combustível em caldeiras tem sido, preliminarmente, discutido na Índia com base em ensaios desenvolvidos nas cidades de Delhi e Chennai e nos ensaios realizados na Tailândia em 1989-90, onde esse material foi enfardado utilizando-se de enfardadoras de feno. O palhiço enfardado pode ser armazenado por 6 meses sem nenhuma degradação apreciável.

Para Hobson et al. (1998), a conversão do bagaço e, possivelmente, o palhiço da cana-de-açúcar em gás, que pode ser queimado em uma turbina de ciclo combinado gás/vapor, oferecem um aumento significativo da potência gerada pela indústria de açúcar. Para a indústria australiana de açúcar, a gaseificação do bagaço, somado a 66% do palhiço disponível, poderia gerar

uma capacidade de energia excedente de 2600MW durante a safra e 3000MW durante a entressafra.

Os desperdícios de colheita são abundantes na Índia, de acordo com Shukla et al. (1995) e a disposição racional através de processos de decomposição naturais (em lugar de queima ineficiente) é necessário para evitar o agravamento, pela diminuição do material orgânico, da fertilidade do solo. O Instituto Nacional de Açúcar e Chemolimpex da Hungria desenvolveram um processo semi-úmido que produz biogás e bio-adubo por fermentação controlada de resíduos de cana-de-açúcar, bagaço, torta de filtro e cinza de caldeira. O biogás consiste, principalmente, em metano (55-60%), CO₂ (30-35%) e H₂ (5-10%). A eficiência energética, segundo os autores, é de mais de 85%, comparada com 60% do bagaço queimado. O rendimento de biogás é 200-350 m³.t⁻¹, e o valor calorífico total é 4-6 Mcal.m⁻³.

2.4 Desempenho operacional de enfardamento de palhiço da cana-de-açúcar

Segundo Magalhães & Braunbeck (2001), a palha seca apresenta uma baixa densidade e, para diminuir os custos com transporte, sugerem que seja efetuado um adensamento, onde o volume inicial é reduzido aproximadamente 15 vezes. Segundo os autores, as tecnologias disponíveis para o adensamento são as enfardadoras de forragem de êmbolos e as rotativas.

O enfardamento, segundo Srivastava et al. (1994a), é o método mais popular de colheita de feno e que as mesmas máquinas são usadas para enfardamento de palha e outros materiais fibrosos.

A norma D497 da American Society of Agricultural Engineers (ASAE, 1992) diz que a eficiência de campo para enfardadoras de fardos grandes é de 65%, variando numa faixa de 55 a 75% e a velocidade de campo dessas máquinas varia de 4,0 a 8,0 km.h⁻¹, sendo a velocidade típica da ordem de 5,5 km.h⁻¹.

A COPERSUCAR, através do Projeto BRA/96/G31 (1998b), realizou estudos para avaliar viabilidade de recolher o palhiço deixado no campo após a colheita de cana crua e ensaiou algumas enfardadoras. As máquinas empregadas foram as enfardadoras Sode JS-90, Semeato ROL-1518 e New Holland NH-570. Os ensaios foram realizados de 2 a 3 dias após a colheita da cana crua. O resumo dos ensaios de enfardamento encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9. Descrição dos tratamentos, massas, massas específicas e quantidades de terra dos fardos médias e capacidades das enfardadoras.

Fabricantes Enfardadoras	Enleiramentos	Massas dos fardos (kg)	Massas específicas (kg.m ⁻³)	Quantidades de terra nos fardos (%)	Capacidades das enfardadoras (t. h ⁻¹)
JS-90	Com	105,8	118,0	5,6	1,8
	Sem	119,3	129,3	2,8	2,0
ROL-1518	Com	285,4	94,7	6,2	2,7
	Sem	260,0	107,5	2,3	1,0
NH-570	Com	15,0	112,0	-	9,0
	Sem	-	-	-	-

Fonte: COPERSUCAR (1998b).

Com base nos ensaios foram estabelecidas algumas observações sobre o enleiramento: melhora a capacidade de enfardamento; reduz os danos ao mecanismo recolhedor (que pode trabalhar afastado do solo); evita a propagação do fogo accidental. Com respeito ao tipo de fardos, os resultados indicaram que o sistema das enfardadoras de fardos retangulares é o mais indicado pois apresentam: maior capacidade operacional; maior facilidade de operação com palhiço e pedaços de cana; melhor ocupação do espaço da carroceria do caminhão de transporte dos fardos.

De acordo com a COPERSUCAR (2001b), a eficiência de recolhimento de palhiço por enfardadora para a condição de recolhimento de duas ruas de palhiço sobre uma rua, em áreas de colheita de cana sem queimar, com palhiço deixado no solo, é de 84%.

O recolhimento de resíduo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar foi estudado por Molina Júnior (1991). Os resultados obtidos sobre desempenho operacional da enfardadora operando em área de palhiço não enleirado, segundo o autor, foram inferiores aos apresentados na bibliografia, devido a condições não ideais de enfardamento, sendo que o valor médio para a capacidade efetiva foi de $1,11 \text{ t.h}^{-1}$ e o consumo médio de combustível no enfardamento foi de $4,17 \text{ L.t}^{-1}$. O autor concluiu ainda que a operação de enfardamento deve-se dar com o enleiramento do palhiço, uma vez que o não enleiramento mostrou-se ineficiente na tentativa de obter fardos com pequena quantidade de terra.

Molina Júnior et al. (1995) estudaram os aspectos econômicos e operacionais do enfardamento de resíduo de colheita de cana-de-açúcar para aproveitamento energético sob duas condições de campo: área A – canavial de primeiro corte e área B – canavial de segundo corte. Os resultados obtidos de desempenhos operacionais são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Desempenhos operacionais de enfardamento de resíduos de colheita, obtidos por Molina Júnior, 1995.

Variáveis	Áreas		Médias
	A	B	
CCh (l.h^{-1})	$4,3 \pm 0,9$	$4,4 \pm 1,7$	$4,3 \pm 1,2$
CCT (t.h^{-1})	$1,26 \pm 0,9$	$0,96 \pm 0,3$	$1,11 \pm 0,7$
CCA (ha.h^{-1})	$0,28 \pm 0,08$	$0,24 \pm 0,04$	$0,26 \pm 0,07$
ECE (Mcal.ha^{-1})	$135,8 \pm 51,1$	$162,2 \pm 60,3$	$149,0 \pm 57,9$
EMR (Mcal.ha^{-1})	$13728,5 \pm 14441,9$	$1009,8 \pm 3945,1$	$12869,1 \pm 9569,06$

CCh=consumo horário de combustível da fonte de potência; CCA e CCT=desempenho operacional do conjunto; ECE=energia consumida pela fonte de potência na forma de combustível; EMR=equivalente em energia do resíduo enfardado.

Em ensaios realizados pela COPERSUCAR (1998a) com as enfardadoras Case 8575 e Claas Quadrant 1200 foram determinadas as capacidades efetivas das enfardadoras e as caracterizações ponderais e dimensionais dos fardos, conforme apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11. Resultados obtidos com as enfardadoras Claas 1200 e Case 8575.

Parâmetros	Claas 1200	Case 8575
Massas médias dos fardos (kg)	204	368
Dimensões dos fardos (cm)	120x70x175	87x82x210
Massas específicas (kg.m ⁻³)	138,5	245
Umidades médias do palhiço (%)	10,0	42
Capacidades efetivas (t.h ⁻¹)	11,4	22,0
Capacidades efetivas, palhiço seco (t.h ⁻¹)	10,1	12,7

Fonte: COPERSUCAR (1998a).

Estudando os resíduos da indústria canavieira, Cerri et al. (1988) encontraram teores de cinzas minerais de 3,4% no bagaço de cana-de-açúcar.

Ripoli (1991), trabalhando com palhiço remanescente de colheita sem queima prévia de duas variedades de cana-de-açúcar e utilizando quatro conjuntos mecanizados (colhedora de cana-de-açúcar, ancinho enleirador, carregadora de cana e carreta), obteve os resultados os desempenhos operacionais médios do ensaio de campo apresentados na Tabela 12. O autor obteve para a variedade SP701143 uma massa específica de palhiço de 141,94 kg.m⁻³ e para a variedade NA 5679 uma massa específica de 104,63 kg.m⁻³. O autor cita também que como resultados das operações de enleiramento e carregamento, 12,28% de terra foram carregados juntamente com o palhiço.

Tabela 12. Desempenhos operacionais médios das operações de mecanização no recolhimento de palhiço de cana-de-açúcar.

Operações		Variedades	
		SP701143	NA5679
Enleiramento			
Efetivo	(ha.h ⁻¹)	1,67	1,79
Operacional	(ha.h ⁻¹)	1,40	1,38
Cons. Combustível	(L.h ⁻¹)	8,37	7,32
	(L.t ⁻¹)	0,40	0,40
Carregamento			
Efetivo	(ha.h ⁻¹)	1,11	0,97
	(t.h ⁻¹)	17,29	16,07
Operacional	(ha.h ⁻¹)	0,90	0,71
	(t.h ⁻¹)	14,15	11,97
Transporte			
Operacional	(t.h ⁻¹)	2,64	3,74

Fonte: Ripoli (1991).

Howe & Sreesankon⁸ citados por Molina Júnior (1991) obtiveram os resultados de desempenho de enfardadoras cilíndricas e prismáticas conforme apresentados na Tabela 13.

Ripoli (2002) estudando o mapeamento de palhiço enfardado de cana-de-açúcar e seu potencial energético concluiu que sua variabilidade espacial é muito grande e que requer muito cuidado nas amostragens de determinação de produtividade. O autor estudou o enfardamento cilíndrico e prismático dez dias após a colheita mecanizada de cana-de-açúcar, obtendo 42 fardos e como média geral de palhiço enfardado de 8,79 t.ha⁻¹, com coeficiente e variação de 30,03%. A umidade média do palhiço obtida foi de 22,58%, com desvio padrão de 9,85%.

⁸ HOWE, R.; SREESANGKOM, P. **Costs and performance of equipments for baling sugar cane tops and leaves**. S.I.: United States Agency of International Development, 1990. 56p.

Tabela 13. Desempenho operacional de enfardadora de fardos retangulares e cilíndricos, segundo Howe & Sreesankon.

Desempenhos		Tipos de enfardadoras	
		Fardos Retangulares	Fardos Cilíndricos
Capacidades efetivas	(ha.h ⁻¹)	0,22	0.29
	(t.h ⁻¹)	2,21	2.49
Capacidades operacionais	(ha.h ⁻¹)	0,10	0.24
	(t.h ⁻¹)	1,04	1.45
Massas médias/fardos	(kg)	16,04	371
Massas específicas	(kg.m ⁻³)	99,6	146.9
Resíduos recolhidos	(t. ha ⁻¹)	10,06	8.63
Nº total de fardos		123.905	7.360
Recolhimentos	(%)	78	71

Fonte: Molina Júnior (1991).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

3.1.1 Condições de campo

Os ensaios de campo foram realizados em área da Cosan-Usina Costa Pinto, Município de Piracicaba, SP. A localização geográfica do centro do talhão é Latitude: 22° 40' 30" Sul, Longitude: 47° 36' 38" Oeste e Altitude de 605m. A variedade de cana-de-açúcar existente era a RB 82 5336, plantada em espaçamento de 1,40 m, em seu terceiro corte, com 11 meses e apresentou uma produtividade média de colmos de 78,00 t.ha⁻¹. O canavial da área de estudo foi colhido por colhedora de cana-de-açúcar, permanecendo sobre o terreno, o palhiço.

3.1.2 Fontes de potência

As fontes de potência utilizadas foram as seguintes:

- Trator New Holland^{®9} 4x2 TDA, modelo TM120 com potência nominal de 90kW a 2200rpm;
- Carregadora convencional de cana Motocana[®].
- Caminhão de carga seca.

⁹ A citação de marcas neste trabalho não significa preferência do autor.

3.1.3 Máquinas ensaiadas

3.1.3.1 Ancinho enleirador

O ancinho enleirador utilizado foi do tipo com molinete cilíndrico oblíquo, marca New Holland®, modelo 256, com as seguintes características, conforme dados do fabricante:

Largura do ancinho: 2,6m
Largura total: 3,1m
Altura total: 1,3m
Comprimento total: 1,3m
Velocidade operação: 3 a 11km.h⁻¹
Massa: 358kg (sem pneus)
Número de dentes: 90
Acionamento por roda de terra

3.1.3.2 Enfardadora

A enfardadora utilizada foi de fardos prismáticos, marca New Holland®, modelo BB940, com as seguintes características conforme dados do fabricante::

Potência mínima exigida na tomada de potência: 75kW
Rotação da árvore da TDP: 1.000rpm
Recolhedor com largura efetiva de 1,98m (DIN 11220)
Sistema de amarração:
Tipo de barbante: sisal ou polipropileno
Número de atadores: 4
Ventilador do atador: 2
Dimensões da máquina:
Comprimento com calha fechada 7.230mm
Largura: 2.580mm
Altura, com eixo simples: 3.050mm
Massa: 6.650 kg

3.1.4 Instrumentos para determinações ponderais, dimensionais e volumétricos.

Célula de carga marca KIOWA® de capacidade de carga de 1.000 kg e precisão de leitura de 10^{-1} kg, com indicador Microprocessador Micro PC SODMEX®, saída analógica 0 a 10 V (corrente contínua) e saída digital R 5232, alimentação de 85 a 264V (corrente alternada).

