

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**DESEMPENHO OPERACIONAL DE DUAS ENFARDADORAS DE
FARDOS PRISMÁTICOS RETANGULARES NO PALHIÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR**

ANDERSON RAVANNY DE ANDRADE GOMES

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP –
Campus de Botucatu, para obtenção do
título de Mestre em Agronomia
(Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP

JULHO, 2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**DESEMPENHO OPERACIONAL DE DUAS ENFARDADORAS DE
FARDOS PRISMÁTICOS RETANGULARES NO PALHIÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR**

ANDERSON RAVANNY DE ANDRADE GOMES

Orientador: Sérgio Hugo Benez

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Arbex Silva

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP –
Campus de Botucatu, para obtenção do
título de Mestre em Agronomia (Energia
na Agricultura).

BOTUCATU – SP

JULHO, 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO
DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA
- LAGEADO - BOTUCATU (SP)

G633d Gomes, Anderson Ravanny de Andrade, 1989-
Desempenho operacional de duas enfardadoras de fardos
prismáticos retangulares no palhiço de cana-de-açúcar /
Anderson Ravanny de Andrade Gomes. - Botucatu : [s.n.],
2014
xii, 63 f. : fots. color., grafs., ils. color., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2014
Orientador: Sérgio Hugo Benez
Coorientador: Paulo Roberto Arbex Silva
Inclui bibliografia

1. Biocombustíveis. 2. Resíduos vegetais. 3. Mecanização
agrícola. I. Benez, Sérgio Hugo. II. Silva, Paulo Roberto
Arbex. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mes-
quita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências
Agrônômicas. IV. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU**

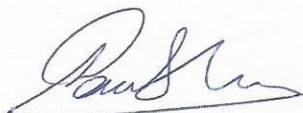
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: DESEMPENHO OPERACIONAL DE DUAS ENFARDADORAS DE
FARDOS PRISMÁTICOS RETANGULARES NO PALHIÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR**

ALUNO: ANDERSON RAVANNY DE ANDRADE GOMES

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. PAULO ROBERTO ARBEX SILVA

Aprovado pela Comissão Examinadora



Prof. Dr. PAULO ROBERTO ARBEX SILVA



Prof. Dr. ANDRÉ SATOSHI SEKI



Prof. Dr. MARCELO DE ALMEIDA SILVA

Data da Realização: 22 de julho de 2014.

Dedico

Aos meus pais José Roberto Lima Gomes e Alenice de Andrade Gomes, por ser um exemplo de superação, pelo apoio imensurável ao longo da minha vida.

Ao meu irmão Alysson Rafael.

Aos meus avós José Pereira de Andrade e Maria do Carmo de Andrade, pelo apoio e palavras de conforto nos momentos de saudades. E a toda minha família pela torcida, para que eu realizasse essa conquista.

A minha namorada Lays Santos (minha guerreira), que me apoiou em todos os momentos dessa caminhada, mesmo na distância, apoio que foi essencial para que eu alcançasse mais esse objetivo.

Saber muito não lhe torna inteligente. A inteligência se traduz na forma que você recolhe, julga, maneja e, sobretudo, onde e como aplicar esta informação.

Carl Sagan.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado condições de sempre buscar e alcançar meus objetivos, por sempre guiar meus passos pelos melhores caminhos.

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e a Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu pela oportunidade de estudo e realização do mestrado.

Ao meu orientador Professor Doutor Sérgio Hugo Benez.

Ao meu co-orientador Professor Doutor Paulo Roberto Arbex, que sempre esteve à disposição ajudando no que foi possível e por ser um exemplo de humildade e dedicação em tudo que faz.

Aos Doutores Marcelo de Almeida Silva, Kleber Pereira Lanças e André Satoshi Seki pelos ensinamentos e contribuição para o enriquecimento do meu trabalho.

Aos amigos Rilton Moraes e Marcos Liodorio pela ajuda na coleta dos dados da minha dissertação. A Nathália Ribeiro pela ajuda nas correções da dissertação.

Aos meus amigos do GPD, Saulo Gomes, Tiago Pereira, Leandro Tavares, Patrícia Dias, Vinicius Paludo, Samantha Almeida, Diego Eiras, Lia Kato.

Aos amigos de Botucatu, Renato Guedes, Alisson Mota, Magnun Penariol, Fernando Kassis, Rodolfo Chechetto, Ulisses Gandolfo, Jefferson Sandi.

Aos amigos da República Alagoas, minha casa em Botucatu, Lucas Holanda, Givaldo Neto, Gabriel Lyra, Henrique Tenório.

A empresa onde realizei meu experimento deixo meus sinceros agradecimentos, em especial aos profissionais e amigos, Jaidenilson Lima, José Antônio Bressiani, Sérgio Godoy, Edvaldo Oliveira, Jadson Teles, Hugo Soriano, Feitosa da Silva, Rubens, Giudásio, Gilvan, Vitor, Roberto, Ronilson.

A CAPES pela concessão de bolsa de estudos.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE EQUAÇÕES.....	X
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	2
3 INTRODUÇÃO.....	3
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
4.1 Cultura da cana-de-açúcar.....	5
4.2 Biomassa como fonte de biocombustível.....	9
4.3 Palhiço da cana-de-açúcar.....	13
4.4 Desempenho operacional de máquinas de enfardamento.....	16
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	19
5.1 Campo experimental.....	19
5.2 Máquinas e implementos.....	19
5.3 Material utilizados para amostragem.....	21
5.4 Descrição dos tratamentos.....	21
5.5 Velocidade e distância percorrida para formação dos fardos.....	23
5.6 Volume de palha na área do experimento.....	23
5.7 Massas de palhiço não manipuladas pelas operações de aleiramento.....	24
5.8 Massas de palhiço na leira antes e após o enfardamento.....	24
5.9 Distância entre leiras.....	25
5.10 Altura, largura e comprimento das leiras.....	26
5.11 Determinações de tempos e movimentos das máquinas.....	26
5.12 Umidade no material enfardado.....	26
5.13 Impureza mineral do material enfardado.....	27
5.13.1 Análise em laboratório da impureza mineral.....	28
5.14 Massa úmida de cada fardo.....	29
5.14.1 Volume de cada fardo.....	30
5.15 Massa seca dos fardos.....	30

5.16 Massa específica dos fardos.....	31
5.16.1 Determinação de massas específicas dos fardos.....	32
5.17 Desempenho operacional das máquinas.....	32
5.17.1 Consumo de combustível do trator.....	32
5.17.2 Capacidade de campo teórica (CCT).....	33
5.17.3 Capacidade de campo operacional (CCO).....	34
5.18 Análise estatística.....	34
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
7 CONCLUSÕES.....	54
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 1. Especificações dos modelos de enfardadoras utilizadas no experimento	20
Tabela 2. Médias referentes às distâncias entre as leiras nos três tratamentos do ensaio .	25
Tabela 3. Análise de variância entre as médias para larguras das leiras e altura das leiras (m).....	37
Tabela 4. Análise de variância entre as médias de comprimentos dos fardos prismáticos (m) de palhiço de cana-de-açúcar	39
Tabela 5. Análise de variância entre as médias da massa úmida dos fardos (kg)	41
Tabela 6. Análise de variância entre as médias referentes à impureza mineral (%).....	42
Tabela 7. Análise de variância entre as médias referentes à umidade (%) dos fardos.....	43
Tabela 8. Análise de variância entre as médias referente ao volume dos fardos (m ³).....	43
Tabela 9. Análise de variância entre as médias de massa seca (kg) e massa específica (kg m ³) dos fardos prismáticos de palhiço de cana-de-açúcar.....	45
Tabela 10. Análise de variância entre as médias referentes ao consumo de combustível em litros por fardo.....	46
Tabela 11. Análise de variância entre as médias referente ao consumo de combustível em litros por hora.....	46
Tabela 12. Análise de variância entre as médias referente ao consumo de combustível em litros por hectare e litros por toneladas de matéria seca	48
Tabela 13. Análise de variância entre as médias referente ao tempo de produção de cada fardo (segundos)	49
Tabela 14. Análise de variância entre as médias referente ao tempo de produção de fardo por hora nas operações de enfardamento	50
Tabela 15. Análise de variância entre as médias referente à distância (m) entre cada fardo no campo de ensaio	51
Tabela 16. Análise de variância entre as médias referente à Capacidade de campo teórica (CCT) ha h ⁻¹ e a Capacidade de campo operacional (CCO) ha h ⁻¹	52

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Representação dos constituintes da planta da cana-de-açúcar	13
Figura 2. Esquema de enfardamento prismático	21
Figura 3. Regulagem do aleirador realizada para obter o volume de recolhimento do palhiço em cada tratamento	22
Figura 4. A= Área de amostragem (1 m ²) do palhiço disponível no campo, antes da operação de aleiramento da palha; B = Pesagem da amostra coletada de palhiço utilizando balança digital	23
Figura 5. Amostragem do palhiço na leira após a operação de enfardamento do palhiço .	24
Figura 6. Determinação da distância entre leiras	25
Figura 7. Medidor digital de umidade	27
Figura 8. Recolhimento dos fardos selecionados para amostragem de impureza mineral	27
Figura 9. A – Amostragem dos fardos com o auxílio de uma sonda adaptada a uma furadeira. B – Separação do material coletado pela sonda, para posterior análise em laboratório	28
Figura 10. Mufla do laboratório Central Analítica	28
Figura 11. Pesagem dos fardos com o auxílio de uma balança digital	29
Figura 12. Determinação das medidas do fardo	30
Figura 13. Amostragem dos fardos com o auxílio de sonda	32
Figura 14. A – Ensaio de consumo de combustível, proveta graduada utilizada para abastecer o tanque de combustível dos tratores. B – Abastecimentos dos tanques de combustíveis dos tratores com diesel.....	33
Figura 15. Umidade no palhiço da cana-de-açúcar coletado durante todo o dia na área de ensaio das máquinas no município de São Miguel dos Campos – AL	36
Figura 16. Volume de recolhimento do palhiço nas leiras para cada máquina enfardadora	38

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação	Página
1 Impureza mineral por fardo	29
2 Volume de cada fardo	30
3 Massa seca dos fardos	30
4 Peso úmido em kg	31
5 Peso seco dos fardos	31
6 Massa específica de cada fardo.....	32
7 Capacidade de campo teórica (CCT)	33
8 Capacidade de campo operacional (CCO)	34

1 RESUMO

O cultivo da cana-de-açúcar é uma das mais importantes atividades econômicas da história brasileira. A colheita mecanizada da cana-de-açúcar foi implantada devido a questões econômicas, operacionais e ambientais. Desta forma o material remanescente das operações de colheita mecanizada pode causar problemas como a incidência de pragas de difícil controle e incêndios acidentais e criminosos. A utilização do resíduo disponível no campo, através do recolhimento e enfardamento desse material, proporciona novas fontes de energia para a indústria. Esse trabalho teve como objetivo estudar o desempenho operacional de duas máquinas de enfardamento prismático no palhito de cana-de-açúcar em uma usina canavieira no município de São Miguel dos Campos – AL. As máquinas foram avaliadas em três volumes diferentes de recolhimento do palhito, regulando-se o aleirador para o aleiramento de cada volume de palhito definido. Foram avaliadas, consumo de combustível, peso dos fardos, impureza mineral agregada ao palhito e umidade dos fardos, distância altura e largura das leiras, tempo e distância que se refere à produção de cada fardo, capacidade operacional no enfardamento. Os resultados obtidos mostram que a Máquina 2 obteve maior massa específica dos fardos em relação a Máquina 1. A Máquina 1 apresentou menor consumo horário de combustível. No entanto, a Máquina 2 obteve maior produção de fardos por hora. Não houve diferenças significativas com relação à impureza mineral nos fardos nos três diferentes volumes aleirados. A capacidade de campo operacional em todos os tratamentos analisados, foi melhor para Máquina 2.

Palavras-chave: Biomassa, Enfardamento, Impureza mineral, Resíduo Vegetal.

OPERATING PERFORMANCE OF TWO ROUND BALERS OF BALES PRISMATIC SQUARE IN STRAW OF SUGAR CANE. Botucatu, 2014. 63 p.

Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Dissertação (Mestrado em Agronomia / Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: ANDERSON RAVANNY DE ANDRADE GOMES

Adviser: SÉRGIO HUGO BENEZ

Co-Adviser: PAULO ROBERTO ARBEX SILVA

2 SUMMARY

The cultivation of sugar cane is one of the most important economic activities in Brazilian history. Mechanized harvesting of sugar cane was implanted due to economic, operational and environmental issues. Thus the remaining material of mechanized harvest operations can cause problems as the incidence of pests and difficult to control accidental and criminal. The use of available waste in the field by the gathering and bundling of this material provides new energy sources for industry. This work aimed to study the operational performance of two prismatic baling machines in the straw of sugarcane in company agricultural in São Miguel dos Campos - AL. The machines were evaluated in three different volumes of straw pickup, by regulating the accumulator of straw for each defined volume of straw. Were evaluated, fuel consumption, weight of bales, mineral impurities and moisture from the bales, distance height and width of the windrows, time and distance refers to the production of each bale, baling operational capability. The results show that the Machine 2 has obtained higher density bales compared to Machine 1. The Machine 1 presented less fuel consumption. However, the Machine 2 produced the highest quantity of bales per hour. There were no significant differences with respect to mineral impurities in bales in three different volumes accumulation of straw. The operational field capacity in all treatments analyzed, was better for Machine 2.

Keywords: Biomass, Baling, mineral impurity, Plant residue.

3 INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar é uma das mais importantes atividades econômicas da história brasileira, proporciona grande potencial de produção agrícola para o país, principalmente no que se refere a produtos derivados do setor sucroalcooleiro. A biomassa apresenta-se como uma nova fonte de energia disponibilizada no campo na forma de palhicho remanescente da colheita mecanizada, essa energia disponível pode ser destinada para a produção de biocombustíveis, proporcionando geração de empregos e renda ao país com a utilização de mais uma fonte de energia renovável. A proibição da queima da cana-de-açúcar através de leis ambientais foi um fator que favoreceu ao acúmulo de grandes quantidades de biomassa no campo nestes últimos anos.

Com a eliminação da queima da palha da cana-de-açúcar, e substituição da colheita manual pela colheita mecanizada da cana crua, a palha da referida cultura começou a receber muita atenção, pois o grande volume de cobertura morta que fica armazenado na superfície do solo, pode causar problemas relacionados ao manejo da cultura, como por exemplo, dificuldades na rebrota da cana-de-açúcar e nas as operações de cultivo, dificuldade de execução de controle seletivo de plantas invasoras e aumento das populações de pragas que se abrigam e multiplicam sob a palhada. Porém esse acúmulo também acarreta benefícios como, por exemplo, servir como prevenção de erosão do solo, controle da umidade do solo e controle de plantas invasoras, também serve como fonte para geração de energia.

Visando minimizar tais problemas, estudos vêm sendo realizados com o objetivo de propor estimativas da quantidade ideal de palha a ser deixada no campo. Estudos tem recomendado que cerca da metade da palha seja mantida no solo, por razões agronômicas, como a redução da erosão e a ciclagem de nutrientes.

Para aperfeiçoar todo o processo de recolhimento do palhiço e minimizar custos das operações, fazendo com que as máquinas envolvidas forneçam um bom desempenho econômico e operacional, o enfardamento da palha da cana-de-açúcar por máquinas vêm sendo bastante pesquisado. Existem ainda vários aspectos a serem abordados para maximizar essa operação. Exemplo disso, as impurezas que são levadas para a indústria, o desenvolvimento das máquinas para melhor eficiência no campo e um melhor layout para transporte dessa biomassa para a indústria, estão cada vez mais sendo avaliados para chegar a um sistema economicamente rentável.

Para chegar a um sistema de recolhimento do palhiço economicamente viável, faz-se necessário um planejamento para atender as necessidades de implantação, condução e retirada da cultura ou material remanescente do campo, estando sujeito à influência de fatores externos com ênfase no solo, clima, fatores operacionais e mão de obra qualificada para operar as máquinas.

Aliar a eficiência operacional das máquinas envolvidas no processo com um desempenho econômico satisfatório ainda é um desafio muito grande nas operações de recolhimento de palha. O aproveitamento dessa biomassa depende de uma série de operações mecanizadas, desde o recolhimento feito pelo aleirador, chegando até o transporte dos fardos. Por este motivo, essa nova dinâmica de aproveitamento da cana-de-açúcar necessita de pesquisas, pois ainda é grande a dificuldade em fazer com que as enfardadoras atendam os requisitos de produção e eficiência.

Nesse contexto, objetivou-se realizar o estudo de duas máquinas de enfardamento prismático em palhiço de cana-de-açúcar, avaliando o desempenho operacional, o consumo de combustível e a quantidade de impureza nos fardos em três diferentes volumes de recolhimento do palhiço.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene, e possui ciclo médio de quatro anos desde o plantio até a renovação das áreas plantadas. Faz parte da família Poacea do gênero *Saccharum*, e é comumente cultivada nas regiões tropicais e subtropicais, pois necessita de uma época quente e chuvosa para o desenvolvimento vegetativo, e uma época fria e/ou seca para o enriquecimento em açúcares (Paoliello, 2006).

A cana-de-açúcar é uma planta C4 com alta capacidade fotossintética e cresce formando touceiras constituídas por uma parte aérea formada por colmos, folhas e inflorescência e outra parte subterrânea, composta por raízes e rizomas. A produtividade dessa cultura é maior em solos profundos, argilosos, de boa fertilidade, com alta capacidade de retenção de água e não sujeitos ao encharcamento (Albuquerque filho et al. 2010).

A cana-de-açúcar ocupa um papel importante no cenário agrícola brasileiro desde a época colonial, devidos aos vários produtos extraídos dela, como o açúcar e o álcool. Desde o surgimento do Proálcool, no ano de 1974 até 2014, o Brasil está sempre entre os líderes mundiais na produção de cana-de-açúcar e de seus principais produtos, açúcar e o etanol, e experimenta uma nova fase de expansão, em função do aumento das demandas interna e externa. A produção projetada para 2019 é de 58,8 bilhões de litros, mais que o dobro da registrada em 2008. O consumo interno está projetado em 50 bilhões de litros e as exportações em 8,8 bilhões (Mapa, 2014).

A área de cultivo da cana-de-açúcar no Brasil, colhida na safra 2013/2014 foi de 8.810 mil hectares. O estado de São Paulo é o maior produtor com 4.552,46 mil hectares de área plantada representam 51,66% do total da área plantada no país. Já na região Nordeste, o estado de Alagoas aparece com 5,02% ou seja, 442,590 hectares das áreas produtivas do país. A área destinada ao cultivo da cana-de-açúcar neste ano safra deve apresentar um crescimento de 3,80% ou 325,8 mil hectares em relação à safra anterior. Em termos de produtividade, a região Centro-Sul obteve um acréscimo com média de 74,89 t ha⁻¹, maior que na safra 2012/2013 que foi 69,4 t ha⁻¹, já a região Nordeste a expectativa de crescimento é de 4,2% índice pequeno devido à severa estiagem que ocorreu na região na safra anterior (Conab, 2014).

A produção de cana-de-açúcar é uma atividade de grande importância para a economia brasileira, representando 2,2% do PIB, com um faturamento anual de mais de US\$ 8 bilhões, e gera aproximadamente um milhão de empregos diretos, em dados de anos imediatamente anteriores a 2004 (Macedo et al. 2004). De acordo com dados do IBGE (2014), a produção nacional de cana-de-açúcar estimada para a safra 2013/2014 apresenta um crescimento de 0,7% em relação à 2012/2013, alcançando 743,1 milhões de toneladas. A área destinada à colheita no ano apresenta um acréscimo de 0,4%. O rendimento médio deverá aumentar 0,3%. A produção sucroalcooleira está em crescimento. Se compararmos a estimativa apontada para a safra de 2015/16, tendo como base a área plantada em 2005, percebe-se que esse valor representaria um aumento de mais de 50% na área plantada de cana-de-açúcar no Brasil (Torquato, 2006).

As altas temperaturas e a escassez de chuvas enfatiza o prognóstico negativo dos agricultores, em relação à produtividade agrícola nas mais importantes regiões produtoras do Brasil. Essa preocupação se agrava principalmente na região Sudeste do país, onde as lavouras de cana-de-açúcar estão em pleno desenvolvimento vegetativo, e o grande problema é que as chuvas são essenciais para o crescimento da cana nessa região, pois será colhida em abril, e com os baixos índices pluviométricos a produtividade da cultura está comprometida (IBGE, 2014). As grandes mudanças climáticas que estão acontecendo em todo mundo, também reforça a eliminação das queimadas da cana-de-açúcar, visto que os gases liberados durante a queima e a degradação ambiental, influencia o clima no planeta Terra.

A necessidade de promover a limpeza parcial do canavial visando facilitar as operações de colheita da cana-de-açúcar é a razão principal da queima. Porém a

Lei Estadual Nº 11.241, de 19 de setembro 2002 do estado de São Paulo dispõe sobre a eliminação do uso do fogo como método despalhador e facilitador do corte da cana-de-açúcar, sendo que o decreto de Lei Estadual 47.700, de 11 de março de 2003, determina prazos para a eliminação gradativa do emprego do fogo para despalha da cana-de-açúcar nos canaviais paulistas. Entretanto, em junho de 2007, A União da Indústria da Cana-de-açúcar (Unica) e a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo assinaram um protocolo agro-ambiental, que antecipa os prazos para a eliminação da queima da palha da cana-de-açúcar nos canaviais do estado de São Paulo. Os prazos estabelecidos prevê antecipar o fim da queima da palha da cana para 2014, em áreas mecanizáveis e 2017, em áreas não mecanizáveis. Como incentivo o governo do estado de São Paulo concede um certificado de conformidade agroambiental aos fornecedores e usinas de canavieiras que ajuda a agregar valor ao produto comercializado (Torquato e Ramos, 2012).

Uma das vantagens da queima da cana-de-açúcar é facilitar e baratear o corte manual reduzindo os custos de carregamento e de transporte, também torna mais eficiente o trabalho da moenda, que não necessita parar seu funcionamento para retirada do palhicho. Mas essa prática também demonstra grandes desvantagens como, por exemplo, compactação do solo devido ao aumento da temperatura e diminuição da umidade, emissão de poluentes na atmosfera, afetando as áreas rurais adjacentes e os centros urbanos mais próximos e gerando grande impacto no ambiente e na saúde humana, aumento da sujeira doméstica e do consumo de água tratada, dano às redes de transmissão de energia, causando eventuais interrupções no fornecimento de energia elétrica, aumento de acidentes automobilísticos, já que a fumaça diminui a visibilidade dos motoristas (Lanzotti, 2000).

De acordo com Ripoli (2004), a queima da cana-de-açúcar causa impactos ambientais como a enorme quantidade de gases de alto potencial poluente liberado nas camadas mais baixa da troposfera, de modo que essas quantidades ultrapassam em até milhares de vezes os valores ideais aos padrões de qualidade do ar. Para Zancul (1998), além de causar problemas com o meio ambiente, a queima da cana-de-açúcar também pode provocar doenças respiratórias e poluir o ambiente com o carvão que se forma a partir da queima da cana-de-açúcar. A queima dos canaviais libera gases tóxicos, como por exemplo: monóxido de carbono, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, além do material particulado, poluentes estes que causam efeitos prejudiciais diretamente no sistema respiratório. Ripoli e Ripoli (2010) citam que a redução/eliminação

da queima de pré-colheita terá outro efeito benéfico bastante relevante, que é a redução da poluição ambiental, mesmo que no Brasil a poluição causada por motores de combustão interna, movidos à gasolina e óleo diesel também é um grande poluidor muito mais agravante do que a queima da palha da cana-de-açúcar.

A eliminação das queimadas e o aumento da colheita de cana crua contribuem para o grande acúmulo da palha da cana-de-açúcar, esses altos índices de palhiço no campo têm gerado discussões sobre a melhor forma de utilizar essa biomassa remanescente e motivados pesquisas a fim de avaliar a rentabilidade do recolhimento desse palhiço para cogeração de energia para a indústria canavieira.

Furlani Neto (1994) cita algumas vantagens na manutenção do palhiço disponível no campo como cobertura morta, como por exemplo: Redução do impacto de gotas de chuvas sobre o solo e retenção da umidade, além da diminuição da temperatura do solo. A biomassa em decomposição favorece a atividade microbiana do solo e atua no controle de ervas daninhas, diminuindo o uso de defensivos agrícolas, acarreta em uma maior incorporação de matéria orgânica no solo e auxilia na diminuição do impacto ambiental, causado pelas queimadas dos canaviais. Esse mesmo autor também aponta as desvantagens na manutenção dessa biomassa em excesso no campo, são elas: Redução da capacidade operacional das colhedoras, redução da densidade de carga devido ao aumento do material vegetal e consequentemente demandando maior número de transportes para a mesma área, maior desgaste da colhedora, devido ao efeito abrasivo dessa impureza, dificuldade de realizar operações de cultivo e riscos constantes de incêndio no canavial.

Apesar de haver aspectos positivos e negativos com relação a manutenção ou retirada dessa biomassa do campo e de não existir pesquisas concretas que mostrem o real impacto que essa prática causa, a tendência é que cada vez mais indústrias comecem a utilizar o material remanescente da colheita mecanizada e busquem viabilizar economicamente o processo da retirada do palhiço do campo (Michellazo; Braunbeck, 2008). O Brasil desponta como grande potencial na produção de biocombustíveis capaz de atender as demandas, devido a grande produção no setor canavieiro que está diretamente relacionada à sua localização geográfica, condições hidrológicas e edafoclimáticas e ao desenvolvimento tecnológico nas últimas décadas. Por esses motivos, existem grandes vantagens nos investimentos da produção de biocombustíveis através do palhiço da cana-de-açúcar (Maluf, 2014).

Até o mês de setembro de 2013, a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) autorizou a operação de 342 usinas de etanol, de acordo com as atribuições dadas pela Lei n 12.490/2011, apenas uma autorização foi emitida em setembro. Duas autorizações foram revogadas, o que resulta em 340 usinas de etanol com operação autorizada. Até o dia 02 de agosto de 2013, as usinas autorizadas perfaziam uma capacidade total de aproximadamente 186 milhões de litros de etanol hidratado por dia e de 94 milhões de litros de etanol anidro por dia (Ministério de Minas e Energia - MME, 2014).

No Brasil as políticas públicas vigentes ignoram os ganhos ambientais proporcionados pela produção e uso em larga escala do etanol de cana-de-açúcar. Já os EUA continuam reconhecendo o valor socioambiental do biocombustível. O etanol da cana-de-açúcar que é o único etanol disponível em larga escala no mundo, considerado pelo governo americano um biocombustível avançado, sendo destacado em março de 2014 em um conjunto de propostas divulgadas pelo Governo do Estado da Califórnia, elaboradas para revisar e reforçar o chamado padrão de combustíveis de baixo carbono (Low Carbon Fuel Standard – LCFS) adotado por aquele estado (Unica, 2014).

4.2 Biomassa como fonte de biocombustível

A fonte mais abundante e barata de energia renovável é a biomassa, que pode produzir grandes quantidades de energia através de combustível gasoso, líquido e eletricidade (Gonçalves, 2002). Ripoli (2001) ressalta que o palhço desperta o interesse de investimentos por parte do setor canavieiro pelo fato de que o equivalente energético do palhço gira em torno de 1,2 barris de petróleo por tonelada. Essa biomassa está disponível no campo, e proporciona o equivalente de 9 a 32 t ha⁻¹ baseando-se no peso úmido da palha. Dependendo das condições da cultura, um hectare do canavial proporciona entre 11 a 33 equivalentes de petróleo.

Devido a grande quantidade disponível de biomassa da cana-de-açúcar, particularmente da palha e bagaço, para a produção de etanol de segunda geração e cogeração de energia elétrica, foi feita uma parceria entre o setor sucroenergético e a Esalq (Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”). O projeto pretende fazer um mapeamento das usinas na região Centro Sul do país. Serão considerados equipamento, maquinário e produção de energia, com intuito de avaliar o potencial de geração de etanol

e a forma de utilização dessa infraestrutura. Esse mapeamento será realizado em três etapas, e ao término do levantamento de dados, será proposto um modelo para aperfeiçoar o uso da biomassa da cana (Calori, 2014).