Balança de plataforma, para caminhões, com capacidade de carga de 30.000 kg e precisão de leitura de 5kg, da Usina.

Para as determinações de tempo de percurso das máquinas foram utilizados dois cronômetros digitais da marca CASIO®, com precisão de leitura de 10^{-2} s.

Para as determinações do consumo de combustível foram utilizadas duas buretas graduadas com capacidades máximas de 500mL e 1000mL e precisão de leitura de 5 mL.

Para as determinações das dimensões dos fardos, das distâncias de enfardamento e demarcação de áreas foram utilizadas trenas metálicas com 5m marca Eslon® e precisão de leitura de 10^{-2} m e trenas de fibra de vidro marca Eslon® de 50m com precisão de leitura de 10^{-2} m.

Para as estimativas da quantidade de palhiço existente nas áreas de estudo utilizou-se um gabarito quadrado de ferro com 1m de lado.

3.1.5 Material de laboratório

3.1.5.1 Equipamentos para determinação da umidade.

Sonda padrão para amostragem de matéria-prima, marca CODISTIL®, do laboratório de análise tecnológica da Cosan-Usina Costa Pinto.

Estufa marca FANEM®, modelo 315SE, com regulação de temperatura de 37°C a 220°C;

Balança semi-analítica, marca METTLER®, modelo P11, capacidade de carga 5,0 kg e precisão de leitura 10^{-2} g.

3.1.5.2 Equipamentos para determinação do poder calorífico e terra residual.

Os equipamentos utilizados para as determinações de poder calorífico do material “in natura” e para as determinações terra, foram:

balança analítica marca METTLER®, modelo H10, com capacidade de carga de 160g e precisão de leitura de 10^{-4} g;

bomba Calorimétrica marca INCOMAP®, modelo D-127;

moinho de facas;

cadinhos de porcelana;

mufla marca FORMITEC®, com temperatura máxima de 1000°C;

dessecadores;

tenazes;

bateria de peneiras de análise granulométrica de solo.

3.1.6 Material de escritório

Computador pessoal com “softwares” Word®, Power Point®, Excel® e Photoimpact®, “scanner” e câmera digital.

3.1.7 Outros materiais

Tripé metálico de suporte para a célula de carga, sacos plásticos, sacos de papel perfurados, sacos de aniagem, facões, lonas plásticas.

3.2 Métodos

3.2.1 Caracterizações e determinações de campo

3.2.1.1 Caracterização do tipo de solo e umidade

Foram tomadas cinco amostras de solo na profundidade de 0 a 5 cm, casualizadamente e acondicionadas em recipientes de alumínio vedados hermeticamente com fita adesiva, para posterior determinação, em laboratório, de sua umidade e granulometria.

3.2.1.2 Caracterização do palhiço

A caracterização do palhiço remanescente da colheita mecanizada na área de estudo foi realizada com base no método apresentado por Molina Júnior (1991) onde, antes da operação de enfardamento, o material foi amostrado com o auxílio do gabarito quadrado de ferro, com 15 repetições.

O gabarito foi arremessado sobre a área, casualizadamente, para cada repetição. O material encontrado dentro do gabarito (Figura 1A) foi recolhido, ensacado (Figura 1B), identificado e vedado para posteriores determinações das massas totais das amostras, de seus constituintes e de terra contida. De cada repetição tomou-se uma sub-amostra para posterior determinação do poder calorífico e da umidade.

Figura 1 - (A) Amostragem do palhiço existente no campo após a colheita mecanizada. (B) Palhiço coletado e ensacado e o aspecto do terreno após a coleta.

3.2.2 Preparação dos tratamentos

A preparação dos tratamentos foi realizada utilizando-se do ancinho enleirador para o enleiramento do palhiço. A regulagem do equipamento foi executada por técnico enviado pela Case-New Holland Latino América, e mantida para os três tratamentos objetos dos ensaios.

O primeiro tratamento (Figura 2) foi caracterizado por um enleiramento simples, que constou de uma única passada do ancinho, sobre determinada área.

Figura 2 - (A) Esquema de operação enleiramento simples; LL = Largura da leira; LE = Largura da faixa de enleiramento.

O segundo tratamento (Figura 3) foi caracterizado por um enleiramento duplo e que constou de duas passadas adjacentes do ancinho enleirador, uma em sentido contrário a outra, de modo a se conseguir uma única leira de palhiço.

O terceiro tratamento (Figura 4) foi caracterizado por um enleiramento triplo, que constou de cinco passadas adjacentes do ancinho enleirador, uma em sentido contrário a outra, de modo a se conseguir primeiramente uma leira formada por duas passadas e em seguida mais uma passada adjacente de modo a aproximar uma leira simples e finalmente a leira dupla foi depositada sobre o enleiramento simples.

Figura 3 - (A) Esquema de operação de enleiramento duplo; LL = Largura da leira; LE = Largura da faixa de enleiramento.

Figura 4 - (A), (B) Esquemas de operação do enleiramento triplo; LL = Largura da leira; LE = Largura da faixa de enleiramento.

3.2.2.1 Determinação dos tempos e movimentos

Considerou-se, para as determinações de tempos e movimentos do enleiramento simples, o ciclo operacional unidirecional fechado. Sob esta condição, do início do deslocamento até a parada da máquina no final do percurso, não ocorreram manobras de cabeceira.

Os tempos e movimentos dos enleiramentos duplo e triplo foram caracterizados por ciclos operativos unidirecionais abertos e sob esta condição, do início do deslocamento até a parada da máquina no final do percurso, ocorreram manobras de cabeceira.

Figura 5 - (A) Ancinho em operação; (B) Vista parcial da área enleirada.

3.2.2.2 Determinação do consumo de combustível

No início de cada tratamento, com trator e ancinho nivelados, o tanque de combustível foi completado com óleo diesel, até uma marca conhecida, em seu bocal. Ao final de cada tratamento, utilizando-se de buretas graduadas, completou-se o volume de combustível no reservatório da máquina até a mesma marca inicial, obtendo-se assim, em mililitros, a quantidade consumida e correspondente à execução de cada tipo de enleiramento (tratamento).

3.2.2.3 Determinação da área

Nos três tratamentos, as determinações dos comprimentos das áreas enleiradas foram realizadas através de trenas, tomando-se 5 repetições, casualizadamente, ao longo do comprimento da área, seguindo-se a trajetória do ancinho enleirador.

As larguras das áreas, nas três preparações de tratamentos, foram determinadas utilizando-se de trenas, e tomando-se aleatoriamente a distância perpendicular ao trajeto do equipamento.

No tratamento de enleiramento simples a área enleirada foi determinada com a média das medidas de largura, tomadas casualizadamente ao longo da faixa enleirada, medindo-se o equivalente a 6 leiras, por repetição, e determinado-se a largura média efetiva de cada uma das faixas enleiradas.

No tratamento de enleiramento duplo a área enleirada foi determinada com a média das medidas de largura, das duas passadas, tomadas casualizadamente ao longo da faixa enleirada.

No tratamento de enleiramento triplo a área enleirada foi determinada com a média das medidas de largura das passadas, tomadas casualizadamente ao longo da faixa enleirada.

3.2.2.4 Codificação dos tratamentos

Os tratamentos aplicados na área experimental foram casualizadamente distribuídos conforme mostrado na Figura 6 e os fardos obtidos receberam a seguinte codificação:

- X = número de identificação de cada fardo
- S = tratamento de enleiramento simples
- D = tratamento de enleiramento duplo
- T = tratamento de enleiramento triplo

Figura 6 - Esquema representativo da área dos ensaios e a distribuição dos tratamentos.

3.2.3 Enfardamento

Para a operação de enfardamento (Figura 7), foi considerado como repetição a ação de recolher determinada quantidade de palhicho enleirado sobre o terreno e depositá-lo na forma de um fardo, levando-se em conta a distância percorrida, o tempo e o combustível consumidos e a correspondente área coberta resultante do tipo de enleiramento efetuado. As larguras das áreas utilizadas foram as descritas no item 3.2.2.3. O comprimento das áreas nos três tratamentos foi determinado considerando-se a distância entre o início e o final de operação de enfardamento, medindo-se a distância do início ao primeiro fardo e as distâncias entre fardos.

Dessa forma, em função dos tratamentos efetuados, foram obtidas diferentes quantidades de fardos (repetições) por tratamento. Do total de fardos obtidos, 4 unidades de cada tratamento foram escolhidas, casualizadamente, para retirada de amostras para análises laboratoriais.

3.2.3.1 Determinação do consumo de combustível

No início de cada tratamento, com trator e enfardadora nivelados, o volume de tanque de combustível da fonte de potência foi completado conforme já descrito no item 3.2.2.2. A quantidade de combustível consumida em cada repetição foi obtida dividindo-se, proporcionalmente, o volume consumido no tratamento pelas distâncias percorridas correspondentes para a obtenção de cada fardo.

Figura 7 - (A) Enfardadora operando sobre a leira; (B) Enfardadora operando após o descarregamento do fardo anterior.

3.2.3.2 Determinações dimensionais e ponderais dos fardos

Os fardos tiveram suas arestas medidas com auxílio de trena (Figura 8A). Por meio de célula de carga atrelada à garra de uma carregadora de cana, foram determinadas as massas dos fardos (Figura 8B), visando a determinação de seus volumes e respectivas massas específicas.

3.2.3.3 Amostragem do palhiço enfardado

Os fardos foram carregados com auxílio de carregadora de cana (Figura 8C) e transportados (Figura 8D) para a usina para a retirada de duas amostras por fardo, por meio da sonda do laboratório de análise tecnológica (Figura 9).

Figura 8 - (A) Determinação dimensional fardos; (B) Determinação ponderal dos fardos; (C) Carregamento dos fardos ; (D) Transporte dos fardos.

O material de cada amostra, obtido pela sonda, foi ensacado, identificado e levado para o laboratório da área de Mecânica e Máquinas Agrícolas da ESALQ – USP, do qual, 24 sub-amostras foram tomadas para determinação de umidade (Figura 9D).

A identificação seguiu o mesmo critério adotado no item 3.2.2.4 sendo acrescentados os dígitos 1 e 2 no final para identificar cada uma das amostras, ficando a numeração, por exemplo, para a amostra 2 do primeiro fardo depositado no tratamento de enleiramento triplo como **1T2**.

Figura 9 - (A) Fardos após a amostragem na usina; (B) Amostra obtida pela sonda da usina; (C) Amostra, sub-amostra e identificação.

3.2.4 Determinações de laboratório antes do enfardamento

3.2.4.1 Caracterização do palhiço

As amostras de palhiço colhidas conforme item 3.2.1.2 tiveram suas massas obtidas através de célula de carga (Figura 10A) e seus constituintes separados sobre lona preta, manualmente, em folhas, ponteiros, colmos e frações de colmos, terra e particulado vegetal (Figura 10B). Tais porções foram identificadas e armazenadas em sacos plásticos (Figura 10C), hermeticamente fechados e, posteriormente, obtidas suas massas, por meio de balança analítica digital.

Figura 10 - (A) Determinação da massa das amostras obtidas; (B) separação do material; (C) material separado (ponteiros, colmos e suas frações e terra).

3.2.4.2 Determinação da umidade

As sub-amostras obtidas conforme item 3.2.1.2 foram separadas em duas porções, uma para a determinação da umidade, conforme o fluxograma apresentado na Figura 11, e outra para a determinação do poder calorífico do material em estudo.

Figura 11 - Fluxograma da determinação da umidade do palhiço antes do enfardamento.

A umidade em porcentagem ($U\%$) foi determinada em função da massa em base úmida do material, de acordo com a Equação 5.

$$U\% = \frac{\text{Massa úmida} - \text{Massa seca}}{\text{Massa úmida}} \cdot 100 \quad (5)$$

3.2.4.3 Determinação dos poderes caloríficos superior, inferior e útil.

Para a determinação do poder calorífico superior das amostras do material, adotou-se a norma NBR 8633 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1984) que estabelece a determinação para o carvão vegetal, definindo como o número de unidades de calor liberado pela combustão de uma unidade de massa de uma substância, em bomba calorimétrica, em atmosfera de oxigênio, sob volume constante e sob condições específicas, de modo que toda a água proveniente da combustão esteja no estado líquido.

Obtido o poder calorífico superior (PCS) das amostras, aplicou-se o método de Doat (1977) para a obtenção do poder calorífico inferior (PCI), que leva em conta a quantidade de hidrogênio contida no material, calor absorvido para vaporização da água nele contido e da proporção da água formada na combustão, conforme a Equação 1 do item 2.4. Para transformação do poder calorífico inferior (PCI) em poder calorífico útil (PCU), também foi utilizado o método de Doat (1977), que considera a umidade do material conforme a equação 2 do item 2.4.

3.2.5 Caracterização do material amostrado após o enfardamento

3.2.5.1 Determinação da umidade

As sub-amostras obtidas das amostragens realizadas por meio de sonda no palhiço enfardado (item 3.2.3.3) foram transferidas para sacos de papel tarados e determinadas as massas por meio de balança analítica digital, determinando deste modo a massa em matéria úmida. Estas sub-amostras foram colocadas em estufa por 48 h na temperatura de 105°C. A seguir, o material seco em estufa teve sua massa determinada por meio de balança analítica digital. O valor, em porcentagem da umidade, foi encontrado utilizando-se a Equação 5.

3.2.5.2 Determinações ponderais de terra não aderida ao palhiço

As massas das 24 amostras obtidas através da sonda da usina (item 3.2.3.3) foram obtidas utilizando-se de célula de carga. Separadamente, cada uma delas foi peneirada em peneira de malha 2,5mm, o que permitiu a passagem da terra e de partículas de material vegetal. Duas sub-amostras (de cada amostra) do material que não passou pela peneira de malha 2,5mm foram retiradas para a determinação de terra existente.

Para a separação mais fina do particulado vegetal e terra, cada sub-amostra passou por uma bateria de peneiras de análise granulométrica de solo, restando após a passagem pela peneira mais fina, somente a terra e um

particulado vegetal muito fino. As massas do material foram então determinadas conforme o fluxograma da Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma da determinação, por peneiramento, da terra não aderida ao palhiço.

As duas amostras, de um mesmo fardo, de terra com particulado vegetal, obtidas após o peneiramento de bateria de peneiras, foram misturadas, homogeneizadas e subdivididas em 5 sub-amostras. Cada sub-amostra foi colocada em cadinho tarado e previamente “queimado” em mufla a 700°C por uma hora para eliminação de impurezas e umidade. Os cadinhos com as sub-amostras foram levados à estufa por 24 horas para eliminação da umidade e posteriormente levados à mufla para serem “queimados” por 4 horas a

temperatura de 700°C. Após a “queima” foram imediatamente colocados em estufa para diminuição da temperatura e, em seguida, em dessecadores para esfriarem. As massas, de terra e cinza, foram então determinadas com os cadinhos frios sob temperatura ambiente.

3.2.5.3 Determinações ponderais de terra aderida ao palhiço

Uma das duas sub-amostras de cada fardo obtidas pela sonda da usina, retiradas após o peneiramento em malha de 2,5 das amostras, de acordo com o item 3.2.5.2 e identificados no fluxograma da Figura 12, foi lavada com água, de modo a eliminar a terra aderida ao palhiço presente na amostra e, então, foram secas ao sol (Figura 13A). A outra sub-amostra foi mantida com o material aderido. O passo seguinte foi a moagem das sub-amostras (lavadas e não lavadas) que foram reduzidas a pó com auxílio de moinho de facas (Figura 13B).

De cada sub-amostra de material moído (Figura 13D) foram então subdivididas em 5 partes que foram queimadas conforme o método utilizado no item 3.2.5.2. Obteve-se, deste modo, das sub-amostras lavadas, somente as massas de cinzas do material vegetal e das sub-amostras não lavadas as massas de cinzas do material vegetal mais terra.

A partir das massas de cinza e cinza mais terra foram obtidas as porcentagens respectivas com base na massa da sub-amostra antes de serem levadas para queima em mufla.

A Equação 6 foi utilizada para a determinação da porcentagem de cinzas lavadas.

$$CPL(\%) = \frac{PCL}{PPL} \cdot 100 \quad (6)$$

Onde:

CPL = porcentagem de cinza de palhiço lavado;

PCL = massa da cinza de palhiço moído e lavado;

PPL = massa seca de palhiço moído e lavado.

Figura 13 - (A) Amostras do palhiço lavado e secando no chão, ao Sol; (B) Palhiço sendo moído no moinho; (C) Palhiço moído coletado; (D) Palhiço moído identificado.

A Equação 7 foi utilizada para a determinação da porcentagem de cinza não lavada.

$$CPN(\%) = \frac{PCN}{PPN} \cdot 100 \quad (7)$$

Onde:

- CPN = porcentagem de cinza de palhiço não lavado;
- PCN = massa da cinza de palhiço moído e não lavado;
- PPN = massa seca de palhiço moído e não lavado.

Figura 14 - (A) Cadinhos, com palhiço moído, na mufla após 4 horas; (B) Cadinho e cinzas após esfriarem em dessecador.

Para a determinação da porcentagem de terra aderida às folhas subtraiu-se a porcentagem de cinza de palha lavada da porcentagem de cinza de palha não lavada conforme a Equação 8:

$$IT (\%) = CPN(\%) - CPL(\%) \quad (8)$$

Onde:

- IT = índice de terra aderida ao palhiço;
- CPN = porcentagem de cinza de palhiço não lavado;
- CPL = porcentagem de cinza de palhiço lavado.

O fluxograma da Figura 15 se refere à seqüência de etapas para se chegar às porcentagens de cinza de palhiço lavado e cinza mais terra (palhiço não lavado).

3.2.6 Avaliação das capacidades efetivas

A metodologia básica adotada para esta determinação, para as enfardadoras, foi proposta por Mialhe (1974) que leva em consideração a Capacidade Efetiva como parâmetro principal. No presente estudo, utilizou-se dessa metodologia para se obter esse parâmetro nas unidades de “massa de

palhiço enfardado por unidade de tempo”, “área de palhiço enfardado por unidade de tempo”.

No caso do ancinho enleirador, através de mesma metodologia, obteve-se parâmetros de desempenho em termos de “massa de palhiço enleirado por unidade de tempo”.

3.2.7 Eficiência energética

A eficiência energética foi determinada para as três operações de enleiramento: simples, duplo e triplo e para as três operações de enleiramento mais o enfardamento. A metodologia de cálculo seguiu a equação 4 do item 2.3, proposta por Rípoli (1991), para o cálculo da eficiência energética no recolhimento de palhiço com base no consumo de combustível e potencial energético do palhiço.

3.2.8 Análise estatística

A unidade experimental ou parcela empregada foi o fardo de palhiço de cana-de-açúcar, representando uma repetição. Foram realizados três tratamentos, casualizadamente, distribuídos dentro de uma área onde uma dada variedade de cana-de-açúcar foi colhida num mesmo dia. Do total de fardos obtidos, quatro de cada tratamento foram, casualizadamente, escolhidos para análise de terra. A análise estatística realizada considerou o experimento como inteiramente casualizado e comparou a diferença entre as médias para as variáveis obtidas através de teste de Tukey e os intervalos de confiança foram obtidos ao nível de 5% de significância, segundo Pimentel Gomes (2000). Para os cálculos foi utilizado o programa SAS®.

Figura 15 - Fluxograma da determinação por cinzas da terra aderida ao palhiço.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos dados primários obtidos no campo e em laboratório, apresenta-se, a seguir, os resultados numéricos das variáveis estudadas e das análises estatísticas correspondentes, com as conseqüentes discussões.

4.1 Caracterização do palhiço

O palhiço remanescente amostrado apresentou como médias de seus constituintes os valores mostrados na Tabela 14, para uma produtividade média de colmos industrializáveis de 78,00 t.ha⁻¹.

Tabela 14. Caracterização dos constituintes do palhiço existente sobre o terreno e sua estimativa da produtividade, antes da operação de enleiramento.

Repetições	IF (%)	IC (%)	IPo (%)	IM (%)	PE (t.ha ⁻¹)	U (%)
Médias	69,93	21,44	2,27	6,36	27,01	22,80
DP	3,66	4,67	1,44	4,31	8,80	7,02
CV	0,05	0,22	0,63	0,68	0,33	0,31
Ic	[68,08; 71,78]	[19,08; 23,80]	[1,54; 3,00]	[4,18; 8,54]	[22,56; 31,46]	[19,25; 26,35]

IF= índice de folhas; IC= índice de frações de colmos; IPo=índice de ponteiros; IM= índice de matéria estranha total; PE= produtividade estimada; U= umidade; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; Ic = intervalo de confiança ao nível de significância de 5%.

Verificou-se com base nos dados apresentados na Tabela 14 que a produtividade média estimada de palhiço foi de 27,01 t.ha⁻¹ com umidade de

22,80%, ou seja, um índice de palhiço de 34,63% em relação aos colmos industrializáveis na área estudada. Com base em matéria seca a produtividade estimada de palhiço foi 20,85 t.ha⁻¹ ou índice de palhiço de 26,73%. Este dado é confirmado por Ripoli et al. (1990) que estudaram as variedades de cana-de-açúcar SP70-1248, SP70-6163 e SP70-1143, diferentes da variedade deste estudo e concluíram que o palhiço varia de 17,40% a 31,50%, em massa, em relação à quantidade de colmos industrializáveis, contidos em um canavial. Todavia, os dados de produtividade estimada deste trabalho foram superiores aos resultados médios encontrados por Ripoli et al. (1991) com a exceção da variedade SP71-1406, embora as umidades determinadas pelos autores tenham sido superiores a deste estudo. As produtividade de colmos também variaram em relação aos dados obtidos, como também os índices de palhiço.

Tabela 15. Valores médios da caracterização do palhiço e potencial energético segundo Ripoli et al. (1991).

Variáveis		SP70-1284	SP70-6163	SP70-1143	SP71-1406	NA5679
U	(%)	44,30	50,36	47,39	38,03	46,11
PE	(t.ha ⁻¹)	13,37	23,57	22,14	27,42	21,53
PA	(t.ha ⁻¹)	77,20	74,92	88,27	75,64	75,53
IP	(%)	17,00	32,00	25,00	36,00	30,00

U = umidade; PE = produtividade; PA = produtividade agrícola de colmos; IP = índice de palhiço.

Os valores obtidos neste trabalho são superiores aos encontrados por Abramo Filho et al. (1993) que determinaram uma produtividade para o palhiço de 21,30 t.ha⁻¹ com base em matéria úmida e 15,10 t.ha⁻¹ com base em matéria seca, na variedade SP71-6163. O valor encontrado em base úmida também foi superior ao encontrado por Walter (1993) que considera, para cada tonelada de cana limpa, 250 kg de biomassa na forma de pontas e folhas, o que

para o presente estudo deveria representar, em termos médios, uma produtividade de $19,50 \text{ t.ha}^{-1}$.

A estimativa da Copersucar (2001b) do potencial da biomassa com base na safra 1997/98 para São Paulo foi de $181,50.10^6 \text{ t}$ de colmos e um potencial de resíduos secos de $25,40.10^6 \text{ t}$, representando 13,90% de resíduos secos em relação aos colmos, valor portanto, inferior ao encontrado neste estudo.

Considerando-se toda a biomassa produzida, com base nas médias de produtividade de colmo e de palhiço, obteve-se o índice de 25,70% de palhiço, dado que é inferior ao obtido por Ripoli & Villanova (1992) que encontraram uma porcentagem média de palhiço equivalente a 32,00%.

Comparando-se os resultados com os de Ripoli et al. (1995) que estudaram duas variedades de cana-de-açúcar, SP 71 1406 com os resultados das massas dos constituintes do palhiço de: $8,02 \text{ t.ha}^{-1}$ de ponteiros, $16,87 \text{ t.ha}^{-1}$ de folhas verdes, $8,36 \text{ t.ha}^{-1}$ de palhas e índice de palhiço 25,00%, e a variedade SP 71 6163 com os resultados das massas dos constituintes do palhiço de: $5,07 \text{ t.ha}^{-1}$ de ponteiros, $12,64 \text{ t.ha}^{-1}$ de folhas verdes, $8,64 \text{ t.ha}^{-1}$ de palhas e Índice de palhiço 28,00%, constatou-se que a produtividade total estimada de folhas $18,89 \text{ t.ha}^{-1}$ e $0,61 \text{ t.ha}^{-1}$ de ponteiros, aqui obtidos aplicando-se os índices da Tabela 14 à produtividade estimada, foram inferiores aos apresentados pelos autores, porém o índice de palhiço de 34,60% foi superior ao apresentado.

A produtividade estimada de palhiço encontrada neste estudo foi inferior ao valor determinado por Molina Júnior et al. (1995) que encontraram para a variedade SP 70 6163 (2º e 3º cortes), no momento da colheita, valor médio de $33,85 \text{ t.ha}^{-1}$.

A variabilidade encontrada nas comparações com a bibliografia era esperada (Figura 16), pois o coeficiente de variação encontrado de 33,00% é muito alto (Pimentel Gomes, 2000) e revela a existência de uma variabilidade já determinada por Molina Júnior (1991), Ripoli (1991); Tillmann (1994) e Furlani

Neto (1995) que encontraram variabilidade referente ao número de colmos industrializáveis por metro linear numa fileira de plantio no momento da colheita dos canaviais. Ripoli et. al (1990) encontraram a variação de 17 a 31% em relação ao número de colmos industrializáveis em três variedades de cana-de-açúcar o que é confirmado por Walter (1993), que estabeleceu uma conexão direta entre a produção de colmos e palhiço.

Diferenças metodológicas, características varietais e o tempo decorrido entre a colheita mecanizada e a tomada das amostras, em cada um destes trabalhos, explicam a diferença de resultados obtidos neste trabalho e os apresentados na bibliografia, permitindo uma visualização da variabilidade na produtividade do palhiço conforme mostrado na figura 16.

Figura 16 – Produtividade do palhiço - Valor obtidos neste estudo e valores encontrados na bibliografia.