O Brasil está na rota da energia do futuro e a utilização de outras fontes de combustível está evoluindo com o passar do tempo. Diversos estudos estão sendo feitos atualmente para encontrar um modelo econômico que torne viável a utilização da celulose do bagaço e da palha da cana-de-açúcar, para aumentar a produção de etanol com menor expansão da área plantada e sem causar impactos adicionais ao ambiente. O etanol não precisa necessariamente ser utilizado como combustível, embora hoje em dia seja o principal produto do país, que usa cerca de 85% do mercado de etanol para combustível, o restante, uma parte é destinada para exportação e a outra para é destinada a indústria de cosmético, perfumes, tintas, solventes e aditivos para alimentação como o vinagre. Além do uso da biomassa para a produção do etanol, a biomassa da cana-de-açúcar há muito tempo já é usada na produção de energia elétrica (Cenbio, 2009).

Na década de 70, o uso da biomassa para geração de energia foi considerado uma alternativa viável para centrais elétricas de pequeno e médio porte, porém em meados dos anos 80 os preços do petróleo voltaram a cair, desencadeando desinteresse novamente por energias alternativas. Já na década de noventa, a biomassa ganhou destaque novamente no cenário energético mundial devido ao desenvolvimento de tecnologias mais avançadas de transformação, pela ameaça de esgotamento das reservas de combustíveis fósseis e pela incorporação definitiva da temática ambiental nas discussões sobre desenvolvimento sustentável (Muller, 2005).

Com a eliminação da queimada, grandes quantidades de resíduos estarão disponíveis no campo, para posterior uso na cogeração de energia, bem como na geração de etanol celulósico. A biomassa é uma das fontes para geração de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. É considerada pelos mercados internacionais, como uma das principais alternativas para diversificação da matriz energética e, conseqüentemente, reduz a dependência de combustíveis fósseis (Preto; Mortoza, 2010). Molina Jr. (1991) caracterizou o palhiço compondo-se de palha, folhas verdes, ponteiros e colmos, com predominância em massa de colmos. Nesse contexto, a cana-de-açúcar aparece com grande destaque, pois apresenta grande potencial energético fornecendo bastante matéria seca (palhiço) devido à eliminação das queimadas e a utilização da colheita mecanizada.

Vasconcelos et al. (2007) citam que a biomassa para fins energéticos é resultante da atividade fisiológica das plantas, que pode se comportar como uma grande fonte de energia, tendo a capacidade de transformar a energia solar, por meio do processo fotossintético, em energia química. Quando a biomassa é tratada de forma eficiente na indústria (seja para finalidade de combustível ou para geração de energia), essa energia armazenada e extraída das ligações químicas, será disponibilizada da forma mais eficiente possível, evitando perdas de energia durante o processo de produção.

A utilização da biomassa na geração de energia, produção de vapor e combustíveis, é de grande interesse e apresenta atrativos na economia do país. Mas o grande gargalo desse seguimento é aliar a redução do custo da matéria prima, incluindo os custos de coleta e transporte (Jannuzzi, 2003). Genovese et al. (2006) citam a queima direta da biomassa para produção de energia térmica sendo, portanto a biomassa uma fonte primária de energia. Outra forma é através do processamento da biomassa para produção de combustíveis, como a gaseificação, ou de processos biotecnológicos, como a fermentação.

Atualmente vários tipos de biomassa podem ser empregada na produção de energia, entre elas destacam-se a madeira, a lenha, serragem e cavacos e o bagaço de cana-de-açúcar que também é muito utilizado, devido à grande produção brasileira de açúcar e álcool, atualmente o palhiço vem sendo muito explorado (Genovese et al. 2006).

Cada tonelada de cana-de-açúcar processada requer, em média, 12 MWh, o que é facilmente gerado nos sistemas convencionais de cogeração instalados nas usinas. O aumento do preço da energia vendida pelo governo, que conduziu as usinas à autossuficiência e à valorização do bagaço para a venda e para outros fins, foi o que motivou as indústrias a explorar mais intensamente a comercialização de excedentes de energia gerada (Dantas, 2010).

Estima-se que somente a bioeletricidade sucroenergética produzida com o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, tenha potencial para gerar excedentes de mais de 13 mil MW (Megawatt) médios anual até a safra 2020/21, sendo a palha responsável por quase 50% desse potencial (Unica, 2012). De acordo com Hassuani et al. (2005), a maior quantidade de energia produzida pelas usinas canavieiras é utilizada para consumo próprio, gerada em caldeiras de baixa pressão e por ser de baixo ganho energético, a adição do palhiço não expressa resultados satisfatório. Porém, se esses equipamentos fossem

substituídos por caldeiras de alta pressão e a energia fosse gerada através do bagaço e do palhiço, a produção seria em dobro.

Ferreira (2014) comenta sobre os aspectos favoráveis e desfavoráveis da cana-de-açúcar como matéria-prima obtida de canavial sem queima prévia, em virtude da permanência de restos culturais (palha e ponteiro) no campo: Os pontos positivos são os seguintes: A existência de recursos em grande quantidade e disponibilidade em diversas formas e grande variedade de uso, produção da matéria-prima descentralizada, em regiões que apresentam condições propícias para a produção, menor poder de poluição em relação aos combustíveis fósseis, colheita de grande quantidade de biomassa por causa do grande desequilíbrio ecológico em grandes proporções. E as desvantagens são: Baixa quantidade de energia por quantidade de biomassa; só é viável quando o preço do petróleo se eleva muito; problemas de armazenamento e transporte devido às formas que esse material é enfardado (prismático ou cilíndrico); produção descentralizada, fazendo com que haja uma necessidade de boa logística, proporcionando o escoamento do produto para os grandes centros; para ser eficiente é preciso de um sistema de pré-secagem devido à quantidade de água contida na biomassa.

Manfrin e Velazquez (2011) afirmam que a grande dificuldade na utilização do palhiço para cogerar energia é a questão logística. No Brasil e nos países produtores de biomassa, tem sido desenvolvidas pesquisas, pois o poder calorífico do palhiço é bem superior ao do bagaço e a deterioração do palhiço na lavoura representa perdas de biomassa e consequentemente perdas financeiras. A maioria das usinas já começou a estudar a viabilidade do transporte do palhiço da lavoura até a indústria, pois a dificuldade se encontra na retirada do palhiço do solo. Algumas usinas preferem enfardar o palhiço na forma cilíndrica e outras na forma de um quadrado, o objetivo é achar uma maneira em que o volume e a densidade dos fardos compensem o transporte.

Atualmente é válido estudar as características fundamentais e o que influencia o palhiço no campo. A quantidade de palhiço excedente no campo após as operações de colheita da cana-de-açúcar vai depender de muitas variáveis, como por exemplo: Idade do canavial, característica varietal, tipo da colheita (manual ou mecanizada) e o tempo decorrido entre a operação de colheita dos colmos e o recolhimento do palhiço (Corrêa Neto, 2001).

4.3 Palhiço da cana-de-açúcar

De acordo com Ripoli e Ripoli (2004), é comum empregar o termo palha, para denominar o resíduo da colheita mecanizada, quando o termo técnico correto seria palhiço, pois esse material não se constitui apenas de folhas da cana-de-açúcar com baixo grau de umidade, se constitui também, segundo a definição de Ripoli (1991), de folhas verdes, palhas, ponteiros, colmos ou outras frações, rebolos com suas frações, com terra a eles agregados (Figura 1).

Orlando Filho et al. (1998) afirmam que a adição da matéria orgânica no solo promove a formação e a estabilização dos constituintes do solo melhorando suas características físicas e químicas em função de facilitar a aeração, infiltração de água e sua retenção. Ripoli (2002) afirma que a cultura pode gerar biomassa da ordem de 15 a 30% em peso da parte aérea da planta dependendo das condições de campo (número de cortes, variedade e fatores edafoclimáticos).

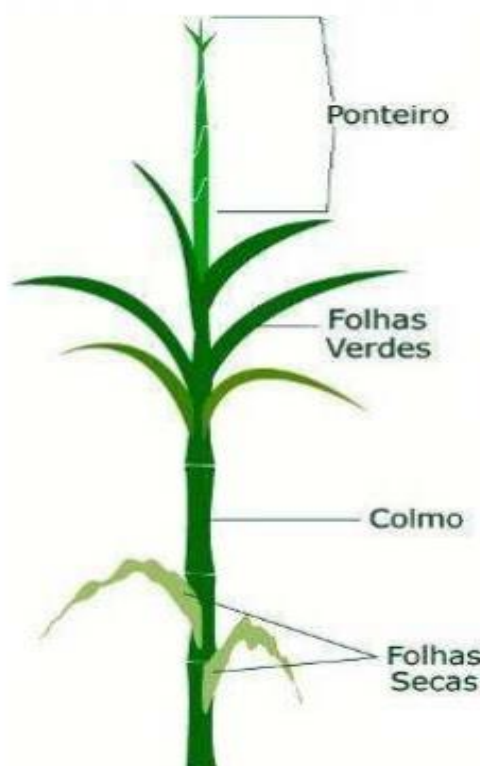


Figura 1. Representação dos constituintes da planta da cana-de-açúcar.

Fonte: CTC

Velini e Negrisoni (2000) relatam que a camada de palhico depositada sobre o solo pode ser superior a 20 t ha⁻¹. De acordo com Pierossi e Fagundes (2012), os valores médios que temos em canaviais estão entre 12 a 15 toneladas de palha por hectare. De acordo com Franco (2003), existe uma variabilidade muito grande em relação à produtividade do palhico nos tratamentos estudados de recolhimento da biomassa remanescente de cana-de-açúcar a granel, obtendo a média estimada de palhico úmido na área experimental, de 24,13 t ha⁻¹. De acordo com a autora, a quantidade de palhico encontrada na literatura por diversos estudos variaram entre 9,70 t ha⁻¹ e 33,85 t ha⁻¹.

Em pesquisas feitas nas usinas canavieiras do Estado de São Paulo, Manechini et al. (2005) concluíram que o solo com menos de 7,5 t ha⁻¹ de palhico, necessitou de cultivo mecânico ou controle químico de plantas daninhas. E de acordo com esses mesmos autores a recomendação seria que aproximadamente 65% do volume total de palhico disponível no campo sejam mantidas sobre o solo, para auxiliar na redução da erosão, contribuir na ciclagem dos nutrientes e manter um nível ótimo de umidade no solo. Abramo Filho et al. (1993) observaram que, em um hectare de cana-de-açúcar, com produção média 100 t de colmos, resulta em cerca 15 t de palhico.

A manutenção da biomassa em excesso nas áreas canavieiras facilita os desenvolvimentos de problemas como retardamento na brotação devido à menor incidência de luz, aliada a diminuição da temperatura do solo e aumento da umidade com consequente proliferação de doenças, dificuldades na operação de máquinas agrícolas, imobilização de nutrientes, abalo de soqueiras, e a grande incidência de pragas (Franco, 2003).

Ávarez e Castro (1999) também apontam pontos negativos no depósito total do palhico sobre o solo, o aumento de pragas é um deles, pois essa condição favorece o desenvolvimento da cigarrinha da raiz e broca, as incidências de doenças como as podridões das soqueiras, as irregularidades da brotação da cana-de-açúcar, a queda de produtividade em variedades suscetíveis ao palhico, o difícil manuseio deste resíduo em áreas não mecanizáveis e a necessidade obrigatória de colhedora pela dificuldade de se utilizar corte manual em canaviais sem queima.

Durante a colheita, o palhicho é despejado pela colhedora sobre a superfície do solo em camadas desuniformes, depois é deixado no solo para secagem por aproximadamente 10 dias, para que alcance uma umidade média de 20% (variando de 15 a 30%) (Ripoli, 2002). De acordo com Ripoli (2001), a escolha do tipo de sistema de recolhimento de palhicho no campo a ser adotado depende de muitos fatores como exemplo: quantidade de material mineral no palhicho, distribuição do palhicho na área colhida, densidade do material e tipo de transporte.

Decidir a quantidade de palhicho que as máquinas devem aleirar e enfardar no campo, e qual volume deverá ser deixado na área, devido aos seus benefícios agronômicos de conservação do solo, são pontos muito importantes a serem considerados. E diversas variáveis influenciam essa mistura de informações (Unica, 2011).

De acordo com Medeiros (2001), áreas colhidas sem queima prévia (cana crua) apresentam menor necessidade do uso de defensivos agrícolas para controle de ervas daninhas. O recolhimento de até 50% do volume total do palhicho disponibilizado no campo não interfere na conservação do solo, possibilitando a retirada de até esse volume de palha sem causar prejuízos. Deste modo torna-se possível o recolhimento parcial do palhicho disponível no campo.

Atualmente a biomassa da cana-de-açúcar é considerada um subproduto da colheita mecanizada, agregando muito valor ao setor sucroalcooleiro devido ao seu uso como fonte de energia. Tolentino et al. (2007) advertem que além do aspecto econômico positivo, a indústria colabora com a preservação do meio ambiente e valoriza seus produtos no Brasil e no exterior, aproveitando a biomassa residual da colheita mecanizada da cana-de-açúcar. No entanto, as operações de recolhimento do palhicho da cana-de-açúcar enfrentam dificuldades, acerca dos altos custos das operações de enfardamento, adensamento, transporte desse material, de modo que é de grande importância que o palhicho seja bem compactado, para aumentar a eficiência e diminuir os custos de transporte dos fardos (Ripoli; Gamero, 2007). Romão Junior (2009) cita que os investimentos para a recuperação da palha deixada no campo estão cada vez mais intensos visando, além de uma melhor produtividade, a utilização da palha juntamente com o bagaço na produção de energia elétrica. Para Melo (2009) essas dificuldades também estão diretamente relacionadas ao uso de máquinas e equipamentos de baixa capacidade operacional e custos elevados. De acordo com resultados obtidos por Michelazzo e Braunbeck (2008), os fatores que mais influenciam o custo do recolhimento do palhicho

são: a jornada de trabalho, a eficiência global da operação, o valor de aquisição dos equipamentos e o consumo de combustível.

Hassuani et al. (2005) fizeram estudos para avaliar a quantidade de biomassa antes e depois da colheita da cana-de-açúcar com objetivo de estimar o volume de palhico de cada variedade em três diferentes períodos de cultivo. As avaliações foram feitas em duas regiões diferentes do Estado de São Paulo (Ribeirão Preto e Piracicaba), com três variedades de cana-de-açúcar (SP79-1011, RB72454, SP80-1842) e os três estágios de corte foram: Cana Planta 18 meses, segundo corte e quarto corte. A pesquisa foi realizada com três variedades em base seca, e os autores concluíram que, a variedade SP79-1011 apresentou uma média maior de matéria seca (15,60%) em relação às outras variedades, já para a produtividade em toneladas por hectares das variedades, em média 14% é palhico que a cana-de-açúcar vai disponibilizar em campo após a colheita.

Carvalho (2011) cita que para transformar o palhico da cana-de-açúcar em combustível é necessário que esse material passe por um sistema de processamento (quebra da estrutura celulósica), para gerar o produto final. Indústrias que operam nesse seguimento devem obter sistema de alimentação de caldeiras geradoras de vapor, sendo necessário que a biomassa esteja disponível em partículas pequenas e com baixa umidade.

4.4 Desempenho operacional de máquinas de enfardamento

A enfardadora é uma máquina que coleta o material da leira e comprimi-o em um pacote fácil de ser manuseado (fardo) (Perea et al. 2012). Devido à baixa densidade do palhico, o ideal é que seja feito um adensamento, onde o volume comparando-se com o inicial é reduzido em 15 vezes, essa prática visa reduzir os custos do transporte dos fardos para a indústria. O enfardamento é um sistema bastante popular, e as máquinas são utilizadas nas operações de enfardamento de palha de cana e outros materiais fibrosos (Mello, 2009).

Pierossi e Fagundes (2012) relatam que as enfardadoras, tracionadas e acionadas por tratores, são classificadas de acordo com a forma e o tamanho dos fardos produzidos, sendo os tipos mais comuns: enfardadoras de fardos cilíndricos e enfardadoras de fardos prismáticos retangulares (grandes e pequenos), e os mesmo autores afirmam que os fardos retangulares grandes apresentam pesos entre 450 kg e 470 kg. As

dimensões dos fardos produzidos variam muito dependendo do tipo de enfardadora e do modelo e projeto do fabricante do implemento agrícola, essas dimensões dos fardos prismáticos podem variar de 0,45 m a 1,20 m de largura por 0,35 m a 0,90 m de altura com comprimento de 0,50 m podendo chegar até 2,50 m. Já as enfardadoras cilíndricas produzem fardos com dimensões que variam de 0,60 m a 1,80 m de diâmetro e largura de 1,20 m até 1,60 m.

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 a 8 km h⁻¹, sendo a velocidade estimada pelos fabricantes está na ordem de 5,5 km h⁻¹.

O recolhimento do palhço por meio de uma enfardadora cilíndrica foi estudado por Bizuti (2003) sob o ponto de vista operacional e energético. Neste estudo utilizou-se o aleirador com uma e duas passadas, objetivando verificar também a menor contaminação por terra, e de acordo com autor, a produtividade média de palhço foi de 27 Mg ha⁻¹, apresentando poder calorífico de 18,4 MJ kg⁻¹. A massa específica média dos fardos foi de 168,3 kg m³, quando o aleirador passou apenas uma vez, e 191,6 kg m³, quando o aleirador passou duas vezes, o autor também avaliou a capacidade efetiva da operação de enfardamento para uma e duas passadas do ancinho foi de 83,1 Mg h⁻¹ e 72,1 Mg h⁻¹, respectivamente. O consumo de combustível foi 0,18 L Mg⁻¹ e 0,2 L Mg⁻¹, para uma e duas passadas do aleirador. No caso da enfardadora, a capacidade efetiva apresentada foi 8,5 Mg h⁻¹ e 12,9 Mg h⁻¹, respectivamente, para uma e duas passadas do aleirador. Por sua vez, o consumo de combustível da operação de enfardamento foi 0,64 L Mg⁻¹ e 0,43 L Mg⁻¹, respectivamente, para uma e duas passadas. O consumo de combustível do trator agrícola engloba um dos custos mais elevados nas operações agrícolas sendo que o total consumido está diretamente ligado a fatores como a adequação e condição do conjunto trator-equipamento, profundidade da operação, tipo e condição de solo, número total de operações utilizadas no processo de preparação do solo dentre outros (Montanha et al. 2011).

Ripoli (2004) avaliou o aleiramento e enfardamento de palhço e determinaram que a capacidade efetiva dessa operação fosse de 83 t ha⁻¹ e 5,71% de material mineral, para o aleiramento simples, já para o enfardamento determinou a massa específica dos fardos como 206 kg m⁻³ e capacidade efetiva como 10,78 t h⁻¹, e para ambas as operações a eficiência energética foi de 99,56 %.

Estudando o desempenho operacional de uma enfardadora de uma enfardadora de forragem (fardos cilíndricos) no recolhimento de biomassa remanescente da colheita da cana-de-açúcar, Ripoli et al. (1991) observaram 26,77 Mg ha⁻¹ de resíduos no solo, capacidade operacional de 2,89 Mg h⁻¹ ou 0,61 ha h⁻¹ e massa específica dos fardos de 184,06 kg cm³.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Campo experimental

O ensaio foi conduzido no mês de fevereiro de 2014, na área de uma usina canavieira, localizada no município de São Miguel dos Campos – AL, na região da zona da mata no estado de Alagoas, tendo como coordenadas geográficas aproximadas de Latitude: 9° 48' 24" S, Longitude: 36° 6' 55" W, altitude de 97 metros. O clima é classificado como tropical chuvoso com verão seco, apresentando precipitação anual de 1.634.2 mm e temperaturas entre 34° e 24°C em média. O tipo de solo foi classificado como Latossolo amarelo Distrocoeso típico textura argilosa A moderado de textura argilosa (Embrapa, 2010), onde foram cultivadas as variedades SP791011 e RB92579 (local dos ensaios), plantadas em espaçamento entre linhas de um metro, sétimo corte.

5.2 Máquinas e equipamentos

Para a execução do experimento foram utilizadas duas enfardadoras de fardos prismáticos retangulares, com tamanho e linha de captação de palhicho diferentes. Segue as especificações na Tabela 1:

Ainda como partes da estrutura de implementos e das máquinas que participaram do experimento, também foram utilizadas as seguintes máquinas: Ancinho aleirador New Holland - Modelo H5980¹, dois Tratores New Holland 220 cv - Modelo

¹ A citação de qualquer marca comercial, não indica recomendação por parte do autor.

T7240, um Trator New Holland 75 cv - Modelo TL 75E e uma carreta recolhadora de fardos Mil Stak - Modelo PT 2012.

Tabela 1. Especificações dos modelos de enfardadoras utilizadas no experimento.

Especificações	Modelos	
Enfardadoras	Máquina 1	Máquina 2
Dimensões dos fardos		
Largura	120 cm	120 cm
Comprimento máximo	250 cm	250 cm
Altura	90 cm	90 cm
Acionamento principal		
Proteção	Parafuso fusível, embreagem de giro livre e embreagem deslizante.	
Dispositivo coletor		
Largura	2,25 cm	2,40 cm
Sistema de alimentação		
Alimentador	Pick-up	Pick-up
Proteção do alimentador	Embreagem de segurança	Embreagem de segurança
Proteção dos garfos	Parafuso fusível	Parafuso fusível
Sistema de amarração		
Tipo	Nó duplo	Nó duplo
Número de fios de amarração	6	6
Alerta de funcionamento do sistema de amarração	Monitor e visual	Monitor e visual
Dimensões da enfardadora		
Largura	2,58 m	3,28 cm
Comprimento (sistema de descarga fechado)	7,23 m	7,65 cm
Altura	3,10 m	3,31 cm

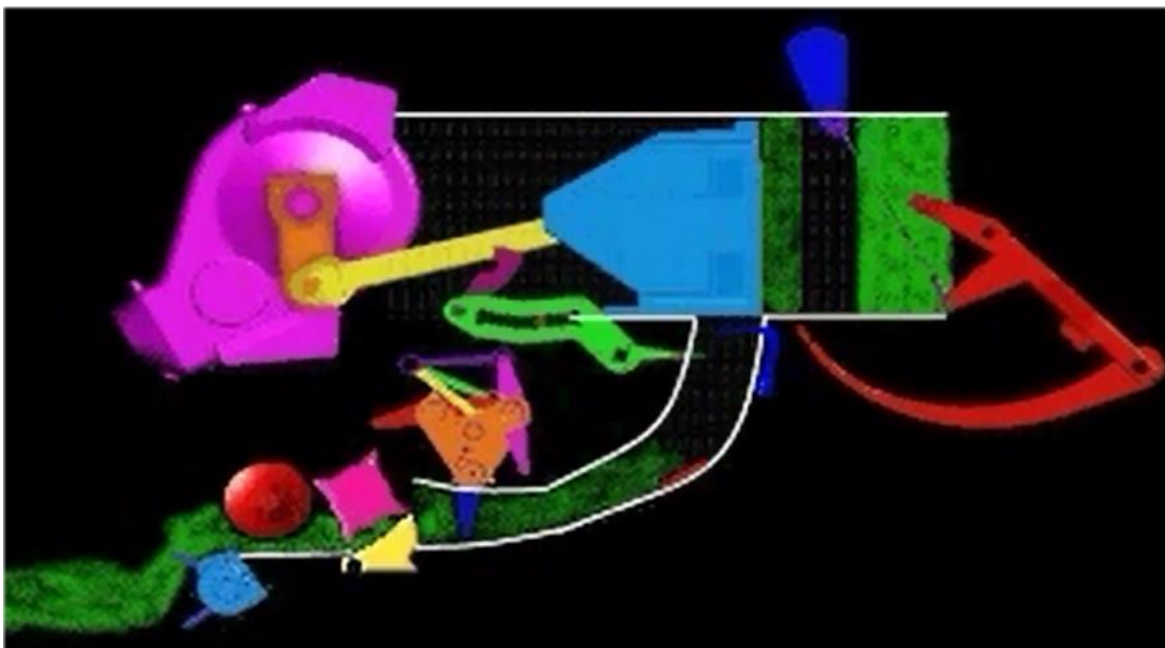


Figura 2. Esquema de enfardamento prismático.

5.3 Material utilizados para amostragem

Foram utilizados os seguintes materiais no experimento: dinamômetro – Marca MK Controle, modelo MK 1030 1000 kg, resolução 0,1 kg, Display em LED que auxiliou a pesagem dos fardos, GPS Garmin Etrex 10 Trilha Glonass em que foi possível obter as distâncias entre fardos e velocidade das máquinas, cronômetro Vollo Stopwatch para contabilizar os tempos de produção de cada fardo, medidor digital de umidade Delmhorst que teve como objetivo mensurar a umidade no palhiço, duas provetas graduadas de 2000 ml para medir o consumo de diesel nos tratores; amostrador de impureza cilíndrico (confeccionado na usina canavieira) com finalidade de sondar os fardos e uma furadeira de impacto GSB 20 2 1/2" 800W 220V Bosch para acoplar o amostrador de impureza. Outros materiais utilizados no experimento foram: Sacos plásticos, fita crepe, cabos de aço, fita isolante, trena e pranchetas.

5.4 Descrição dos tratamentos

Foram ensaiados dois modelos de máquinas enfardadoras, em que a biomassa recolhida foi o palhiço da cana-de-açúcar (três dias após a colheita mecanizada),

em três diferentes regulagens de recolhimento do palhiço, definido pela regulagem do implemento ancinho aleirador. As máquinas foram avaliadas e comparadas em diferentes volumes de palhiço na leira. Os tratamentos consistiram em:

T1 = MÁQUINA 1 - Regulagem 1 (Volume de palha aleirado, 50% do total)

T2 = MÁQUINA 1 - Regulagem 2 (Volume de palha aleirado, 70% do total)

T3 = MÁQUINA 1 - Regulagem 3 (Volume de palha aleirado, 90% do total)

T4 = MÁQUINA 2 - Regulagem 1 (Volume de palha aleirado, 50% do total)

T5 = MÁQUINA 2 - Regulagem 2 (Volume de palha aleirado, 70% do total)

T6 = MÁQUINA 2 - Regulagem 3 (Volume de palha aleirado, 90% do total)

Para cada tratamento foram feitas seis leiras de 370 metros, e em cada repetição as enfardadoras produziram fardos de acordo com a disponibilidade de palhiço na leira. Os tratamentos corresponderam ao aleiramento de 50, 70 e 90% da quantidade total de palhiço disponível em campo, e os três diferentes volumes de palhiço nas leiras foram definidos de acordo com as regulagens no aleirador (Figura 3). Essas regulagens foram delimitadas antes do início dos ensaios.



Figura 3. Regulagem do aleirador realizada para obter o volume de recolhimento do palhiço em cada tratamento.

5.5 Velocidade e distância percorrida para formação dos fardos

Foi utilizado um GPS Garmin Etrex 30 para medir a distância entre os fardos de cada tratamento. Sempre que a máquina produzia um fardo, era marcado um ponto no GPS, depois esses dados eram descarregados no computador para, assim, obter as distâncias entre cada fardo nas leiras dos respectivos tratamentos, através do programa GPS TrackMaker. A velocidade média das máquinas também foi coletada através do GPS.

5.6 Volume de palha na área do experimento

A determinação do volume de palha por hectare ($t\ ha^{-1}$) (Figura 4), foi feita com o auxílio de um gabarito de um m^2 , adaptado da metodologia de Ripoli (1991). Na área escolhida para a realização do ensaio das máquinas, o gabarito era arremessado em pontos aleatórios, sendo coletadas 15 amostras de palhiço a fim de obter o volume de palha disponível no campo após a colheita mecanizada. Essas amostras foram pesadas descontando o peso do saco usado na mensuração. Todo o palhiço que estava contido na área de amostragem foi recolhido com cuidado a fim de evitar levar excesso de impureza mineral.



Figura 4. A= Área de amostragem ($1\ m^2$) do palhiço disponível no campo, antes da operação de aleiramento da palha; B = Pesagem da amostra coletada de palhiço utilizando balança digital.

5.7 Massas de palhço não manipuladas pelas operações de aleiramento

Para cada área correspondente a uma repetição (duas leiras) foram coletadas 10 amostras do palhço remanescente, metodologia adaptada de Ripoli (1991), sobre a área coberta após o aleiramento, porém, fora da leira produzida. Essa amostragem teve como objetivo determinar a quantidade de palhço que ficou disponível no campo após o aleiramento da palha. Com isso foi possível obter a quantidade em $t\ ha^{-1}$ que foi aleirada e o quanto de biomassa ficou no campo após a formação das leiras.