O índice de matéria estranha total (vegetal e terra) de 6,36% foi inferior ao encontrado por Abramo Filho et al. (1993) que estudaram os resíduos da colheita mecanizada de cana crua e encontraram 6,92% de terra junto à palha (90% de matéria orgânica e 6,8% de cinzas). O índice de matéria estranha total apresentou coeficiente de variação 68%, valor muito alto de acordo com Pimentel Gomes (2000), e é resultado da metodologia aplicada, das condições locais como tipo de solo e sua umidade, além do tipo de manejo

dos equipamentos. Deste modo a comparação apresentada foi somente para informação da ordem de grandeza dos valores.

4.2 Potencial energético

A Tabela 16 apresenta os valores médios das variáveis obtidas de poderes caloríficos e potencial energético das amostras de palhiço colhidas antes do enfardamento.

Tabela 16. Poderes caloríficos e umidade do palhiço.

Repetições	U (%)	PCS (MJ.kg ⁻¹)	PCI (MJ.kg ⁻¹)	PCU (MJ.kg ⁻¹)	PEP (GJ.ha ⁻¹)
Médias	22,80	18,43	17,00	12,94	342,48
DP	7,02	1,12	1,12	1,21	93,23
CV	0,31	0,06	0,07	0,09	0,27
Ic	[19,25; 26,35]	[17,87; 19,00]	[16,44; 17,57]	[12,33; 13,55]	[295,30; 389,66]

U = umidade; PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior; PCU = poder calorífico útil; PEP = potencial energético do palhiço; CV = coeficiente de variação; Ic = intervalo de confiança ao nível de significância de 5%.

Comparando-se o valor médio do poder calorífico Inferior (PCI) de 17,00 MJ.kg⁻¹ com umidade 22,80%, e os valores de PCI apresentados por Staniforth (1982), observa-se que o PCI (Tabela 16) foi superior ao apresentado pelo autor para a palha e madeira. Já o carvão e o óleo combustível foram superiores ao do palhiço. Utilizado-se dos valores de PCI fornecidos por Staniforth conclui-se que cada quilograma de palhiço, equivale a quantidade energia contida em 1,13 kg de madeira, 0,56 kg de carvão de boa qualidade e de 0,38 a 0,43 kg de óleo combustível. Considerando-se a produtividade de palhiço obtida neste estudo, pode-se estimar que um hectare de palhiço

apresenta um equivalente energético a 30,52 t de madeira, 15,16 t de carvão e de 11648,58 a 10104,17 L de óleo combustível, segundo Mialhe (1974).

Os valores médios do PCI e PCU determinados neste trabalho (Tabela 16) confirmam os obtidos por Molina Júnior et al. (1995), que encontraram, para o palhico de cana-de-açúcar (variedade SP706163), os PCI 16,67 ($\pm 3,34$) MJ.kg⁻¹ e PCU da ordem de 12,52 ($\pm 4,59$) MJ.kg⁻¹. Os autores também obtiveram, para um hectare de canavial, a energia equivalente 7626,53 litros de óleo diesel, ou 67,08 t de madeira, que diferiram dos deste estudo em função da grande variabilidade anteriormente discutida para a produtividade do palhico, como também diferentes referências de poderes caloríficos dos materiais encontrados na bibliografia.

Comparando-se as médias dos valores obtidos de PCS da Tabela 16 com os obtidos por Furlani Neto et al. (1997) para as variedades SP71-1406 e SP71-6163 os respectivos valores de 18,27 e 18,67 MJ.kg⁻¹. Verifica-se que os valores são muito próximos do mostrado na Tabela 16, apesar das condições de campo terem sido diferentes.

A média dos resultados de PCI (Tabela 16) determinados neste trabalho foram bastante próximos aos apresentados por AIT-ECC¹ de 17,41 MJ.kg⁻¹ e USAID² de 15,81 MJ.kg⁻¹.

A Figura 17 resume alguns resultados PCI, encontrados na bibliografia e o obtido neste estudo e, conforme pode ser observado, os valores são todos muito próximos, o que caracteriza o poder calorífico inferior como uma característica do palhico de cana-de-açúcar independente da variedade.

¹ AIT-ECC. **Evaluation and selection of ligno-cellulose wastes which can be converted into substitute fuels**. Project submitted to EEC, Belgium. 1983. s.ed., 1983. 1v.

¹¹ USAID. **Baling sugarcane tops and leaves: the Tai experience**. s.l.: USAID, 1989. 1v.

Figura 17 – PCI. Resultados obtidos neste estudo e em algumas bibliografias consultadas.

Furlani Neto et al. (1997) determinaram que o potencial energético total do palhço é uma função varietal. A esta afirmação podem-se complementar explicações anteriores com relação à variabilidade da produtividade do palhço, o que reflete diretamente na estimativa do potencial energético. Estes fatores que explicam as grandes diferenças encontradas entre o valor determinado neste estudo e o de Ripoli et al. (1991) de 191,69 GJ.ha⁻¹, de Molina Júnior et al. (1995) de 53,88 GJ.ha⁻¹, de Furlani Neto (1997) de 247,15 e 474,42 GJ.ha⁻¹, impossibilitando a comparação entre resultados conforme pode ser observado na Figura 18.

O valor médio do potencial energético do palhço (Tabela 16) pode ser considerado em termos de equivalente barril de petróleo.ha⁻¹ (EBP.ha⁻¹), valendo-se da quantidade de energia contida em um barril de petróleo de cerca de 6,3.10⁹J de acordo com Odum (1988). Estimou-se valor médio da ordem de 55,4 EBP.ha⁻¹ (máximo de 79,61 e mínimo de 32,13) com coeficiente de variação de 27,22%.

Este valor é superior ao de 11,22 EBP por hectare encontrado por Ripoli (2002) que estudou o mapeamento de palhço enfardado de cana-de-açúcar e do seu potencial energético através de GPS, pois, na metodologia

empregada por Ripoli a quantidade de palhiço empregada foi a do palhiço enfardado e não representou a quantidade total de palhiço da área. Comparando-se o valor obtido neste trabalho com o de Ripoli (1991), ou seja, de 30,89 EBP.ha⁻¹ de palhiço, os valores diferiram, fato explicado pela grande variabilidade da produtividade estimada.

Figura 18 – Potencial energético do palhiço. Valores obtidos neste estudo e em algumas bibliografias consultadas.

4.3 Parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética da operação de enleiramento.

A Tabela 17 mostra os resultados médios de alguns parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética, referente aos tratamentos de enleiramentos simples, duplo e triplo, obtidos neste estudo. A análise da Tabela 17 mostra que com a exceção da capacidade efetiva (CE), na comparação das médias dos tratamentos duplo e triplo, todas as outras diferiram significativamente ao nível de 5%.

Tabela 17. Parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética da operação de enleiramento.

Variáveis	Simplex	Enleiramentos Duplo	Tripla
CE (t.h⁻¹)			
Média	83,06 A	65,53 C	69,17 BC
CV	0,04	0,10	0,03
lc	[81,16; 84,96]	[62,31; 68,75]	[68,03; 70,31]
CCa (L.ha⁻¹)			
Média	4,74 C	5,59 B	6,37 A
CV	0,04	0,10	0,03
lc	[4,63; 4,85]	[5,31; 5,87]	[6,27; 6,47]
CCm (L.t⁻¹)			
Média	0,18 C	0,21 B	0,24 A
CV	0,04	0,10	0,03
lc	[0,18; 0,18]	[0,20; 0,22]	[0,24; 0,24]
BE (%)			
Média	99,95 A	99,94 B	99,93 C
CV	0,000	0,000	0,000
lc	[99,949; 99,951]	[99,938; 99,944]	[99,931; 99,933]

Médias seguidas com letras distintas diferem entre si ao nível de 5% de significância.

CE = capacidade efetiva; Cca = consumo de combustível por hectare; CCm = consumo de combustível por tonelada; BE = eficiência energética; CV = coeficiente de variação; lc = intervalo de confiança ao nível de significância de 5%.

O enleiramento simples foi o que apresentou a maior capacidade efetiva neste estudo, sendo 27,75% superior a do enleiramento duplo e 20,08% que a do enleiramento tripla. Embora as metodologias empregadas sejam diferentes, como também as condições gerais de campo e os sistemas empregados, os valores obtidos de capacidades efetivas deste trabalho podem ser comparados com as de Ripoli (1991) para estabelecimento de ordem de grandeza. Para a comparação é necessária a transformação dos resultados aplicando-se a produtividade estimada (PE) da Tabela 1, obtendo-se deste modo para os enleiramentos simples, duplo e tripla os respectivos valores de 3,08, 2,45 e 2,56 ha.h⁻¹. Estes valores são superiores aos determinados por Ripoli (1991) de 1,67 e 1,79 ha.h⁻¹.

O consumo médio horário de combustível (CCm) em $L.h^{-1}$ foram inferiores aos apresentados por Ripoli (1991) de 8,37 e 7,32 $L.h^{-1}$, como também os consumos (CCa) em $L.t^{-1}$ foram menores que 0,40 $L.t^{-1}$ para as três formas de enleiramento apresentadas neste estudo. As diferenças acima devem ser observadas somente quanto à ordem de grandeza e também com relação à metodologia e sistemas empregados distintos que apresentam uma grande dependência das fontes de potência utilizadas e em condições de campo diferentes das deste trabalho.

Não foi encontrado na bibliografia disponível e pesquisada valor de eficiência energética para ancinhos enleiradores.

4.4 Parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética da operação de enfardamento.

A Tabela 18 mostra os resultados médios das massa específicas dos fardos, capacidades efetivas, consumo horário de combustível e por tonelada de palhiço, eficiências energéticas no enleiramento, enfardamento e na somatória das duas operações, além das comparações entre médias obtidas com a aplicação do teste de Tukey ao nível de significância de 5%.

A partir das comparações verifica-se que para a massa específica dos fardos (DF), as médias diferiram entre si significativamente para os tratamentos de enleiramentos simples-triplo e duplo-triplo. Para a capacidade efetiva CE ($t.h^{-1}$) a comparação foi significativamente diferente para as médias dos tratamentos de enleiramento simples-triplo. Para a capacidade efetiva CE ($ha.h^{-1}$) as médias diferiram significativamente para os tratamentos de enleiramentos simples-triplo e duplo-triplo. As comparações entre as médias dos três tratamentos de enleiramentos não diferiram significativamente para as variáveis CCm ($L.t^{-1}$), MPf ($t.ha^{-1}$) e MPr ($t.ha^{-1}$). O consumo de combustível em $L.h^{-1}$ mostrou-se significativamente diferente na comparação entre as médias dos três tratamentos. A eficiência energética (BE) e eficiência energética total

(BT) apresentaram diferenças significativas nas comparações entre médias somente para os tratamentos de enleiramentos duplo-triplo.

Com base nos dados da Tabela 18 verifica-se que as massas específicas médias dos fardos (DF) encontradas neste trabalho foram superiores aos valores encontrados por Ripoli (1991) que obteve as massas específicas de 141,94 kg.m⁻³ e 104,63 kg.m⁻³ para palhiço a granel, Howe & Sreesankon³ que encontraram valores de 99,60 e 146,90 kg.m⁻³ e COPERSUCAR (1998b) para as enfardadoras JS-90, ROL-1518 e NH-570 operando sobre palhiço enleirado e massas específicas respectivas dos fardos de 118,00, 94,70 e 112,00 kg.m⁻³. Outro ensaio do mesmo autor, COPERSUCAR (1998a), determinou a massa específica média de 138,50 kg.m⁻³ para os fardos obtidos com uma enfardadora Claas 1200 e a massa específica média de 245 kg.m⁻³ com uma enfardadora Case 8575. Somente a massa específica média dos fardos obtidos com a enfardadora Case 8575 foi maior que os valores determinados neste estudo.

A vantagem de obtenção de fardos com massas específicas maiores é a economia do volume ocupado no transporte e no armazenamento, a facilidade de manejo e maior resistência às intempéries. A Figura 20 mostra os valores de massas específicas deste trabalho e os valores encontrados na bibliografia.

Tabela 18 . Parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética das operações de enfardamento.

Variáveis	Enfardamentos		
	Simple	Duplo	Triplo
DF (kg.m⁻³)			
Média	206,67 C	207,31 BC	221,11 A
CV	0,03	0,007	0,03
IC	[201,26; 212,48]	[200,20; 214,42]	[219,43; 227,50]

³ HOWE, R.; SREESANGKOM, P. **Costs and performance of equipments for baling sugar cane tops and leaves**. S.I. United States Agency of International Development, 1990. p.56

Tabela 18 . Parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética da operação de enfardamento.