5.8 Massas de palhço na leira antes e após o enfardamento

A avaliação foi composta de duas etapas. Na primeira, já com as leiras formadas, foram feitas seis amostragens em pontos aleatórios, em que, com o auxílio de uma trena, media-se 1 metro da leira e pesava-se todo esse material presente na área de avaliação. Na segunda etapa, após a enfardadora passar na leira enfardando o palhço, e sempre nos locais aproximados da primeira amostragem, era determinado à quantidade de palhço remanescente na leira, ou seja, a quantidade de palha que restou após a máquina passar recolhendo essa biomassa (Figura 5). Foram feitas mais seis amostras em cada volume de leira, para obter resultados que mostram a capacidade em porcentagem de recolhimento de cada máquina.



Figura 5. Amostragem do palhço na leira após a operação de enfardamento do palhço.

5.9 Distância entre leiras

A distância entre leiras (Figura 6) foi feita com o auxílio de uma trena. Em cada tratamento foram realizadas seis repetições. Essas distâncias foram obtidas sempre posicionando a trena de centro a centro das leiras.



Figura 6. Determinação da distância entre leiras.

Após a regulagem do ancinho aleirador, foram definidas as distâncias entre as leiras para cada tratamento, como mostra na Tabela 2 as médias referentes às distâncias.

Tabela 2. Médias referentes às distâncias entre leiras nos três tratamentos do ensaio.

Distância das leiras entre os tratamentos	
V1	7,38
V2	7,23
V3	8,31
Distância das leiras entre máquinas	
M1	7,54
M2	7,74

5.10 Altura, largura e comprimento das leiras

As dimensões das leiras foram obtidas com o auxílio de uma trena, coletando dados em seis repetições e em todos os tratamentos.

Para obtenção da altura, a trena era posicionada na base da leira e medida até o dossel, a largura era obtida medindo cada extremidade da leira, e o comprimento foi obtido através da utilização do GPS Garmin Etrex 30.

5.11 Determinações de tempos e movimentos das máquinas

Com o auxílio de um cronômetro digital foi contabilizado o tempo de produção de cada fardo. Sempre que era feita a amarração de um fardo e a máquina acusava no monitor, era apontado na planilha o tempo correspondente à produção do mesmo, e assim sucessivamente até o tratamento ser completado.

Os períodos correspondentes à parada das máquinas, também foram obtidos através do cronômetro digital. Sempre que as máquinas iam para a manutenção ou havia a quebra de alguma peça, era contabilizado na planilha o tempo que levou para a solução do problema, obtendo assim, o prazo que as máquinas permaneceram ociosas em campo.

As manobras realizadas nas cabeceiras do lote também eram cronometradas. Sempre que a máquina passava de uma leira para outra ou trocava de lote, esse tempo era anotado na planilha como tempo de manobra.

Ao final, esses períodos (paradas e manobras) eram descontados do tempo total de trabalho da máquina em cada tratamento, com o intuito de obter o trabalho efetivo.

5.12 Umidade no material enfardado

O teor de umidade (%) nos fardos foi obtido através de um medidor digital de umidade (Figura 7). Em cada fardo amostrado foram feitas quatro leituras do teor de umidade, em diferentes pontos, para tornar a leitura mais homogênea. O medidor digital era composto por uma haste de 20 cm, onde era possível penetrá-la no fardo.



Figura 7. Medidor digital de umidade.

5.13 Impureza mineral do material enfardado

Os fardos foram selecionados em campo, transportados (Figura 8) para o centro de distribuição da empresa e individualmente amostrados por uma sonda, obtendo assim, a impureza mineral (quantidade de terra contida nos fardos).



Figura 8. Recolhimento dos fardos selecionados para amostragem de impureza mineral.

O método de amostragem de impureza mineral foi feito através do uso de uma furadeira, em que foi adaptada uma sonda cilíndrica na ponta do equipamento. Em seguida eram feitas amostragens nos fardos de cada tratamento (três furos em locais diferentes) (Figura 9). As amostras coletadas foram colocadas em sacos de papel, posteriormente foram lacradas, identificadas e enviadas para o laboratório.



Figura 9. A – Amostragem dos fardos com o auxílio de uma sonda adaptada a uma furadeira. B – Separação do material coletado pela sonda, para posterior análise em laboratório.

5.13.1 Análise em laboratório da impureza mineral

As amostras coletadas nos fardos de cada tratamento foram separadas, lacradas e identificadas e posteriormente encaminhadas ao laboratório Central Analítica na cidade de Maceió – AL, onde foi feita a análise de impureza mineral utilizando o método da Mufla (Figura 10). O método consiste na queima completa dos constituintes orgânicos do palhço em mufla até calcinação. O procedimento inclui: fazer limpeza completa do cadinho a ser utilizado; transferiu-se de 10 a 15 gramas da amostra de palhço para o cadinho; pesou o cadinho com a amostra e registrou o valor. Com isso, introduziu o cadinho na mufla com temperatura inicial de 100 °C, sendo aumentada até 800 °C, permanecendo por duas horas. Posteriormente desligava-se a chave geral da mufla e aguardava a redução da temperatura para 200 °C. Depois eram transferidos para a bandeja, resfriados e pesados.



Figura 10. Mufla do laboratório Central Analítica.

Para obter a quantidade de impureza mineral em porcentagem foi utilizada a seguinte equação:

$$I = \frac{P}{P} * \quad (1)$$

Em que;

I_m = Percentual de impureza mineral (%)

P_1 = Peso da cápsula + a amostra “in natura”

P_2 = Tara da cápsula

P_3 = Peso da amostra “in natura” ($P_1 - P_2$)

P_4 = Peso da cápsula + amostra incinerada

P_5 = Peso da amostra incinerada ($P_4 - P_2$)

Os valores são expressos em porcentagem, e o laboratório cita que para transformar em kg ton^{-1} , multiplica-se o valor obtido por 10, posteriormente esse valor foi transformado em kg por fardo (peso real da impureza mineral em cada fardo).

5.14 Massa úmida de cada fardo

O peso dos fardos foi determinado através de uma balança digital (Figura 11) e de acordo com a relação massa/volume foi calculada a massa específica dos fardos.



Figura 11. Pesagem dos fardos com o auxílio de uma balança digital.

5.14.1 Volume de cada fardo

O volume correspondente a cada fardo foi determinado através da equação a seguir:

$$V = (A \cdot C \cdot L) \quad (2)$$

Em que;

V = Volume (cm³)

A = Altura (cm)

L = Largura (cm)

C = comprimento (cm)



Figura 12. Determinação das medidas do fardo.

5.15 Massa seca dos fardos

Para obter a massa seca foi necessário calcular a impureza mineral e a umidade, ambas medidas em kg, e após esse procedimento, o valor obtido foi descontado do peso total do fardo. Para obter o peso da impureza mineral por fardo foi utilizada a seguinte equação:

$$M_s = \frac{P_f - P_i}{p} \quad (3)$$

Em que;

Ms = Massa seca dos fardos

Pf = Peso dos fardos (kg)

Pimp = Peso da impureza (kg)

Para obter a umidade em kg, utilizou a seguinte equação:

$$U (g) = \frac{U}{P_f} \quad (4)$$

Em que;

U (kg) = Umidade (kg)

U = Umidade (%)

Pf = Peso do fardo (kg)

O peso seco dos fardos foi obtido através da seguinte equação:

$$P_s = (P - P_{i p} - U) \quad (5)$$

Em que;

Ps = Peso seco (kg)

P = Peso total do fardo (kg);

Pimp. = Peso da impureza (kg)

U = Umidade (kg)

5.16 Massa específica dos fardos

Os fardos selecionados foram marcados com tecidos de cores diferentes com a finalidade de diferenciar os tratamentos (Figura 13).



Figura 13. Demarcação dos fardos selecionados por tratamento.

5.16.1 Determinações das massas específicas dos fardos

A massa específica foi determinada através do volume e da massa total de cada fardo, obtida através da equação a seguir:

$$M = \frac{P_s}{V} \quad (6)$$

Em que;

M = Massa específica (kg m³)

P_s = Peso seco (kg)

V = Volume (m³)

5.17 Desempenho operacional das máquinas

5.17.1 Consumo de combustível do trator

Para a análise do consumo de combustível foi utilizada a metodologia da proveta proposta por Ripoli (1991). Os tanques de combustível dos tratores utilizados nos ensaios foram completados com diesel até o limite máximo antes do início da operação, e em local mais plano possível (Figura 14). Para essa determinação foi utilizada uma proveta graduada (2000 mL), completando o tanque a cada tratamento

avaliado. A quantidade de diesel necessária pra chegar ao nível máximo do tanque de combustível dividido, pela quantidade de fardos produzidos correspondeu ao consumo de combustível por fardos em cada tratamento.



Figura 14. A – Ensaio de consumo de combustível, proveta graduada utilizada para abastecer o tanque de combustível dos tratores. B – Abastecimentos dos tanques de combustíveis dos tratores com diesel.

Para cálculo de desempenho operacional do conjunto trator-enfardadora foi utilizada a metodologia proposta por Mialhe (1974). As variáveis determinadas foram: Capacidade de campo teórica e Capacidade de campo operacional.

5.17.2 Capacidade de campo teórica (CCT)

A capacidade de campo teórica é obtida a partir das dimensões dos órgãos ativos da máquina, especificamente largura de trabalho e velocidade de deslocamento, e é obtido através da seguinte equação:

$$C_{ct} = \frac{L \cdot V}{1000} \quad (7)$$

Em que;

C_{ct} = Capacidade de Campo teórica ($ha \ h^{-1}$)

L = Largura de trabalho (m)

V = Velocidade ($km \ h^{-1}$)

5.17.3 Capacidade de campo operacional (CCO)

É a relação entre a área ou produção obtida e o tempo total que o conjunto tratorizado permaneceu no campo, ou seja, leva em conta a somatória do tempo efetivo com a somatória de todos os tempos de interrupção que ocorreram durante a operação.

$$Cco = \frac{A}{T} \quad (8)$$

Em que;

Cco = Capacidade operacional (ha h⁻¹)

A = Área (ha)

Tm= Tempo máquina (h)

5.18 Análise Estatística

O delineamento estatístico utilizado foi o inteiramente casualizado, utilizando duas máquinas de marcas diferentes e três diferentes volumes de recolhimento do palhiço da cana-de-açúcar com seis repetições, em fatorial 2x2 para consumo de combustível e 3x2 para as demais variáveis analisadas. A análise estatística foi efetuada pelo sistema SISVAR. Os dados obtidos através dos ensaios das máquinas foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período dos ensaios, o teor de umidade no palhio variou de 7,2 a 22,5% no decorrer do dia em que foram realizadas as operações de enfardamento (Figura 15). O alto teor de umidade no início do dia fez com que as máquinas enfardadoras tivessem dificuldades em realizar as operações de recolhimento do palhio da cana-de-açúcar, já que a umidade no palhio é um fator limitante para a realização da operação de recolhimento dessa biomassa. Molina Jr. et al. (1995) verificaram aspectos econômicos e operacionais para o enfardamento do palhio por meio de uma enfardadora de forragem, visando seu aproveitamento energético. A variedade da cana-de-açúcar foi a SP70-6163 em canaviais de 2º e 3º cortes. O palhio apresentou umidade média de 24% e poder calorífico superior e inferior da ordem de $18,08 \text{ MJ kg}^{-1}$ e $16,66 \text{ MJ kg}^{-1}$.

De acordo com os fabricantes das máquinas, o enfardamento do palhio deve ser realizado no período de 4 a 10 dias após a colheita mecanizada durante o período do dia, com a intenção de garantir a secagem das folhas e que o material enfardado esteja com umidade entre 10 a 15%, podendo em alguns casos devido às condições climáticas do local, chegar a valores de até 5%.

O alto teor de água no palhio no início dos ensaios foi consequência das chuvas que caíram na região dias antes da realização do experimento. Nessa condição, as máquinas enfardadoras só puderam iniciar suas atividades a partir das 09h30min da manhã (três dias após a colheita mecanizada), isso porque a operação de aleiramento do palhio da cana-de-açúcar fez com que essa biomassa fosse revolvida, com isso a camada mais úmida na parte inferior fossem expostas na superfície sendo condicionada a secagem mais rápida em contato com a ação do vento.

Das 10h até às 17h, o teor de umidade do palhiço permaneceu na faixa ideal de trabalho, de acordo com a recomendação do fabricante, mas como o solo em alguns pontos do talhão encontrava-se ainda muito úmido, o palhiço ainda permaneceu com umidade alta, mesmo depois de aleirado, e isso fez com que a Máquina 1 tivesse dificuldades nas operações de enfardamento, não conseguindo recolher eficientemente a biomassa disponível na leira. Innocente, (2011) em experimento realizado na Usina São Manuel encontrou umidade média do palhiço de 28,70%, e poder calorífico inferior de 12,11 MJ kg⁻¹, e conclui que o potencial energético é melhor quanto menor for à umidade do material enfardado.

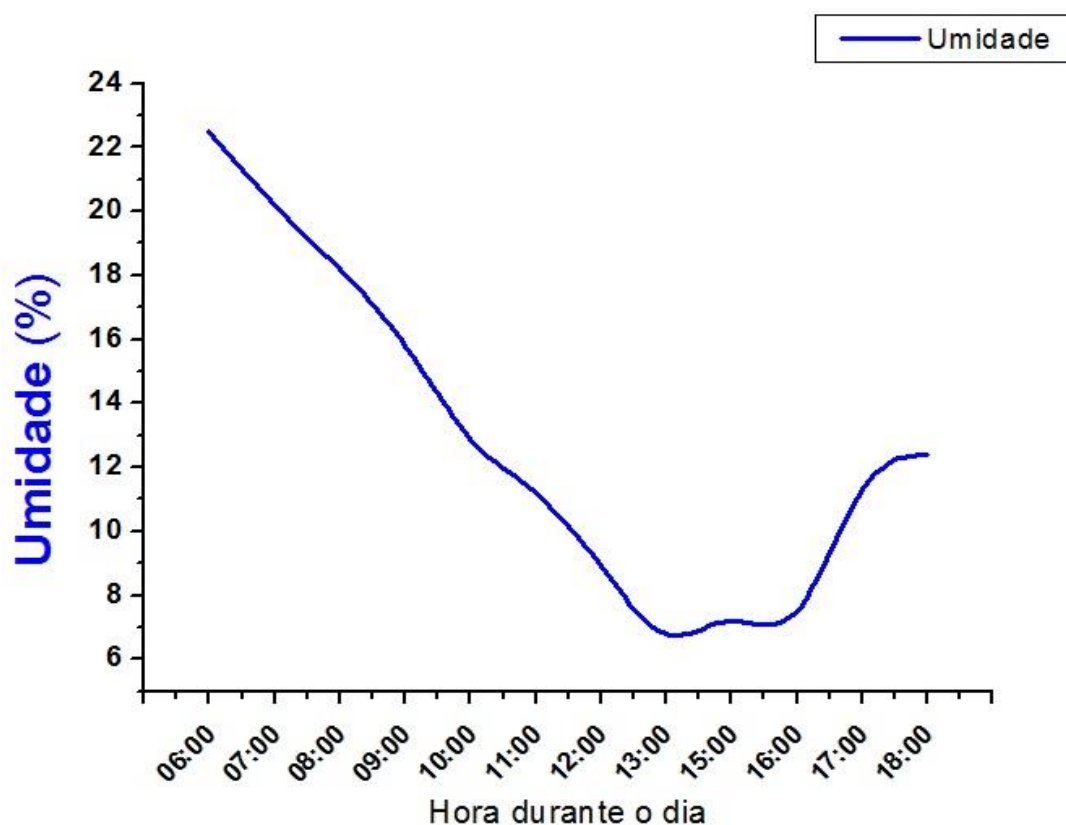


Figura 15. Umidade no palhiço da cana-de-açúcar coletado durante todo o dia na área de ensaio das máquinas no município de São Miguel dos Campos – AL.

A altura e largura das leiras nos seis tratamentos diferiram estatisticamente (Tabela 3). O V1 (90% do volume total) apresentou maior largura das leiras entre os tratamentos, tanto para Máquina 1 quanto para Máquina 2, obtendo a de média de 1,70 metros. De acordo com o fabricante o ideal é que a leira tenha até 1,50

metros de largura, para que a máquina trabalhe de forma satisfatória de acordo com a sua linha de captação da biomassa. Tendo em vista essa recomendação, o V2 (75% do volume total) se encaixa nesse requisito com maior volume de palhico disponível na leira, pois ficou com média de 1,46 metros de largura para a Máquina 1, e 1,50 metros de largura para a Máquina 2. Com relação à altura, o V1 para as duas máquinas foi maior, justamente por se tratar do volume com maior disponibilidade de palhico na leira.

A Máquina 2 apresentou maior eficiência de recolhimento do palhico no três tratamentos ensaiados (Figura 16). No tratamento V1 a Máquina 2 conseguiu recolher 97% do palhico da cana-de-açúcar disponibilizado na leira, e quando comparado com a Máquina 1 que apresentou eficiência de recolhimento de 91% do total de biomassa disponível.

Tabela 3. Análise de variância entre as médias para larguras das leiras e altura das leiras (m).

Largura Leiras (metros)	GL	F	Altura leiras (metros)	GL	F
Volumes	2	71,15**	Volumes	2	75,63**
Máquinas	1	8,09**	Máquinas	1	5,36*
Volumes * Máquinas	2	14,53**	Volumes * Máquinas	2	12,68**
Volumes			Volumes		
V1	1,70 A		V1	0,61 A	
V2	1,48 B		V2	0,46 B	
V3	1,29 C		V3	0,38 C	
DMS	0,08		DMS	0,04	
Máquinas			Máquinas		
M1	1,45 b		M1	0,46 b	
M2	1,53 a		M2	0,50a	
CV (%)	5,69		CV (%)	9,61	
DMS	0,05		DMS	0,03	
Máquina * Volume			Máquina * Volume		
M1V1	1,74 Aa		M1V1	0,63 aA	
M1V2	1,46 aB		M1V2	0,45 aB	
M1V3	1,14 bC		M1V3	0,31 bC	
M2V1	1,66 aA		M2V1	0,59 aA	
M2V2	1,50 aB		M2V2	0,46 aB	
M2V3	1,46 aB		M2V3	0,45 aB	
DMS	0,1		DMS	0,05	

V1 = 90 % do volume total; V2 = 70 % do volume total; V3 = 50 % do volume total; n.s. = não significativo, **significativo a 1% pela análise de variância, *significativo a 5% pela análise de variância; DMS = diferença mínima significativa; CV % = coeficiente de variação em porcentagem. Letras minúsculas diferem estatisticamente entre máquinas. Letras maiúsculas diferem estatisticamente entre tratamentos.

Com isso, podemos observar uma perda de 6% no recolhimento do palhiço quando comparado a Máquina 1 com a Máquina 2. A maior diferença entre os resultados obtidos nas operações de recolhimento entre as máquinas foi no V3 (50% do volume total), em que a diferença entre a Máquina 2 e a Máquina 1, foi de 9% do total recolhido. Esse resultado é reflexo do baixo volume de palhiço de cana-de-açúcar disponibilizado nesse tratamento, e por consequência a Máquina 1 não conseguiu obter um desenvolvimento satisfatório.

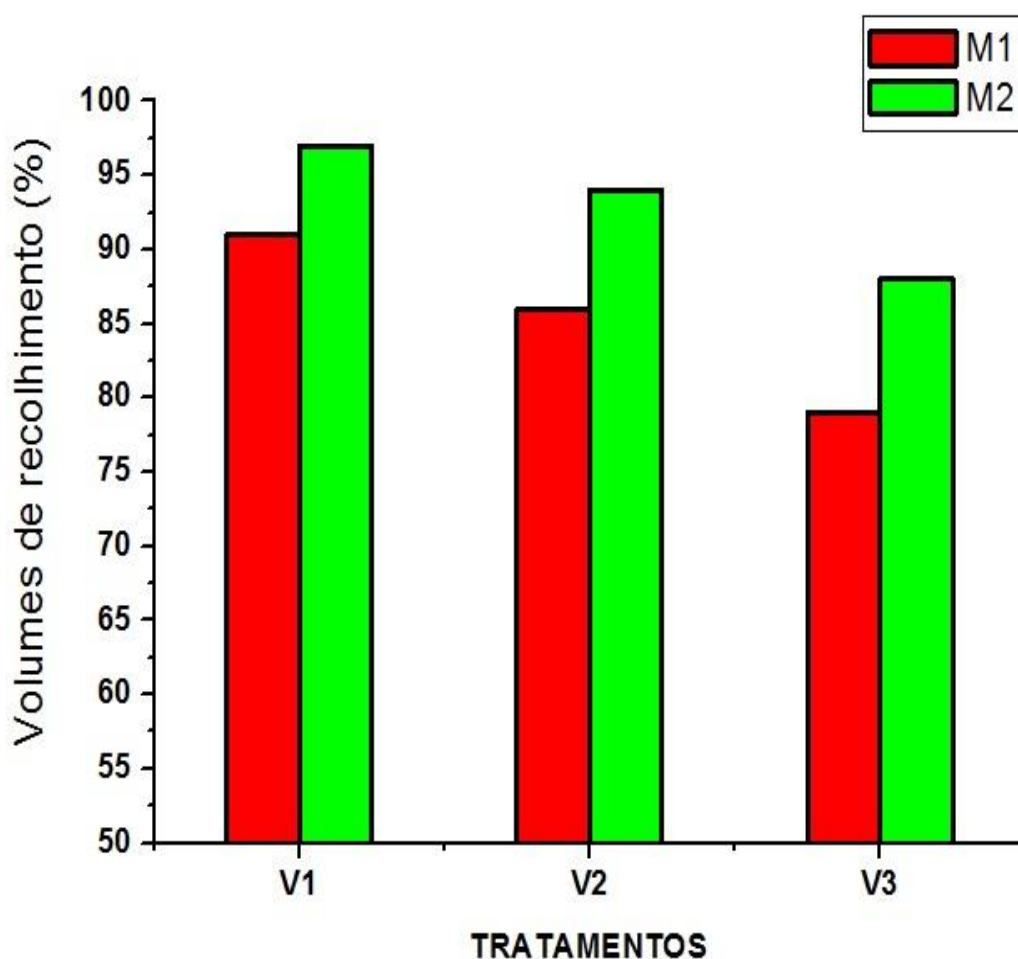


Figura 16. Volume de recolhimento do palhiço nas leiras para cada máquina enfardadora.

Os resultados referentes ao comprimento dos fardos foram diferentes entre as máquinas ($p < 0,05$), não apresentando interação entre os tratamentos (Tabela 4). O maior comprimento de fardo para a Máquina 1, foi no V3 com 2,41 metros, já na Máquina 2 o maior comprimento dos fardos foi no V1 com 2,44 metros. Esses valores diferem em função das regulagens das máquinas pelo operador, que de acordo com

a necessidade da operação, ajusta o tamanho dos fardos prismáticos. Para a necessidade da empresa onde o experimento foi realizado, o ideal é que os fardos apresentem tamanhos entre 2,35 a 2,40 metros, para facilitar a logística de transporte. A Máquina 2, produziu fardos maiores que o recomendado em todos os tratamentos, apresentando média de 2,42 metros, já a Máquina 1 só apresentou resultado maior que a faixa ideal no V3, e sua média geral foi de 2,39 metros.

Tabela 4. Análise de variância entre as médias de comprimentos dos fardos prismáticos (m) de palhço de cana-de-açúcar.

Comprimento (metros)	GL	F
Volumes	2	0,06 ^{ns}
Máquinas	1	5,56*
Tratamento * Máquinas	2	1,87 ^{ns}
Volumes		
V1		2,41
V2		2,41
V3		2,41
DMS		0,02
Máquinas		
M1		2,39 b
M2		2,42 a
CV (%)		1,41
DMS		0,02

V1 = 90 % do volume total; V2 = 70 % do volume total; V3 = 50 % do volume total; n.s. = não significativo, *significativo a 5% pela análise de variância; DMS = diferença mínima significativa; CV % = coeficiente de variação em porcentagem. Letras minúsculas diferem estatisticamente entre máquinas.

A massa úmida dos fardos (Tabela 5), ou seja, o peso real dos mesmos sem descontar a impureza e umidade, foi maior para a Máquina 2, e a análise estatística mostra que os resultados diferiram entre as máquinas ensaiadas no experimento. O peso médio dos fardos entre os três tratamentos da Máquina 2 foi de 523,61 kg. Comparando os três tratamentos da M2, observa-se uma diferença de 14% entre o maior peso, que foi de

550,91 kg no V1 e o menor, que foi de 472,18 kg no V3. A diferença de peso na mesma máquina é influenciada por dois fatores, o primeiro foi à disponibilidade de palhicho na leira, que no V3 foi recolhido apenas 50% do volume total de palhicho disponível no campo, outro motivo é devido à regulagem (na máquina) da pressão de amarração dos cordões nos fardos, que pode variar de acordo com a necessidade (maior peso do fardo ou alto teor de umidade no fardo, aumentando o peso e fazendo com que seja necessário diminuir a pressão dos cordões de amarração).

Na Máquina 1 o V1 proporcionou o maior peso médio dos fardos, que foi de 464,33 kg, representando diferença de 11%, quando comparada com a Máquina 2. Já a diferença do maior peso da Máquina 1 que foi de 490,33 kg no V1 e o menor, que foi de 445,60 kg no V2 foi de apenas 7%. Desta forma, pode-se observar uma uniformidade maior na manutenção do peso dos fardos. O peso na Máquina 1 inferior a Máquina 2, pelo fato da enfardadora não ter conseguido manter sempre a faixa ideal de pressão na câmara de compactação de fardos por causa do teor de umidade do palhicho.

A impureza mineral nos fardos não diferiu estatisticamente (Tabela 6). Em média, a impureza mineral dos fardos da Máquina 1 foi de 4,53%, apresentando diferença de menos de 1% da maior para a menor quantidade de terra agregada ao material enfardado. Torrezan (2003), em experimento realizado no ano de 2003, avaliando a enfardadora BB940 de fardos prismáticos, no município de Piracicaba-SP, encontrou resultados médios de impureza mineral nos fardos amostrados de 6,31%. O tratamento avaliado foi definido como aleiramento duplo, sendo composto de duas passadas adjacentes do ancinho aleirador (uma em sentido contrário da outra).

O V1 foi o tratamento que disponibilizou maior quantidade de impureza mineral nos fardos na Máquina 1, que foi de 5,54%. As amostras de impureza mineral coletadas e analisadas para a Máquina 2 variaram de 5,07% no V2 à 3,96% no V3, e ao contrário da Máquina 1, a quantidade de impureza não foi maior no V1 para a Máquina 2, nesse tratamento a impureza mineral foi de 4,58%, e a média geral entre os três tratamentos da Máquina 2 foi de 5,18%. Com esses resultados pode-se observar que a quantidade de palhicho aleirado, não influenciou na quantidade de impureza dos fardos nas duas máquinas ensaiadas. Esse resultado difere de uma pesquisa feita pela COPERSUCAR (1998), que concluíram que quanto mais operação de aleiramento, maior foi a quantidade de impureza encontrada.

Tabela 5. Análise de variância entre as médias da massa úmida dos fardos (kg).

Massa Úmida (kg)	GL	F
Volumes	2	10,67**
Máquinas	1	35,860**
Tratamento * Máquinas	2	6,63**
Volumes		
V1		520,62 A
V2		496,67 A
V3		465,05 B
DMS		29,68
Máquinas		
M1		464,61 b
M2		523,61 a
CV (%)		5,98
DMS		20,13
Máquina * Volume		
M1V1		490,33 bA
M1V2		445,60 bB
M1V3		457,91 aAB
M2V1		550,91 aA
M2V2		547,75 aA
M2V3		472,18 aB
DMS		34,86

V1 = 90 % do volume total; V2 = 70 % do volume total; V3 = 50 % do volume total; **significativo a 1% pela análise de variância; DMS = diferença mínima significativa; CV % = coeficiente de variação em porcentagem. Letras minúsculas diferem estatisticamente entre máquinas. Letras maiúsculas diferem estatisticamente entre tratamentos.

Os resultados obtidos para o teor de umidade nos fardos não foram significativos, mas observando a Tabela 7, nota-se que os fardos amostrados da Máquina 1, na média dos três tratamentos ficaram com 7,67% de umidade, e quando comparado com os resultados médios dos tratamentos da Máquina 2, que foi de 6,86% de umidade média, nota-se que os fardos da Máquina 2 apresentaram teor de umidade menor.