Variáveis	Simple	Enfardamentos	
		Duplo	Triplo
CE (t.h⁻¹)			
Média	10,78 C	16,29 BC	20,29 AB
CV	0,50	0,30	0,27
IC	[6,04; 4,74]	[13,85; 18,74]	[16,54; 24,04]
CE (ha.h⁻¹)			
Média	1,45 C	1,99 BC	2,91 A
CV	0,28	0,42	0,36
IC	[1,09; 1,81]	[1,57; 2,41]	[2,18; 3,64]
CCh (L.h⁻¹)			
Média	13,39 C	23,65 B	30,35 A
CV	0,28	0,42	0,65
IC	[9,63; 17,15]	[18,68; 28,62]	[16,68; 44,02]
CCm (L.t⁻¹)			
Média	1,37 A	1,49 A	1,40 A
CV	0,28	0,34	0,51
IC	[1,03; 1,71]	[1,23; 1,75]	[0,90; 1,90]
MPf (t.ha⁻¹)			
Média	7,19 A	8,85 A	7,24 A
CV	0,30	0,33	0,16
IC	[5,32; 9,06]	[7,37; 10,33]	[6,44; 8,04]
MPr (t.ha⁻¹)			
Média	19,81 A	18,16 A	19,77 A
CV	0,11	0,16	0,06
IC	[17,94; 21,68]	[16,68; 19,64]	[18,97; 20,57]
BE (%)			
Média	99,61 BC	99,77 AB	99,60 C
CV	0,001	0,001	0,002
IC	[99,51; 99,71]	[99,73; 99,81]	[99,456; 99,74]
BT (%)			
Média	99,56 BC	99,71 AB	99,53 C
CV	0,001	0,001	0,002
IC	[99,46; 99,66]	[99,67; 99,75]	[99,39; 99,67]

Médias seguidas com letras distintas diferem entre si ao nível de 5% de significância; DF = massa específica; CE = capacidade efetiva; Cch = consumo horário de combustível; CCm = consumo de combustível por tonelada; MPf = massa estimada de palhico enfardado; MPr = massa estimada de palhico remanescente; BE = eficiência energética; BT = eficiência energética do enleiramento e enfardamento; CV = coeficiente de variação; Ic = intervalo de confiança ao nível de significância de 5%.

Figura 19 – Massa específica dos fardos. Valores obtidos neste estudo e em algumas bibliografias consultadas.

Com respeito às capacidades das enfardadoras, os valores determinados neste estudo indicam que o tratamento de enleiramento triplo proporcionou uma maior capacidade efetiva à operação de enfardamento, seguido do tratamento de enleiramento duplo e finalmente o enleiramento simples. Este fato pode ser confirmado pela COPERSUCAR (1998b) que em ensaios de enfardamentos, com e sem enleiramentos, obteve maiores capacidades efetivas para os tratamentos com enleiramento. Ainda a COPERSUCAR (2001b) determinou que a eficiência de enfardamento de palhço disposto em leiras duplas foi de 84% em relação ao material disposto em leiras simples. As referências de capacidades efetivas encontradas na bibliografia são de sistemas diferentes, portanto difíceis de serem comparados, especialmente pelas máquinas serem de diferentes modelos e fabricantes. As comparações a seguir estabelecem apenas uma ordem de grandeza entre os resultados obtidos neste trabalho os valores encontrados na bibliografia pesquisada. Os resultados de capacidades efetivas da COPERSUCAR (1998b) de 1,80, 2,70 e 9,00 t.h⁻¹ e Howe & Sreesankon (1990) de 2,21 e 2,49 t.h⁻¹ foram inferiores aos apresentados na Tabela 18, levando-se em consideração o tratamento de enleiramento simples da Tabela 18. Os valores apresentados

pela COPERSUCAR (1998a) de 11,40 e 22,0 t.h⁻¹ foram inferiores aos tratamentos de enleiramentos duplo e triplo deste estudo, respectivamente.

A eficiência energética positiva mais alta neste trabalho, considerando-se somente o enfardamento e o enleiramento mais enfardamento foi do tratamento de enleiramento duplo, o que representa a melhor relação entre a energia disponível no palhiço e a energia equivalente do combustível utilizado. É desejável que a eficiência energética seja positivo e o mais alto possível, para que o recolhimento do palhiço seja tecnicamente viável.

As eficiências energéticas não foram determinadas por Molina Júnior et al. (1995), porém podem ser estimadas a partir dos dados, por estes determinados, em 99,01% e 98,65%, utilizando-se da equação proposta por Ripoli (1991). Estes valores são menores que os apresentados neste estudo, pois segundo os autores, em suas conclusões, a fonte de potência utilizada não era adequada à enfardadora.

As massas estimadas de palhiço enfardado (MPf) determinadas neste estudo (Tabela 18) foram inferiores as apresentadas por Howe & Sreesangkom (1990) citados por Molina Júnior (1991) para enfardadoras de fardos prismáticos 10,06 t.ha⁻¹ e fardos cilíndricos de 8,63 t.ha⁻¹, com a exceção para o tratamento duplo que foi superior ao apresentado pela enfardadora de fardos cilíndricos. A massa de palhiço remanescente (MPr) determinada neste trabalho pode ser comparada com os dados obtidos pelos autores de forma indireta, visto estes terem calculado a porcentagem de resíduos recolhidos, foi possível estimar a massa de palhiço não enfardado em 2,84 t.ha⁻¹ para a enfardadora de fardos prismáticos e 3,53 t.ha⁻¹ para a enfardadora de fardos cilíndricos. Estes valores de palhiço remanescente determinados são inferiores aos mostrados na Tabela 18. Os valores das massas de palhiço enfardado (MPf) são próximas ao resultado obtido por Ripoli (2002), que estudou o mapeamento de palhiço enfardado com enfardadoras cilíndricas e prismáticas, dez dias após a colheita mecanizada de cana-de-

açúcar, obtendo 42 fardos e, como média geral de palhiço enfardado, de 8,79 t.ha⁻¹, com coeficiente de variação de 30,03%.

O autor também conclui que a variabilidade espacial do palhiço é muito grande e que requer muito cuidado nas amostragens de determinação de produtividade. Além da grande variabilidade do palhiço, as diferenças entre as massas de palhiço enfardado (MPf, Figura 21) e remanescente (MP_r) devem-se ao processo de enleiramento e enfardamento. Nas operações de enleiramento, neste estudo, a regulagem do equipamento foi realizada de modo a não revolver o solo, restando deste modo palhiço não enleirado após a passagem do ancinho, especialmente nas partes mais baixas devido ao micro relevo. Outro aspecto é quanto ao órgão recolhedor da enfardadora, que foi regulado de forma a não tocar no solo, portanto nem todo palhiço enleirado foi recolhido. Regulagens buscando enleirar e enfardar maior quantidade de palhiço resultarão também em maior quantidade de terra nos fardos, o que é indesejável se o objetivo for para utilização nas fornalhas das caldeiras para produção de energia. Diferenças também podem ocorrer em função de diferenças metodológicas como tempo decorrido após a colheita mecanizada, condições locais e meteorológicas.

Figura 20 – Massa de palhiço enfardado. Valores obtidos neste estudo e em algumas bibliografias consultadas.

4.5 Análise de terra

Os resultados médios das quantidades de terra existentes nos fardos resultantes dos tratamentos efetuados encontram-se na Tabela 19.

Tabela 19 . Quantidades de terra nos fardos (%).

Variáveis	Enfardamentos		
	Simple	Duplo	Triplo
MTs			
Média	3,15 A	3,58 A	3,97 A
CV	1,92	1,83	1,83
IC	[2,54; 3,76]	[3,07; 4,09]	[3,51; 4,43]
MTI			
Média	2,56 AB	2,73 A	2,44 B
CV	0,05	0,05	0,06
IC	[2,46; 2,66]	[2,63; 2,83]	[2,33; 2,55]
MTf			
Média	5,71 A	6,31 A	6,41 A
CV	0,32	0,30	0,29
Ic	[4,43; 6,99]	[4,99; 7,63]	[5,13; 7,69]

Médias seguidas com letras distintas diferem entre si ao nível de 5% de significância. MTs = massa de terra solta no fardo; MTI = Massa de terra aderida ao palhiço; MTf = massa de terra total no fardo; CV = coeficiente de variação; Ic = intervalo de confiança ao nível de significância de 5%.

As médias de terra solta no fardo (MTs) e terra no fardo (MTf) não diferiram entre si ao nível de 5% de significância, com a aplicação do teste de Tukey, conforme pode ser observado na Tabela 19. As médias das massas de terra aderida ao palhiço (MTI) comparadas, não diferiram entre si ao nível de 5% de significância nos tratamentos simples e duplo e nos tratamentos simples e triplo. Houve diferença na comparação das médias para os tratamentos duplo e triplo.

O enleiramento do palhiço acarreta uma maior porcentagem de terra no fardo, fato este observado nos resultados de COPERSUCAR (1998b) que fez determinações com e sem enleiramento. Confirmando esta observação as porcentagens de terra determinadas (MTf, Tabela19) , foram crescentes com o maior revolvimento do palhiço ocasionado pelos três diferentes tratamentos. A

maior quantidade de terra foi a encontrada no tratamento de enleiramento triplo, um valor menor no tratamento de enleiramento duplo e, ainda, menor no enleiramento simples.

As quantidades médias de terra solta (MTs) apresentadas na Tabela 19 foram inferiores aos valores determinados para os fardos obtidos com palhiço enleirado e apresentados pela COPERSUCAR (1998b) de 5,60% para enfardadora JS-90 e 6,20% para a ROL-1518. Comparadas com as quantidades de terra dos fardos obtidos pela COPERSUCAR (1998b) de 2,80% para enfardadora JS-90 e 2,30% para a ROL-1518 sem enleiramento, os valores médios das quantidades de terra determinadas neste estudo foram superiores. Os valores de terra total nos fardos (MTf) da Tabela 19, apresentam-se bastante próximos aos valores determinados pelo autor, com o enleiramento do palhiço antes do enfardamento.

As quantidades médias de terra no fardo (MTf) determinadas na Tabela 19 foram aproximadas aos valores obtidos por Abramo Filho et al. (1993) que estudaram os resíduos da colheita mecanizada de cana crua e encontraram 6,92% de terra junto ao palhiço.

O valor encontrado de terra foi inferior ao valor obtido por Ripoli (1991) de 12,28% de terra, que foi carregada com o palhiço. Este resultado, possivelmente deu-se pela forma de carregamento a granel utilizada, por meio de uma carregadora de cana.

A figura 22 mostra a comparação entre os valores obtidos neste estudo e os valores da bibliografia, embora as metodologias empregadas sejam diferentes, como também as condições gerais de campo e os sistemas empregados, os valores obtidos apresentam ordem de grandeza semelhante.

Figura 21 – Porcentagem de terra no fardo. Valores obtidos neste estudo e em algumas bibliografias consultadas.

Os valores de terra aderida ao palhiço, conforme a Tabela 19, se aproximam do valor encontrado de 3,40%, de cinzas minerais no bagaço de cana-de-açúcar, por Cerri et al. (1988).

As médias de terra aderida ao palhiço, apresentadas na Tabela 19, foram obtidas através de cinzas, e os valores são próximos dos valores de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar de autores citados por Koopmans & Koppejan (1997) de 2,00% ,3,20% e 3,90%, com a exceção do valor de 10,00 a 12,00%.

5 CONCLUSÕES

Com base nas tabulações dos valores obtidos no campo e em laboratório e na análise estatística efetuada, pode-se concluir que:

- 2 a retirada de palhiço, por meio de ancinho enleirador e enfardadora prismática, é viável do ponto de vista operacional e de eficiência energética;
- 2 a produtividade média estimada de palhiço, antes das operações de enleiramento, apresentou uma grande variabilidade;
- 2 o enleiramento simples apresentou os melhores resultados, com a maior capacidade efetiva média, as menores médias de consumo de combustível em $L \cdot ha^{-1}$ e $L \cdot t^{-1}$, e média da eficiência energética positiva mais alta;
- 2 os fardos obtidos no enleiramento triplo apresentaram a maior massa específica média;
- 2 as medias das massas de terra solta no fardo e de terra no fardo aumentaram com enleiramentos sucessivos, de forma que o enleiramento triplo resultou em maiores quantidades de terra nos fardo;
- 2 a operação de enfardamento sobre o enleiramento triplo foi o que obteve os melhores resultados, apresentando as maiores capacidades efetivas médias em $t \cdot h^{-1}$ e $ha \cdot h^{-1}$ e o menor consumo de combustível por tonelada de palhiço enfardado em $L \cdot t^{-1}$.
- 2 a alta eficiência energética nas operações de enleiramento, de enfardamento e na combinação de ambas, indicam que seja tecnicamente viável o recolhimento do palhiço.

RERERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMO FILHO, J.; MATSUOCA, S.; SPERANDIO, M. L.; MARCHETI, L. L.; RODRIGUES, R. C. D. Resíduo da colheita mecanizada de colheita de cana crua. **Açúcar & Alcool**, v.67, n.2, p.23-25, 1993.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Agricultural machinery management data D497**. St. Joseph, 1992. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Carvão vegetal: determinação do poder calorífico – método de determinação**; NBR 8633. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Coordenadoria de Agroenergia. **Proposta de utilização energética de florestas e resíduos agrícolas**. Brasília, 1984. 166 p.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Efeito estufa e a convenção sobre mudança no clima**. Brasília, 1999. 7p.

BRITO, S.S. Energia de biomassa: Uma alternativa para os trópicos. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE ENERGIA, 3., Guatemala, 1986. **Anais**. São Paulo: CONFEEA-CREA, 1986. p.1-20.

CARVALHO, G. J.; ANDRADE, L. A. B.; ANJOS, I. A.; FIGUEIREDO, P. A. M. Efeitos de restos culturais da colheita, com e sem queima prévia, na rebrota e rendimentos de soqueiras de cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.15, n.1, p.27, set./out. 1996.

CASTRO, M. A luz que vem da cana. **Jornal da Cana**, n.91, p.38-39, jul. 2001.

CERRI, C.C.; POLO, A.; ANDREUX, F.; LOBO, M.C.; EDUARDO, P.E. Resíduos orgânicos da agroindústria canavieira: 1. características físicas e químicas. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.6, n.3, p.34-37, jan./fev. 1988.

COCK, J.; BRICEÑO, C.O.; TORRES, J. Energy from cane trash in Colombia. **International Cane Energy News**, p.6, Apr. 2000.

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA,AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO - PROJETO BRA/96/G31. Enfardamento da palha. In: PROJETO BRA/96/G31: Geração de Energia por biomassa, bagaço da cana-de-açúcar e resíduos. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.16, n.6, p.44-46, jul./ago. 1998a.

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA,AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO - PROJETO BRA/96/G31. Impactos ambientais do uso em larga escala de sistemas BIG-GT na indústria da cana-de-açúcar. In: PROJETO BRA/96/G31: Geração de Energia por biomassa, bagaço da cana-de-açúcar e resíduos. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.16, n.5, p.36-39, maio/jun. 1998b.

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA,AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO - PROJETO BRA/96/G31. Conservação do Solo. **Cenbio Noticias**, v.4, n.12, 2001. <http://www.cenbio.org.br/index1.htm>. (05 nov. 2001a).

COPERSUCAR - PROJETO BRA/96/G31. Disponibilidade da palha de cana de açúcar. **Cenbio Noticias**, v.4, n.12, 2001. <http://www.cenbio.org.br/index1.htm>. (05 nov. 2001b).

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA,AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO - PROJETO BRA/96/G31. Efeito agrônômico da palha remanescente de canaviais colhidos mecanicamente sem a utilização da queimada. **Cenbio Noticias**, v.4, n.12, 2001. <http://www.cenbio.org.br/index1.htm>. (05 nov. 2001c).

DOAT, J. Le pouvoir calorifique des bois tropical. **Bois et Forêts des Tropiques**, v.172, p.33-55, Mar./Avr. 1977.

ENERGIA elétrica reforça receita das usinas. **Jornal de Piracicaba**, 01 jun. 2000. p.4

FNP CONSULTORIA & Comércio. **AGRIANUAL 2003**: anuário de agricultura brasileira. São Paulo, 2003. p.272-273: Cana-de-açúcar.

FURLANINETO, V. L. Colhedora de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): avaliação em canaviais com sem queima prévia. Piracicaba, 1995. 110p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

- FURLANI NETO, V. L.; RIPOLI, T.C.; VILLANOVA, N. A. Biomassa de cana-de-açúcar: energia contida no palhiço remanescente de colheita mecânica. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.15, n.4, p.24-27, mar/abr. 1997.
- GADANHA JÚNIOR, C. D.; MOLIN, J. P.; COELHO, J. L. D.; YAHN, C. E.; TOMOMORI, S. M. A. W. Máquinas para colheita de produtos agrícolas: Máquinas para colheita de forragem para fenação. In: GADANHA JÚNIOR, C. D.; MOLIN, J. P.; COELHO, J. L. D.; YAHN, C. E.; TOMOMORI, S. M. A. W. **Máquinas e implementos agrícolas do Brasil**. São Paulo: IPT, 1991. p.273-296.
- GOPINATH, S. Development of cane trash as alternative biomass fuel in India. In: REPSO – RENEWABLE ENERGY PROJECT SUPPORT OFFICE OF WINROCK INTERNATIONAL, New Delhi, 1998. **REPSO**. New Delhi: Indian-Sugar, 1998. p.321-327.
- GRAHAM, R. L. Biomass, energy, and environment. **Forest Ecology and Management**. v.94, n.1/3, p93-95, June 1997.
- HALL, D. O.; DE GROOT, P.J. Biomass for food or fuel: a world problem?. In: LOWENSTEIN, M. Z. **Energy applications of biomass**. Cambridge: Elsevier Applied Science, 1985. p.21-35.
- HOBSON, P. A.; DIXON, T. F.; HOGARTH, D. M. Gasification technology – prospects for large-scale, high-efficiency cogeneration in the Australian sugar industry. In: CONFERENCE OF THE AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 20., Balina, 1998. **Resumos** Balina: PK, 1998. p.1-9.

- JENKINS, B. M.; BAXTER, L. L.; MILES JUNIOR, T. R.; MILES, T. R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**. v.54, n.1/3, p.17-46, Mar. 1998.
- KOOPMANS, A.; KOPPEJAN, J. Agricultural and forest residues: Generation, utilization a availabability. In: REGIONAL CONSULATION ON MODERN APPLICATIONS OF BIOMASS ENERGY, Kuala Lapur, 1997. **Paper**. Kuala Lapur: FAO, 1997. 23p.
- MAGALHÃES, P. S. G.; BRAUNBECK, O. A. **Colheita de cana-de-açúcar verde:** energia renovável para uma agricultura sustentável. <http://www1.agrobrasil.com.br/agroartigos/artigo9.html>. (03 nov. 2001).
- MANECHINI, C. The impact of cane trash on weed control. **International Cane Energy News**, p.7-9, Apr. 2000.
- MIALHE, L. G. Desempenho operacional da maquinaria agrícola. In: MIALHE, L. G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Ceres, 1974. p.117-126.
- MIALHE, L. G. Combustão e combustíveis. In: MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura**. São Paulo: Ceres, 1980. cap.9, p.187-212.
- MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas:** ensaios & certificação. Piracicaba: FEALQ, 1996. 722p.
- MOLINA JÚNIOR, W.F. Enfardamento de resíduo de colheita de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): avaliação dos desempenhos operacional e econômico. Piracicaba, 1991. 101p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

MOLINA JÚNIOR, W.F.; RIPOLI, T. C.; COELHO, J. L. D.; BRITO, J. O. Energia Potencial da biomassa não industrializável de canaviais para emprego como combustível. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA 24., Viçosa, 1995. **Resumos**. Viçosa: SBEA, 1995. p.142.

MOLINA JÚNIOR, 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. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.13, n.5, p.28-31, maio/jun. 1995.

ODUM, H. T. Combustíveis e eletricidade. In: ODUM, H. T. **Curso de ecossistemas e políticas públicas**. <http://www.unicamp.br/fea/otega/eco/juri26.htm> (21 out. 2002).

PERES, S. Biomassa como vocação. **Noticias Cenbio**, v.1, n.2 , 2001. <http://www.cenbio.org.br/index1.htm>. (05 nov. 2001).

PINTO, L. A. R. Aproveitamento do bagaço e da palha de cana-de-açúcar em programas energéticos comunitários **Açúcar & Álcool**, n.63, p.34-37, jul/ago. 1992.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. Piracicaba: F. Pimentel Gomes, 2000. 477p.

RIPOLI, M. L. C. Mapeamento do palhiço enfardado de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) e do seu potencial energético. Piracicaba, 2002. 91p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

RIPOLI, T. C. Utilização do material remanescente da colheita da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): Equacionamento dos balanços energético e econômico. Piracicaba, 1991. 150p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

RIPOLI, T.C.; VILLANOVA, N. A. Colheita de cana-de-açúcar: novos desafios. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.11, n.1, p.28-31, set./out. 1992.

RIPOLI, T.C.; MOLINA JÚNIOR., W.F.; RIPOLI, M.L.C. Energetic potential of the sugar cane biomass in Brazil. **Rivista di Ingegneria Agraria**, v.31, n.1, p.1-7, Feb. 2000.

RIPOLI, T.C.; TILLMAN, C. A. C.; MILAN, M. O. O corte manual da cana verde. **Açúcar & Álcool**, n.77, p.28-30, dez/jan. 1994. 1995.

RIPOLI, T. C.; BALASTREIRE, L.A., MOLIN, J. P.; MOLINA JÚNIOR, W.F. Sugar cane biomass energy in Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 13., Morocco, 1998. **Anais**. Morocco: ICAE, 1998. v. 4, p.51-57.

RIPOLI, T. C.; DE LEON, M. J.; MOLINA JÚNIOR, W.F.; RIPOLI, M. L. C. Field testing of two green chopped sugar cane harvesters in Brazil. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, Sacramento, 2001. **Paper**. Sacramento: ASAE, 2001. 8p.

RIPOLI, T. C.; MOLINA JÚNIOR, W.F.; NOGUEIRA, M. C. S.; MATOS, J.R. Equivalente energético do palhico da cana-de-açucar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19., Piracicaba, 1990. **Anais**. Piracicaba: FEALQ, 1990. p.249-257.

RIPOLI, T. C.; MOLINA JÚNIOR, W.F.; STUPIELO, J.P.; NOGUEIRA, M.C. SACCOMANO, J. B. Potencial energético de residuos de cosecha de la caña verde. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.10, n.1, p.23-26, set./out. 1991.

SÃO PAULO (Estado). Leis, Decretos, etc. Lei nº 11241 de 19 de setembro de 2002. **Assessoria Técnico-Legislativa**, 19 de set. de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha de cana-de-açúcar e dá providências correlatas.

SANTISIRISOMBOON, J.; LIMMEECHOKCHAI, B.; CHUNGPAIBULPATANA, S. Impacts of biomass power generation and CO₂ taxation on electricity generation expansion planning and environmental emissions. **Energy Policy**, v.29, n.12, p.975-985, Oct. 2001.

SAYIGH, A. Biomass – Renewable energy – the way forward. **Fuel Processing Technology**, v.59, n.1, p.15-30, Apr. 1999.

SHUKLA G. L.; PRABHU, K. A.; SINGH, G. B; SOLOMONS, S. **Sugarcane: agro-industrial alternatives**. New Delhi: Oxford & IBH, 1995. p.157-170.

SRIVASTAVA, A. K.; GOERING, C.E.; ROHRBACH, R.P. Hay and Forage Harvesting. In: SRIVASTAVA, A. K.; GOERING, C.E.; ROHRBACH, R.P. **Engineering principles of agricultural machines**. Michigan: Pamela DeVore-Hansen, 1994. cap.8 p.326-406

STANIFORTH, A. R. Straw for fuel. In: STANIFORTH, A. R. **Straw for fuel, feed and fertilizer?** London: Farming, 1982. p.40-69.

STOUT, B.A.. Another Alternative: Energy from Agriculture. In: STOUT, B. A. **Energy use and management in agriculture**. New York: Breton, 1984. p.169-244.

TILLMANN, C. A. DA C. Avaliação de desempenho operacional e econômico de sistema de colheita semi-mecanizada em cana-de-açúcar, com e sem queima prévia. Piracicaba, 1994. 140p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Instituto de eletrotécnica e energia. **Banco de dados de biomassa no Brasil**: cana de açúcar no Brasil. <http://infoener.iee.usp.br/cenbio/biomassa.htm>. (09 jan. 2002).

WALTER, A C. S. Potencial energético da cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Alcool e Subprodutos**, v.11, n.4, p.29-34, mar/abr. 1993.

APÊNDICE

Tabela 20. Caracterização das amostragens de 1 m² do palhicho existente sobre o terreno, antes da operação de enleiramento.

Repetições	MA (kg)	MP (kg)	MC (kg)	ME (kg)	U (%)	PCS (MJ.kg ⁻¹)
1	2,694	0,033	0,675	0,202	26,09	17,08
2	2,094	0,023	0,391	0,304	23,02	18,19
3	2,294	0,053	0,445	0,074	23,92	18,86
4	4,194	0,075	1,047	0,223	30,90	17,60
5	4,094	0,027	0,935	0,140	27,48	18,53
6	3,794	0,184	0,942	0,124	34,43	19,47
7	1,294	0,026	0,323	0,071	15,01	20,01
8	1,894	0,036	0,432	0,077	16,03	18,98
9	2,194	0,120	0,331	0,089	22,09	17,51
10	1,894	0,026	0,538	0,073	19,47	18,34
11	3,394	0,065	0,882	0,202	13,88	17,51
12	2,294	0,051	0,423	0,271	12,87	17,29
13	3,494	0,017	0,421	0,554	19,87	17,21
14	2,494	0,078	0,561	0,036	21,94	18,88
15	2,394	0,087	0,375	0,135	34,99	20,90

MA = massa da amostra MP = massa de ponteiros; MC = massa de frações de colmos; ME = massa de matéria estranha; U = umidade; PCS = poder calorífico superior.

Tabela 21. Determinações volumétricas, temporais no tratamento de enleiramento simples.

Variáveis		
Velocidade média	(km.h ⁻¹)	8,6
Rotação do motor	(rpm)	2100
Marcha		3 ^a - média
Tempo de enleiramento	(s)	633
Tempo de deslocamentos e manobras	(s)	74
Consumo de combustível	(mL)	2560

Tabela 22. Larguras da área no tratamento de enleiramento simples equivalentes a de 6 leiras.

Repetições	LT (m)	LU (m)	LM (m)
1	26,8	21,80	3,63
2	27,82	23,16	3,86
3	26,4	21,77	3,63
4	26,2	21,68	3,61
5	26,25	20,52	3,42
6	27,3	21,99	3,67
7	27,1	22,96	3,83
8	26,9	22,33	3,72
9	26,6	21,89	3,65
10	26	20,90	3,48

LT = largura total da área; LU = largura útil da área; LM = largura média da faixa enleirada.