Tabela 6. Análise de variância entre as médias referentes à impureza mineral (%)

Impureza	GL	F
Volumes	2	0,62
Máquinas	1	1,200
Tratamento * Máquinas	2	,21
Volumes		
V1		5,06
V2		5,39
V3		4,40
DMS		1,2
Máquinas		
M1		4,53
M2		5,2
CV (%)		36,33
DMS		1,2
Máquina * Volume		
M1V1		5,54
M1V2		5,17
M1V3		4,84
M2V1		4,58
M2V2		5,07
M2V3		3,96
DMS		1,2

V1 = 90 % do volume total; V2 = 70 % do volume total; V3 = 50 % do volume total; n.s. = não significativo, *significativo a 5% pela análise de variância; DMS = diferença mínima significativa; CV % = coeficiente de variação em porcentagem.

Os resultados obtidos para volume dos fardos não foram significativos (Tabela 8): na Máquina 1 a média foi de 2,59 m³ e na Máquina 2 foi de 2,61 m³.

A massa seca dos fardos, ou seja, o peso dos mesmos descontados a impureza mineral e o teor de umidade do palhicho, foi maior na Máquina 2 (Tabela 9), ficando com média de 498,52 kg nos três volumes recolhidos, já a Máquina 1 obteve média nos três tratamentos de 438,63 kg, isso representa uma diferença de 59,85 kg ou 12% entre as médias de peso seco nas duas máquinas utilizadas no experimento. Na Máquina 2 o V3 foi o tratamento que diferiu dos demais, e se comparado com a média entre o V1 e V2, essa diferença foi de 13% entre os pesos dos fardos.

O volume de palhicho disponível na leira influenciou o peso no V3 que foi mais baixo na Máquina 2, isso mostra que a baixa quantidade de palhicho disponível nesse tratamento fez com que a máquina trabalhasse com exigência de pressão nos cordões de amarração menor. Já na Máquina 1, os pesos não diferiram entre os tratamentos que variaram de 461,03 kg no V1 à 420,98 kg no V2. Lemos et al. (2014) em experimento

realizado no município de Lençóis Paulista encontrou resultados de peso seco médio para fardos prismáticos de 294 kg.

Tabela 7. Análise de variância entre as médias referentes à umidade (%) dos fardos.

Umidade	GL	F
Volumes	2	5,93
Máquinas	1	2,09*
Volumes * Máquinas	2	,03
Volumes		
V1		7,08
V2		6,99
V3		7,75
DMS		0,67
Máquinas		
M1		6,86
M2		7,67
CV (%)		13,71
DMS		0,67

V1 = 90 % do volume total; V2 = 70 % do volume total; V3 = 50 % do volume total; n.s. = não significativo, *significativo a 5% pela análise de variância; DMS = diferença mínima significativa; CV % = coeficiente de variação em porcentagem.

Tabela 8. Análise de variância entre as médias referente ao volume dos fardos (m³).

Volume (m ³)	GL	F
Volumes	2	0,000 ^{ns}
Máquinas	1	0,005 ^{ns}
Volumes * Máquinas	2	0,003 ^{ns}

V1 = 90 % do volume total; V2 = 70 % do volume total; V3 = 50 % do volume total; n.s. = não significativo; DMS = diferença mínima significativa; CV % = coeficiente de variação em porcentagem.

Para avaliar a logística de transporte do palhicho até a indústria, foram determinadas as massas específicas dos fardos (Tabela 9). Houve diferença estatisticamente significativa entre máquinas, em que, a Máquina 2 conseguiu obter maior massa específica com média de 190,51 kg m³, já na Máquina 1 essa massa específica foi 169 kg m³, o coeficiente de variação para as médias das duas máquinas foi de 6,14%. Para a Máquina 1 apenas o tratamento V1 diferiu entre os demais, apresentando uma diferença de 8% quando comparado com a média dos tratamentos V2 e V3, que foi de 164,20 kg m³. Já para a Máquina 2 entre os tratamentos, apenas o V3 diferiu dos demais, com massa

específica de $173,50 \text{ kg m}^3$, esse resultado mostra diferença de 13% em relação a média dos tratamentos V1 e V2 que foi de 199 kg m^3 .

Os resultados que diferiam entre os tratamentos para cada máquina foram os menores e contribuíram para diminuir a média dos tratamentos de cada máquina, que foi de $169,26 \text{ kg m}^3$ na Máquina 1 e na Máquina 2, $190,51 \text{ kg m}^3$. Franco (2003), em experimento realizado no grupo COSAN localizado no município de Piracicaba-SP com fardos cilíndricos, encontrou massas específicas de fardos que variaram de $278,46 \text{ kg m}^3$ a $304,04 \text{ kg m}^3$, não ocorrendo diferenças significativas entre as médias encontradas para o ensaio feito. Os coeficientes de variação para esse experimento variaram de 10,47% a 12,45%.

A importância da massa específica dos fardos está na necessidade de avaliar-se o comportamento do palhicho transportado dentro da carga. Assim, a baixa massa específica dos fardos transportada na carga resulta na baixa produtividade de transporte do material enfardado, fazendo com que diminua a eficiência da logística de escoamento do produto, pois quanto maior a quantidade de palhicho no fardo, maior será a eficiência no transporte dessa biomassa.

O consumo de combustível em litros por fardos (Tabela 10) não diferiu entre as máquinas. O maior consumo de combustível médio por fardo, para as duas máquinas foi no V2 com 0,466 litros por fardo. Isso aconteceu devido a menor disponibilidade de palhicho na leira do V2 em relação ao V1. Quanto menor for o volume do palhicho, maior será o consumo de combustível por fardo. Na média geral a Máquina 2 ficou com consumo de combustível menor (0,410 litros por fardo), porém o consumo no tratamento V2 dessa máquina foi de 0,480 L por fardo, maior do que o V2 da Máquina 1 que foi de 0,451 L por fardo.

As análises estatísticas referentes ao consumo de combustível em litros por horas só apresentaram diferença estatisticamente significativas entre as médias das duas máquinas (Tabela 11). O consumo médio de combustível da Máquina 1 foi de 21,43 litros por hora, consumo menor em relação a Máquina 2 que teve como resultado 22,79 litros por hora. Essa diferença entre as médias das máquinas representa um acréscimo de 6% no consumo de combustível por hora.

Tabela 9. Análise de variância entre as médias de massa seca (kg) e massa específica (kg m³) dos fardos prismáticos de palhiço de cana-de-açúcar.

Massa Seca (kg)	GL	F	Massa Específica (kg m³)	GL	F
Volumes	2	9,020**	Volumes	2	9,100**
Máquinas	1	39,060**	Máquinas	1	33,240**
Volumes * Máquinas	2	5,830**	Volumes * Máquinas	2	5,680**
Volumes			Volumes		
V1	492,76	A	V1	189,42	A
V2	470,02	AB	V2	180,07	AB
V3	442,96	B	V3	170,17	B
DMS	28,87		DMS	11,1	
Máquinas			Máquinas		
M1	438,63	b	M1	169,27	b
M2	498,52	a	M2	190,51	a
CV (%)	6,13		CV (%)	6,14	
DMS	19,58		DMS	7,52	
Máquina * Volume			Máquina * Volume		
M1V1	461,03	bA	M1V1	179,40	bA
M1V2	420,98	bA	M1V2	161,57	bB
M1V3	433,88	aA	M1V3	166,93	aA
M2V1	524,48	aA	M2V1	199,44	aA
M2V2	519,06	aA	M2V2	198,58	aA
M2V3	452,04	aB	M2V3	173,50	aB
DMS	33,91		DMS	13,03	

V1 = 90 % do volume total; V2 = 70 % do volume total; V3 = 50 % do volume total; **significativo a 1% pela análise de variância; DMS = diferença mínima significativa; CV % = coeficiente de variação em porcentagem. Letras minúsculas diferem estatisticamente entre máquinas. Letras maiúsculas diferem estatisticamente entre tratamentos.

Os resultados entre os tratamentos não apresentaram diferenças significativas, porém o maior consumo por hora na Máquina 1 foi no tratamento V2 e na Máquina 2 foi no V1. Este maior consumo da Máquina 2 é justificado pela maior produção de fardos por hora em ralação a Máquina 1. Sabendo-se que quanto maior foi a produção de fardos, maior foi o consumo de combustível. Esses resultados são próximos aos encontrados por Torrezan (2003), em experimento realizado na Região de Piracicaba - SP com enfardadora de fardos prismáticos modelo BB940, encontrou consumo de combustível em enleiramento duplo de 23,65 L h⁻¹.

Tabela 10. Análise de variância entre as médias referentes ao consumo de combustível em litros por fardo.

Litros/Fardos	GL	F
Volumes	1	214,55**
Máquinas	1	0,083 ^{ns}
Volumes * Máquinas	1	17,54**
Volumes		
V1		0,356 B
V2		0,466 A
V3 ²		-
DMS		0,015
Máquinas		
M1		0,412 a
M2		0,410 a
CV (%)		4,49
DMS		0,015
Máquina * Volume		
M1V1		0,372 aB
M1V2		0,451 bA
M2V1		0,339 bB
M2V2		0,480 aA
DMS		0,022

V1 = 90 % do volume total; V2 = 70 % do volume total; V3 = 50 % do volume total; n.s. = não significativo; **significativo a 1% pela análise de variância; DMS = diferença mínima significativa; CV % = coeficiente de variação em porcentagem; ²Dados perdidos. Letras minúsculas diferem estatisticamente entre máquinas. Letras maiúsculas diferem estatisticamente entre tratamentos.

Tabela 11. Análise de variância entre as médias referente ao consumo de combustível em litros por hora.

Litros/hora	GL	F
Volumes	1	0,531 ^{ns}
Máquinas	1	0,015*
Volumes * Máquinas	1	0,082 ^{ns}
Volumes		
V1		22,27A
V2		21,90A
V3 ²		-
DMS		1,06
Máquinas		
M1		21,43b
M2		22,79a
CV (%)		5,68
DMS		1,06

V1 = 90 % do volume total; V2 = 70 % do volume total; V3 = 50 % do volume total; n.s. = não significativo; *significativo a 5% pela análise de variância; DMS = diferença mínima significativa; CV % = coeficiente de variação em porcentagem; ²Dados perdidos. Letras minúsculas diferem estatisticamente entre máquinas. Letras maiúsculas diferem estatisticamente entre tratamentos.

A Máquina 2 obteve consumo médio de 6,83 litros por hectares ($L ha^{-1}$) nos três tratamentos (Tabela 12). Quando comparado com a Máquina 1 que foi de $8,15 L ha^{-1}$, observa-se que a Máquina 2 consumiu uma menor quantidade de combustível. Para ambas as máquinas, os tratamentos diferiram estatisticamente, e o tratamento que apresentou maior demanda na Máquina 1 foi o V1, $9,17 L ha^{-1}$. A Máquina 2 também apresentou maior utilização de diesel no V1, $7,40 L ha^{-1}$, isso representa acréscimo de 20% entre os tratamentos no consumo de combustível da Máquina 2 para a Máquina 1. Os resultados de consumo de combustível em $L ha^{-1}$ sofram semelhantes aos encontrados por Ripoli (1991) que foi de 8,37 e $7,32 L t^{-1}$.

O consumo de combustível por tonelada de matéria seca ($L t MS$) foi menor na a Máquina 1, que obteve $0,91 L t MS$ entre os tratamentos, já a Máquina 2 consumiu $1,08 L t MS$, representando acréscimo de 16% no aproveitamento de combustível. A maior demanda de diesel obtida pela Máquina 2, pode ser explicada por sua maior eficiência na produção de fardos (Tabela 12), resultados superiores aos de Ripoli (1991) que teve média de $0,40 L t^{-1}$.

Em relação ao tempo de produção por fardo, a Máquina 2 foi mais eficiente, com produção média de 75,71 segundos por fardo nos três tratamentos, já a Máquina 1 obteve média de 108,97 segundos por fardo nos três tratamentos (Tabela 13). O melhor tempo na produção entre fardos foi para a Máquina 2 no V1, 51 segundos por fardo, quando comparado com o mesmo tratamento da Máquina 1 que foi de 83 segundos por fardo, sendo assim pode-se observar aumento de 39% no tempo para produção de um fardo. O V3 foi o tratamento que levou maior tempo para a produção de um fardo, o V3 da Máquina 2 levou em média 92 segundos para produzir um fardo, já a Máquina 1 levou 143 segundos em média para produção entre fardos com basicamente as mesmas dimensões. O V3 foi o tratamento que disponibilizou menor quantidade de palhço (50% do volume total recolhido), por isso justifica a maior quantidade de tempo para produzir um fardo, pois isso significa que a máquina enfardadora teve que andar mais para conseguir captar a quantidade de palhço necessária para forma o fardo.

Tabela 12. Análise de variância entre as médias referente ao consumo de combustível em litros por hectare e litros por toneladas de matéria seca.

Litros/ha⁻¹	GL	F	Litros/t⁻¹ MS	GL	F
Volumes	1	323,083**	Volumes	1	31,901**
Máquinas	1	220,624**	Máquinas	1	276,276**
Volumes * Máquinas	1	26,540**	Volumes * Máquinas	1	13,776**
Volumes			Volumes		
V1	8,293	A	V1	0,968	B
V2	6,7	B	V2	1,02	A
V3 ²	-		V3 ²	-	
DMS	0,18		DMS	0,021	
Máquinas			Máquinas		
M1	8,155	a	M1	0,911	b
M2	6,83	b	M2	1,08	a
CV (%)	2,9		CV (%)		
DMS	0,18		DMS	0,021	
Máquina * Volume					
M1V1	9,18	aA	M1V1	0,863	bB
M1V2	7,13	aB	M1V2	0,960	bA
M2V1	7,40	bA	M2V1	1,07	aA
M2V2	6,27	bB	M2V2	1,09	aA
DMS	0,26		DMS	0,03	

V1 = 90 % do volume total; V2 = 70 % do volume total; V3 = 50 % do volume total; n.s. = não significativo; **significativo a 1% pela análise de variância; DMS = diferença mínima significativa; CV % = coeficiente de variação em porcentagem; ²Dados perdidos. Letras minúsculas diferem estatisticamente entre máquinas. Letras maiúsculas diferem estatisticamente entre tratamentos.