Tabela 23. Comprimentos da área no tratamento de enleiramento simples, em metros.

Repetições	CA
1	242,96
2	247,95
3	248,33
4	258,33
5	238,00

CA = comprimento da área.

Tabela 24. Determinações volumétricas, temporais e outras no tratamento de enleiramento duplo.

Variáveis		
Velocidade	(km.h ⁻¹)	8,6
Rotação do motor	(rpm)	2100
Marcha		3 - média
Tempo total	(s)	1687
Tempo de deslocamentos e manobras	(s)	39,4
Consumo de combustível	(mL)	5830

Tabela 25. Tempos dos ciclos operacionais (repetições) no tratamento de enleiramento duplo, em segundos.

Repetições	TE	TM
1	244	25
2	210	20
3	209	14
4	199	17
5	190	17
6	185	25
7	175	7
8	25	0

TE = tempo efetivo no enleiramento; TM = tempo de manobra no enleiramento.

Tabela 26. Larguras das áreas no tratamento de enleiramento duplo, em metros.

Repetições	LT	LE1	LE2	LE3	LE4	LE5	LE6	LE7
1	37,23	5,78	5,67	5,29	4,84	5,03	5,66	4,99
2	37,72	6,11	5,80	5,48	4,65	5,10	5,28	5,31
3	39,26	6,18	6,10	5,58	4,90	5,43	5,37	5,68
4	39,87	6,41	6,38	5,52	4,89	5,45	5,36	5,89
5	41,39	6,45	6,48	6,30	5,01	5,70	5,55	5,88
6	42,08	6,63	6,42	6,50	4,85	5,46	5,92	6,31
7	43,72	6,41	7,09	6,79	5,28	6,19	5,92	6,01
8	43,47	6,33	6,98	6,52	5,77	5,90	5,77	6,20
9	44,55	6,73	7,13	6,36	6,01	5,81	5,97	6,56
10	45,49	6,81	7,04	6,52	6,21	5,86	6,11	6,93
11	47,48	6,50	7,22	7,22	6,27	6,67	6,80	6,82
12	47,78	6,41	7,27	7,18	6,31	6,44	6,85	7,31
13	48,86	7,08	7,31	7,31	6,68	6,68	6,68	7,14
14	48,82	6,89	7,22	7,50	6,60	6,51	6,70	7,40
15	50,52	7,59	7,79	7,41	6,89	6,54	7,04	7,23

LT = largura total da área; LE = largura da faixa de enleiramento.

Tabela 27. Comprimento das áreas no tratamento de enleiramento duplo, em metros.

Repetições	CA
1	242,25
2	244,00
3	251,44
4	234,15
5	241,66

CA = comprimento da área.

Tabela 28. Determinações volumétricas, temporais e outras no tratamento de enleiramento triplo.

Variáveis		
Velocidade	(km.h ⁻¹)	8,5
Rotação do motor	(rpm)	2100
Marcha		3 ^a , média
Tempo total	(s)	651,81
Tempo de manobras e deslocamentos	(s)	
Consumo de combustível	(mL)	2780

Tabela 29. Larguras da área no tratamento de enleiramento triplo, em metros.

Repetições	LT	LE1	LE2
1	25,08	8,08	8,33
2	25,69	8,32	8,70
3	25,51	8,13	8,71
4	25,3	8,07	8,56
5	25,55	8,30	8,58
6	25,94	8,60	8,67
7	26,02	8,47	8,88
8	26,14	8,52	8,95
9	25,55	8,40	8,48
10	26,26	8,55	9,04
11	26,45	8,61	9,17
12	27,05	9,00	9,38
13	26,58	8,91	9,00
14	26,4	8,50	9,23
15	26,7	8,38	9,65

LT = largura total da área; LE = largura da faixa de enleiramento.

Tabela 30. Comprimento das áreas no tratamento de enleiramento triplo, em metros.

Repetições	CA
1	249,85
2	249,20
3	251,66
4	266,67
5	241,66

CA = comprimento da área.

Tabela 31. Tempos dos ciclos operacionais (repetições) no tratamento de enleiramento triplo, em segundos.

Repetições	TE	TM
1	413,08	17,95
2	200,78	20,00

TE = tempo efetivo no enleiramento; TM = tempo de manobra no enleiramento.

Tabela 32. Dimensões e massas dos fardos. Distâncias e tempos de enfardamento, por repetição no tratamento de enleiramento simples (S).

Repetições	CF (m)	LF (m)	HF (m)	MF (kg)	PF (m)	TF (s)
1S	2,16	0,81	0,90	334,5	142,2	207,4
2S	2,10	0,80	0,90	302,7	162,9	122,7
3S	2,10	0,80	0,90	301,9	148,1	172,4
4S	2,15	0,80	0,89	324,5	100,8	77,9
5S	2,13	0,80	0,90	322,2	88,0	64,8

CF = comprimento do fardo; LF = largura do fardo; HF = altura do fardo; MF = massa do fardo; PF = percurso de enfardamento; TF = tempo de enfardamento.

Tabela 33. Massa, em quilogramas, das amostras obtidas pela sonda da usina e das quantidades de terra obtidas por peneiramento no tratamento de enleiramento simples (S).

Repetições	MAs	MEp	MEb
3S1	2,077	0,139	0,056
3S2	2,370	0,184	0,083
4S1	1,502	0,092	0,043
4S2	0,722	0,026	0,011
5S1	2,182	0,204	0,159
5S2	1,577	0,111	0,047
6S1	2,171	0,144	0,063
6S2	1,677	0,235	0,129

MAs = massa da amostra da sonda; MEp = massa de matéria estranha obtida por meio de peneira de malha de 2,5 mm; MEB = massa de matéria estranha obtida por meio de bateria de peneiras.

Tabela 34. Massas, em quilogramas, das sub-amostras para determinação da umidade do palhico enfardado obtidas pela sonda da usina no tratamento de enleiramento simples (S).

Repetições	MU	MS
3S1	0,017	0,014
3S2	0,042	0,026
4S1	0,027	0,015
4S2	0,021	0,018
5S1	0,056	0,046
5S2	0,040	0,030
6S1	0,017	0,014
6S2	0,109	0,052

MU = massa em matéria úmida da sub-amostra da sonda; MS = massa em matéria seca da sub-amostra da sonda.

Tabela 35. Dimensões e massas dos fardos, Percursos e tempos de enfardamento, por repetição, no tratamento de enleiramento duplo.

Repetições	CF (m)	LF (m)	HF (m)	MF (kg)	PF (m)	TF (s)
1D	2,20	0,83	0,90	414,20	47,40	58,27
2D	2,15	0,80	0,92	328,50	45,30	62,25
3D	2,20	0,82	0,90	317,50	50,75	72,36
4D	2,15	0,81	0,90	308,50	57,75	100,77
5D	2,14	0,82	0,90	306,30	95,70	98,23
6D	2,16	0,81	0,90	309,40	108,65	69,30
7D	2,10	0,80	0,90	304,50	79,10	94,84
8D	2,12	0,80	0,90	332,80	99,30	54,16
9D	2,23	0,82	0,90	351,60	43,70	71,98
10D	2,15	0,82	0,90	331,20	56,65	60,20
11D	2,12	0,80	0,90	312,10	54,85	79,70
12D	2,10	0,81	0,90	312,80	68,90	72,09
13D	2,10	0,80	0,90	309,50	70,80	53,74
14D	2,13	0,82	0,90	323,20	57,00	68,15
15D	2,24	0,80	0,90	332,80	72,10	170,55

CF = comprimento do fardo; LF = largura do fardo; HF = altura do fardo; MF = massa do fardo; PF = percurso de enfardamento; TF = tempo de enfardamento.

Tabela 36. Massa, em quilogramas, das amostras obtidas pela sonda da usina e das quantidades de terra obtidas por peneiramento no tratamento de enleiramento duplo (D).

Repetição	MAs	MEp	MEb
2D1	3,314	0,855	0,289
2D2	3,764	0,186	0,102
10D1	2,416	0,205	0,106
10D2	2,086	0,119	0,043
11D1	2,608	0,183	0,112
11D2	2,815	0,292	0,142
14D1	1,706	0,123	0,061
14D2	2,005	0,185	0,085

MAs = massa da amostra da sonda; MEp = massa de matéria estranha obtida por meio de peneira de malha de 2,5 mm; MEB = massa de matéria estranha obtida por meio de bateria de peneiras.

Tabela 37. Massa das sub-amostras, em quilogramas, para determinação da umidade do palhiço enfardado obtidas pela sonda da usina no tratamento de enleiramento duplo (D).

Repetições	MU	MS
2D1	0,031	0,021
2D2	0,040	0,033
10D1	0,014	0,012
10D2	0,021	0,016
11D1	0,011	0,010
11D2	0,040	0,028
14D1	0,033	0,026
14D2	0,027	0,022

MU = massa em matéria úmida da sub-amostra da sonda; MS = massa em matéria seca da sub-amostra da sonda.

Tabela 38. Dimensões e massas dos fardos. Percursos e tempos de enfardamento, por repetição no tratamento de enleiramento triplo (T).

Repetições	CF (m)	LF (m)	HF (m)	PF (kg)	PF (m)	TF (s)
1T	2,16	0,80	0,90	358,20	46,70	122,64
2T	2,15	0,80	0,90	340,20	57,30	60,75
3T	2,12	0,80	0,90	332,10	52,50	55,44
4T	2,20	0,80	0,90	350,70	65,40	73,22
5T	2,17	0,81	0,89	340,10	75,50	73,43
6T	2,16	0,80	0,90	362,50	53,25	47,57
7T	2,15	0,81	0,90	348,13	53,40	50,17
8T	2,16	0,82	0,90	360,30	50,70	54,55

CF = comprimento do fardo; LF = largura do fardo; HF = altura do fardo; MF = massa do fardo; PF = percurso de enfardamento; TF = tempo de enfardamento.

Tabela 39. Massa das amostras, em quilogramas, obtidas pela sonda da usina e das quantidades de terra obtidas por peneiramento no tratamento de enleiramento triplo (T).

Repetições	MAs	MEp	MEb
3T1	2,105	0,148	0,078
3T2	1,684	0,132	0,063
4T1	1,821	0,138	0,075
4T2	1,529	0,207	0,125
5T1	1,316	0,078	0,029
5T2	1,243	0,131	0,055
6T1	2,033	0,204	0,106
6T2	2,334	0,257	0,158

MAs = massa da amostra da sonda; MEp = massa de matéria estranha obtida por meio de peneira de malha de 2,5 mm; MEb = massa de matéria estranha obtida por meio de bateria de peneiras.

Tabela 40. Massa das sub-amostras, em quilogramas, para determinação da umidade do palhiço enfardado obtido pela sonda da usina no tratamento de enleiramento triplo (T).

Repetições	MU	MS
3T2	0,036	0,030
6T2	0,043	0,032
6T1	0,028	0,023
3T1	0,018	0,016
4T1	0,040	0,027
4T2	0,027	0,023
5T2	0,012	0,009
5T1	0,024	0,016

MU = massa em matéria úmida da sub-amostra da sonda; MS = massa em matéria seca da sub-amostra da sonda.

Tabela 41. Resultados de análise granulométrica e umidade do solo, em %.

Amostra	Argila	Silte	Areia	Umidade
28P15	10,78	18,61	70,61	10,44
01P14	12,41	17,74	69,95	11,78
25P15	8,66	21,74	69,6	10,78
18P13	14,69	18,22	67,09	10,52
05P15	16,14	17,72	66,14	14,33

Tabela 42. Resultados das sub-amostras de terra, em gramas, obtidas por meio de bateria de peneiras no tratamento de enleiramento simples (S) e queimadas em mufla.

Repetições	MTp	MTc
3S1+2	1,1252	0,8301
3S1+2	1,1469	0,8714
3S1+2	2,0520	1,6088
3S1+2	2,2884	1,8198
3S1+2	3,4185	2,7111
4S1+2	0,9419	0,7225
4S1+2	1,0325	0,7895
4S1+2	1,0000	0,7723
4S1+2	0,8097	0,6140
4S1+2	2,2773	1,6742
5S1+2	3,8629	3,3975
5S1+2	2,7588	2,3443
5S1+2	3,0035	2,8704
5S1+2	2,9858	2,3568
5S1+2	4,8461	4,2315
6S1+2	3,1379	2,5795
6S1+2	3,1842	2,6251
6S1+2	3,3154	2,8095
6S1+2	3,2125	2,6714
6S1+2	4,3904	2,7337

MTp = massa de terra mais particulado vegetal em matéria seca; MTc = massa de terra mais cinzas.

Tabela 43. Resultados das sub-amostras de terra, em gramas, obtidas por meio de bateria de peneiras no tratamento de enleiramento duplo (D) e queimadas em mufla.

Repetições	MTp	MTc
2D1+2	4,5981	4,0861
2D1+2	6,7787	5,9382
2D1+2	4,5517	4,0451
2D1+2	5,6652	4,9917
2D1+2	5,7435	5,1028
10D1+2	2,5558	2,0219
10D1+2	1,8921	1,3820
10D1+2	2,4600	1,8723
10D1+2	2,1761	1,6272
10D1+2	3,3373	2,6728
11D1+2	2,0702	1,6565
11D1+2	2,6547	2,2535
11D1+2	3,4487	2,9175
11D1+2	3,0731	2,6097
11D1+2	3,9879	3,3281
14D1+2	2,1256	1,5840
14D1+2	2,3596	1,7976
14D1+2	1,7030	1,3149
14D1+2	2,3584	1,8582
14D1+2	3,4915	2,8507

MTp = massa de terra mais particulado vegetal em matéria seca; MTc = massa de terra mais cinzas.

Tabela 44. Resultados das sub-amostras de terra, em gramas, obtidas por meio de bateria de peneiras no tratamento de enleiramento triplo (T) e queimadas em mufla.

Repetições	MTp	MTc
3T1+2	3,0908	2,4677
3T1+2	2,6751	2,0744
3T1+2	2,7306	2,1491
3T1+2	2,5935	1,9567
3T1+2	2,4625	1,9131
4T1+2	4,0232	3,4341
4T1+2	3,2899	2,7580
4T1+2	1,8363	1,7222
4T1+2	4,6713	4,0490
4T1+2	4,1401	3,5308
5T1+2	3,1474	2,4390
5T1+2	3,5129	2,7948
5T1+2	1,7891	1,3271
5T1+2	1,3450	1,0082

Tabela 44. Resultados das sub-amostras de terra, em gramas, obtidas por meio de bateria de peneiras no tratamento de enleiramento triplo (T) e queimadas em mufla.

Repetições	MTp	MTc
5T1+2	7,0010	5,4866
6T1+2	2,6457	2,1671
6T1+2	3,3599	2,8628
6T1+2	3,7910	3,1422
6T1+2	2,5902	2,1429
6T1+2	4,3165	3,6018

MTp = massa de terra mais particulado vegetal em matéria seca; MTc = massa de terra mais cinzas.

Tabela 45. Cinzas de folhas de palhiço lavadas e não lavadas, em gramas, no tratamento de enleiramento simples (SL e SS respectivamente) para a determinação de terra aderida ao palhiço.

Repetições	MPt	MCs
3S1S	1,6472	0,1136
3S1S	1,7873	0,1202
3S1S	1,9207	0,1366
3S1S	1,9177	0,1251
3S1S	2,2046	0,1543
3S1L	1,5302	0,0682
3S1L	1,4406	0,0645
3S1L	1,4253	0,0609
3S1L	1,4151	0,0615
3S1L	1,2338	0,0547
3S2S	1,1281	0,0695
3S2S	1,9279	0,1476
3S2S	1,7767	0,1092
3S2S	1,4768	0,098
3S2S	1,6727	0,1097
3S2L	1,4958	0,0604
3S2L	1,5645	0,0860
3S2L	1,3509	0,0513
3S2L	1,7914	0,0685
3S2L	1,5623	0,0576
4S1S	1,1146	0,0853
4S1S	1,1015	0,0881
4S1S	1,1858	0,0969
4S1S	1,3199	0,0976
4S1S	1,0779	0,0762
4S1L	1,2428	0,0615
4S1L	1,3997	0,0676
4S1L	1,1725	0,0661
4S1L	0,9911	0,0452

Tabela 45. Cinzas de folhas de palhiço lavadas e não lavadas, em gramas no tratamento de enleiramento simples (SL e SS respectivamente) para a determinação de terra aderida ao palhiço.

Repetições	MPt	MCs
4S1L	1,2459	0,0556
4S2S	1,5902	0,0963
4S2S	1,8249	0,1150
4S2S	1,7343	0,1124
4S2S	1,7892	0,1113
4S2S	1,7245	0,1096
4S2L	0,8725	0,0328
4S2L	1,0043	0,0383
4S2L	0,9613	0,0359
4S2L	1,1066	0,0373
4S2L	0,8959	0,0339
5S1S	1,7739	0,1073
5S1S	1,6118	0,0987
5S1S	1,6781	0,1039
5S1S	1,7949	0,1052
5S1S	2,4516	0,1495
5S1L	1,4247	0,0529
5S1L	1,4256	0,0530
5S1L	1,2736	0,0460
5S1L	1,2699	0,0444
5S1L	1,4684	0,0534
5S2S	0,8859	0,0566
5S2S	0,7637	0,0479
5S2S	0,8414	0,0516
5S2S	0,9871	0,0648
5S2S	0,9378	0,0651
5S2L	0,9792	0,0398
5S2L	0,9081	0,0347
5S2L	0,9479	0,0335
5S2L	0,9513	0,0368
5S2L	0,9166	0,0364
6S1S	0,9496	0,0646
6S1S	1,2541	0,0877
6S1S	1,8150	0,1183
6S1S	2,1503	0,1468
6S1S	1,1894	0,0850
6S1L	1,0969	0,0451
6S1L	0,7876	0,0333
6S1L	1,8904	0,0791
6S1L	1,6282	0,0657
6S2S	1,5901	0,0975
6S2S	1,7665	0,1135
6S2S	1,6315	0,1095
6S2S	1,1016	0,0687

Tabela 45. Cinzas de folhas de palhiço lavadas e não lavadas, em gramas no tratamento de enleiramento simples (SL e SS respectivamente) para a determinação de terra aderida ao palhiço.

Repetições	MPt (g)	MCs (g)
6S2S	2,0027	0,1365
6S2L	2,2870	0,0941
6S2L	1,2033	0,0492
6S2L	1,3272	0,0536
6S2L	1,4174	0,0563
6S2L	1,5332	0,0615

MPt = massa de palhiço triturado em matéria seca; MCs = massa de cinzas mais terra nas amostras não lavadas.

Tabela 46. Cinzas de folhas de palhiço lavadas e não lavadas, em gramas, no tratamento de enleiramento duplo (SL e SS respectivamente) para a determinação de terra aderida ao palhiço.

Repetições	MPt	MCs
2D1S	1,6685	0,1035
2D1S	1,5999	0,1044
2D1S	1,5749	0,0971
2D1S	1,8180	0,1195
2D1S	1,8537	0,1261
2D1L	1,7314	0,0616
2D1L	1,5875	0,0590
2D1L	1,5678	0,0594
2D1L	1,4493	0,0519
2D1L	1,3480	0,0495
2D2S	1,8583	0,1374
2D2S	1,3463	0,0985
2D2S	1,5664	0,1089
2D2S	1,5311	0,1079
2D2S	1,4531	0,0895
2D2L	0,9649	0,0443
2D2L	0,9599	0,0436
2D2L	0,9970	0,0427
2D2L	1,5016	0,0608
2D2L	1,4906	0,0614
11D1S	1,4205	0,0895
11D1S	1,3452	0,0828
11D1S	1,5926	0,1024
11D1S	1,4180	0,0907
11D1S	1,6914	0,1118
11D1L	1,3095	0,0439
11D1L	1,2483	0,0441
11D1L	1,6000	0,0577
11D1L	1,5598	0,0544
11D1L	1,4294	0,0500

Tabela 46. Cinzas de folhas de palhiço lavadas e não lavadas, em gramas, no tratamento de enleiramento duplo (SL e SS respectivamente) para a determinação de terra aderida ao palhiço.

Variáveis	MPt	MCs
11D2S	1,5498	0,1008
11D2S	1,563	0,1003
11D2S	1,2473	0,0794
11D2S	1,4356	0,0924
11D2S	1,2152	0,0705
11D2L	0,7840	0,0292
11D2L	0,8162	0,0302
11D2L	0,9802	0,0348
11D2L	0,928	0,0335
11D2L	0,9946	0,0324
14D1S	1,8850	0,1247
14D1S	1,8696	0,1187
14D1S	1,9540	0,1297
14D1S	1,8131	0,1097
14D1S	1,7183	0,1098
14D1L	1,4830	0,0572
14D1L	1,0900	0,0395
14D1L	1,1784	0,0424
14D1L	1,3100	0,0434
14D1L	1,4130	0,0509
14D2S	1,5163	0,0946
14D2S	1,6926	0,0987
14D2S	1,2926	0,0839
14D2S	1,7856	0,1067
14D2S	1,3944	0,0885
14D2L	1,4405	0,0485
14D2L	1,3710	0,0419
14D2L	1,4315	0,0487
14D2L	1,2734	0,0445
14D2L	1,1968	0,0422
10D1S	1,4058	0,0895
10D1S	1,6935	0,1023
10D1S	1,3790	0,0891
10D1S	1,1557	0,0746
10D1S	1,8923	0,1151
10D1L	1,3343	0,0471
10D1L	1,5381	0,0516
10D1L	1,2749	0,0468
10D1L	1,5309	0,0518
10D1L	1,1824	0,0447
10D2S	2,0467	0,1489
10D2S	1,8827	0,1268
10D2S	1,8467	0,1298

Tabela 46. Cinzas de folhas de palhiço lavadas e não lavadas, em gramas, no tratamento de enleiramento duplo (SL e SS respectivamente) para a determinação de terra aderida ao palhiço.

Repetições	MPt	MCs
10D2S	1,3376	0,0876
10D2S	2,1507	0,1392
10D2L	1,2891	0,0592
10D2L	1,0046	0,0429
10D2L	0,8679	0,0373
10D2L	0,8449	0,0381
10D2L	1,1154	0,0472

MPt = massa de palhiço triturado em matéria seca; MCs = massa de cinzas mais terra nas amostras não lavadas.

Tabela 47. Cinzas de folhas de palhiço lavadas e não lavadas, em gramas, no tratamento de enleiramento triplo (SL e SS respectivamente) para a determinação de terra aderida ao palhiço.

Repetições	MPt	MCs
3T1S	1,3714	0,0840
3T1S	1,4093	0,0944
3T1S	1,5819	0,1055
3T1S	1,2365	0,0841
3T1S	1,3712	0,0939
3T1L	0,9833	0,0405
3T1L	0,9852	0,0412
3T1L	1,0532	0,0435
3T1L	0,9973	0,0433
3T1L	1,0165	0,0448
3T2S	1,7955	0,1211
3T2S	1,865	0,1297
3T2S	1,8758	0,1283
3T2S	1,931	0,1423
3T2S	1,7023	0,1189
3T2L	1,5307	0,0688
3T2L	1,411	0,0663
3T2L	1,4259	0,0645
3T2L	1,3097	0,0625
3T2L	1,2714	0,0575
4T1S	1,5825	0,1006
4T1S	1,5707	0,1112
4T1S	1,4109	0,0952
4T1S	1,3933	0,0897
4T1S	1,6019	0,1138
4T1L	1,0667	0,0393
4T1L	1,2675	0,0565
4T1L	1,4671	0,0652
4T1L	1,1203	0,0488

Tabela 47. Cinzas de folhas de palhiço lavadas e não lavadas, em gramas, no tratamento de enleiramento triplo (SL e SS respectivamente) para a determinação de terra aderida ao palhiço.

Repetições	MPt	MCs
4T1L	1,5331	0,0685
4T2S	1,1506	0,0738
4T2S	1,2142	0,0764
4T2S	1,0345	0,0687
4T2S	1,2534	0,0815
4T2S	1,1713	0,0726
4T2L	0,7964	0,0285
4T2L	0,9526	0,0359
4T2L	1,0156	0,0390
4T2L	0,8978	0,0347
4T2L	0,9424	0,0345
5T1S	1,635908	0,1111
5T1S	1,698923	0,1197
5T1S	1,896899	0,1283
5T1S	1,536438	0,1053
5T1S	1,722374	0,1189
5T1L	1,3212	0,0521
5T1L	1,0248	0,0425
5T1L	1,3382	0,0555
5T1L	1,4606	0,0615
5T1L	1,6205	0,0795
5T2S	1,9567	0,1445
5T2S	1,5022	0,1078
5T2S	1,4393	0,1076
5T2S	1,837	0,1451
5T2S	1,7079	0,1369
5T2L	0,9546	0,0492
5T2L	1,1296	0,0581
5T2L	1,2562	0,0602
5T2L	1,089	0,0590
5T2L	1,1103	0,0549
6T1S	1,6834	0,1029
6T1S	2,593	0,1544
6T1S	1,7405	0,1100
6T1S	2,1124	0,1343
6T1S	1,5087	0,1004
6T1L	1,7046	0,0648
6T1L	1,6398	0,0601
6T1L	1,4855	0,0651
6T1L	1,465	0,0632
6T1L	1,5864	0,0678
6T2S	1,5962	0,1105
6T2S	1,7109	0,1176

Tabela 47. Cinzas de folhas de palhiço lavadas e não lavadas, em gramas, no tratamento de enleiramento triplo (SL e SS respectivamente) para a determinação de terra aderida ao palhiço.

Repetições	MPt	MCs
6T2S	1,8805	0,1297
6T2S	1,731	0,1174
6T2S	1,7772	0,1306
6T2L	1,4222	0,0663
6T2L	1,3791	0,0635
6T2L	1,4736	0,0690
6T2L	1,3236	0,0641
6T2L	1,6522	0,0741

MPt = massa de palhiço triturado em matéria seca; MCs = massa de cinzas mais terra nas amostras não lavadas.