A produção de fardos por hora é uma variável que permite observar o quanto cada máquina é eficiente na produtividade de fardos, permitindo ao operador da enfardadora programar-se quanto ao tempo necessário para a máquina trabalhar diariamente, alcançando a produtividade que foi dimensionada. A produção de fardos por hora diferiu estatisticamente entre as máquinas (Tabela 14). A Máquina 1 fez 37 fardos por hora na média dos três tratamentos, já a Máquina 2 produziu em média 47 fardos por hora, isso representa um acréscimo de 22% na produtividade dos fardos por hora. Entre os tratamentos, o V1 para as duas máquinas diferiu dos demais. Essa diferença é consequência do volume de palha disponível na leira, pois o V1 foi o tratamento com maior quantidade de palhicho na leira disponível (90% do palhicho recolhido), por isso a quantidade de fardo/hora foi maior. Quanto maior for a quantidade de biomassa disponibilizada na leira, maior será a produção de fardos por hora. Mello (2009) em experimento realizado em Iracemápolis - SP, utilizando uma enfardadora

modelo Nogueira Express 5040 de fardos com comprimento médio de 97 cm, produziu em média 367 fardos por hora, no tratamento de aleiramento duplo.

Tabela 13. Análise de variância entre as médias referente ao tempo de produção de cada fardo (segundos).

Tempo/Fardos (segundos)	GL	F
Volumes	2	27,33**
Máquinas	1	35,39**
Volumes * Máquinas	2	3,10*
Volumes		
V1	67,30	C
V2	91,80	B
V3	117,93	A
DMS	16,35	
Máquinas		
M1	108,97	a
M2	75,71	b
CV (%)	28,72	
DMS	11,12	
Máquina * Volume		
M1V1	83,60	aB
M1V2	100,06	aB
M1V3	143,26	aA
M2V1	51,00	bB
M2V2	83,53	aA
M2V3	92,60	bA
DMS	19,26	

V1 = 90 % do volume total; V2 = 70 % do volume total; V3 = 50 % do volume total; **significativo a 1% pela análise de variância; *significativo a 5% pela análise de variância; DMS = diferença mínima significativa; CV % = coeficiente de variação em porcentagem. Letras minúsculas diferem estatisticamente entre máquinas. Letras maiúsculas diferem estatisticamente entre tratamentos.

A distância entre os fardos produzidos diferiu entre os tratamentos para cada máquina (Tabela 15). A maior distância entre fardos produzidos foi no tratamento V3, em que, a distância média foi de 120,33 metros entre fardos, deste modo, quando comparada com a distância dos mesmos no V1 que foi 61 metros, pode-se observar que o volume de palhicho na leira influencia a distância entre os fardos. Quanto menor o volume de palhicho de cana-de-açúcar disponibilizado na leira, maior será a distância entre eles, isso compromete diretamente a produção de fardos por dia em qualquer empresa que trabalhe na linha de enfardamento dessa biomassa. A menor distância entre fardos foi para a Máquina 2, isso porque essa máquina conseguiu

recuperar maior quantidade de biomassa na leira e assim proporcionar maior eficiência no enfardamento do palhço.

Tabela 14. Análise de variância entre as médias referente ao tempo de produção de fardo por hora nas operações de enfardamento.

Fardos/Hora	GL	F
Volumes	2	61,03**
Máquinas	1	82,54**
Volumes * Máquinas	2	0,55 ^{ns}
Volumes		
V1	50,52 A	
V2	38,71 B	
V3	37,09 B	
DMS	3,26	
Máquinas		
M1	37,18 b	
M2	47,03 a	
CV (%)	7,72	
DMS	2,21	

V1 = 90 % do volume total; V2 = 70 % do volume total; V3 = 50 % do volume total; n.s. = não significativo; **significativo a 1% pela análise de variância; DMS = diferença mínima significativa; CV % = coeficiente de variação em porcentagem. Letras minúsculas diferem estatisticamente entre máquinas. Letras maiúsculas diferem estatisticamente entre tratamentos.

No desempenho operacional das máquinas observa-se diferença estatisticamente significativa para capacidade de campo teórica (CCT ha h⁻¹), na comparação das médias das análises dos três tratamentos de recolhimento de palhço da cana-de-açúcar (Tabela 16). O maior CCT foi para a Máquina 2 (6,57 ha h⁻¹) na média geral dos três tratamentos, já para a Máquina 1, a média foi de 5,35 ha h⁻¹, isso representa aumento no desempenho operacional de 19% em relação as duas máquinas.

Na Máquina 1, apenas o tratamento V3 diferiu dos demais (6,57 ha h⁻¹), ficando acima da média dos tratamentos. Isso é devido ao V3 ser o tratamento com menor disponibilidade de palhço de cana-de-açúcar na leira, e isso fez com que a máquina pudesse trabalhar em uma velocidade maior quando comparado com os outros tratamentos, que apresenta maior volume de palhço na leira.

Tabela 15. Análise de variância entre as médias referente à distância (m) entre cada fardo no campo de ensaio.

Distância entre fardos (metros)	GL	F
Volumes	2	156,42**
Máquinas	1	9,97**
Volumes * Máquinas	2	2,20 ^{ns}
Volumes		
V1		61,00 C
V2		93,66 B
V3		120,33 A
DMS		8,02
Máquinas		
M1		96,97 a
M2		87,71 b
CV (%)		14,20
DMS		5,45

V1 = 90 % do volume total; V2 = 70 % do volume total; V3 = 50 % do volume total; n.s. = não significativo; **significativo a 1% pela análise de variância; DMS = diferença mínima significativa; CV % = coeficiente de variação em porcentagem. Letras minúsculas diferem estatisticamente entre máquinas. Letras maiúsculas diferem estatisticamente entre tratamentos.

Para a Máquina 2, o V1 foi o tratamento que diferiu estatisticamente dos demais (5,7 ha h⁻¹), nos outros tratamentos a M2 obteve 6,74 e 7,28 ha h⁻¹ no V2 e V3, respectivamente. Isso ocorreu, porque essa máquina teve maior dificuldade de deslocamento no V1, devido a maior quantidade de palhço na leira.

A capacidade de campo operacional (CCO ha h⁻¹) foi maior para a Máquina 2 (5,87 ha h⁻¹), e quando comparado com as médias obtidas pela Máquina 1 que foi de 4,46 ha h⁻¹, pode-se observar aumento de 25% no desempenho da máquina nessa variável analisada. Para a Máquina 1, apenas o tratamento V3 diferiu dos demais apresentando CCO de 5,77 ha h⁻¹. O V1 foi o menor resultado com 3,46 ha h⁻¹, mas trata-se do tratamento que disponibilizou a maior quantidade de palhço na leira para a máquina enfardar e isso explica o menor desempenho operacional, já que quanto maior for o volume de palhço na leira, maior dificuldade a máquina vai ter em recolher e enfardar esse material disponível no campo.

Tabela 16. Análise de variância entre as médias referentes à Capacidade de campo teórica (CCT) ha h⁻¹ e a Capacidade de campo operacional (CCO) ha h⁻¹.

CCT (ha h ⁻¹)	GL	F	CCO (ha h ⁻¹)	GL	F
Volumes	2	38,86**	Volumes	2	38,56**
Máquinas	1	55,63**	Maquinas	1	86,06**
Volumes * Máquinas	2	4,84*	Volumes * Máquinas	2	12,68**
Volumes			Volumes		
V1	5,18 C		V1	4,32 C	
V2	5,78 B		V2	5,22 B	
V3	6,92 A		V3	5,95 A	
DMS	0,53		DMS	0,49	
Máquinas			Máquinas		
M1	5,35 b		M1	4,46 b	
M2	6,57 a		M2	5,87 a	
CV (%)	5,82		CV (%)	6,24	
DMS	0,35		DMS	0,33	
Máquina * Volume			Máquina * Volume		
M1V1	4,66 bB		M1V1	3,46 bB	
M1V2	4,82 bB		M1V2	4,15 bB	
M1V3	6,57 bA		M1V3	5,77 aA	
M2V1	5,70 aB		M2V1	5,18 aB	
M2V2	6,74 aA		M2V2	6,30 aA	
M2V3	7,28 aA		M2V3	6,13 aA	
DMS	0,61		DMS	0,57	

V1 = 90 % do volume total; V2 = 70 % do volume total; V3 = 50 % do volume total; **significativo a 1% pela análise de variância; DMS = diferença mínima significativa; CV % = coeficiente de variação em porcentagem. Letras minúsculas diferem estatisticamente entre máquinas. Letras maiúsculas diferem estatisticamente entre tratamentos.

A menor eficiência na operação de recolhimento foi para a Máquina 1 no V1 (3,46 ha h⁻¹), e comparando com os outros tratamentos observasse que o V2 e o V3 apresentaram 86 e 87% de aproveitamento do desempenho operacional, respectivamente. Apesar do V3 apresentar maior eficiência no aproveitamento do desempenho operacional, o V1 e V2 são os volumes mais recomendados para a operação de enfardamento do palhicho, no aspecto geral o V3 não se apresenta como uma opção viável, devido ao baixo volume de palhicho aleirado. Lemos et al. (2014) em experimento realizado em Lençóis Paulista, utilizando uma enfardadora de fardos prismáticos concluíram que sua capacidade operacional da máquina foi de 2,23 ha h⁻¹.

O V1 foi o tratamento que diferiu estatisticamente dos demais para a Máquina 2 apresentando desempenho operacional de 5,18 ha h⁻¹, isso representa

diferença de 18% em relação a maior CCO. A maior CCO foi no V2 com $6,30 \text{ ha h}^{-1}$, que é o tratamento com o segundo maior volume de palhico disponível na leira, obtendo uma eficiência no desempenho operacional da máquina de 93% em relação entre CCE e a CCO em hectares por hora, isso provavelmente aconteceu pelo fato do volume de palhico na leira (aleirado 75% do total disponível) ter favorecido o melhor desempenho e velocidade de trabalho da máquina Mello (2003) utilizando uma enfardadora de menor porte, encontrou resultados referente à capacidade efetiva no tratamento de aleiramento duplo de $0,88 \text{ ha h}^{-1}$.

A diferença entre o desempenho operacional das duas máquinas, provavelmente se deve ao fato da Máquina 1 apresentar maior dificuldade na operação de enfardamento do palhico da cana-de-açúcar, em relação a Máquina 2.

7 CONCLUSÕES

A Máquina 2 apresentou melhor eficiência no adensamento do palhiço (kg m^3).

O maior volume aleirado de palhiço apresenta-se como o mais viável na operação de enfardamento nessas condições, já que a impureza mineral não diferiu.

Quanto maior for o volume de palhiço da cana-de-açúcar aleirado, maior será a quantidade de fardo/hora produzidos.

O consumo de combustível das máquinas variou de acordo com o volume de palhiço enfardado, quanto maior foi o volume, maior foi o consumo de combustível.

A Máquina 2 nos três tratamentos foi mais eficiente no recolhimento do palhiço em ha h^{-1} .

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMO FILHO, J. et al. Resíduos de colheita mecanizada de cana crua. **Álcool & Açúcar**, São Paulo, n.67, p.23-25, abr./jun. 1993.

ALBUQUERQUE FILHO, J. C. C. et al. Composição tecnológica em cana-de-açúcar em função da adubação mineral e adição de complexo orgânico: Usina Petribú. **X jornada de ensino, pesquisa e extensão – JEPEX 2010** – UFRPE: Recife, 18 a 22 de outubro.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Agricultural machinery management data. In: _____. **ASAE standards 1992: standards engineering practices data**. San Joseph, 1992. p. 359-366.

AVAREZ, I.A.; CASTRO, P.R.C. Crescimento da parte aérea de cana crua e queimada. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.56, p.1069-1079, 1999.

BIZUTI, S.F.G. **Enleiramento e enfardamento cilíndrico de palhiço de cana-de-açúcar: Alguns parâmetros e desempenho operacional e eficiência energética**. 2003. 75p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2003.

BRASIL. Decreto n. 2.661, de 8 de julho de 1998. Regulamenta o parágrafo único do art. 27 da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965 (código florestal), mediante o estabelecimento de normas de precaução relativas ao emprego do fogo em práticas agropastoris e florestais, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 9 jul. 1998. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d2661.htm>. Acesso em: 20 agosto 2014.

CARVALHO, D. J. **Estudo da viabilidade técnica de sistemas de cogeração operando exclusivamente com palha de cana**. 2011. 81p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

CALORI, N. C. T. CEISE – Centro Nacional das indústrias do Setor Sucroenergético e Biocombustíveis. **Parceria entre CTC e Esalq prevê contribuição para setor sucroenergético**. Disponível em: <<http://www.ceisebr.com/conteudo/parceria-entre-ctc-e-esalq-preve-contribuicao-para-setor-sucroenergetico>>. Acesso em 17/03/2014.

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. Biocombustíveis de segunda geração: O futuro passa por aqui. **Revista Brasileira de Bioenergia**, ano 3, n. 7, 2009. <<http://cenbio.iee.usp.br/download/revista/RBB7.pdf>> Acessado em: 13/03/2014.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_12_20_10_56_08_boletim_cana_portugues_-_dez_2013_3o_lev_-_original.pdf> Acessado em: 10/03/2014.

CORRÊA NETO, V. **Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural**. 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências/Planejamento Energético) – Coordenação dos Programas de Pós- Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

Coperativa dos produtores de cana-de-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, v.6, p.44-46, jul./ago. 1998.

DANTAS, D. **Uso da biomassa da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, energética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista**. 2010. 112p. Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2010.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Classificação dos tipos de solos**. Alagoas. Disponível em:

<http://www.uep.cnps.embrapa.br/zaal/PDF/MapasSolos/Solos_Sao%20Miguel.pdf>

Acessado em: 14/08/2014.

FERREIRA, E. T. A queimada da cana e seu impacto socioambiental. **Associação Cultural e Ecológica Pau Brasil**. Ribeirão Preto, 2014. Disponível em:

<<http://www.paubrasil.org.br/st-noticias-view.php?codigo=67>>. Acessado em 20/08/2014.

FRANCO, F. N. **Alguns parâmetros de desempenho operacional de um sistema de recolhimento de palhico de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) a granel**. 2003. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Máquinas Agrícolas)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2

FURLANI NETO, V. L. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar. **Revista STAB**, Piracicaba, p.89. 1994.

GENOVESE, A. L.; UDAETA, M. E. M.; GALVÃO, L. C. R. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo, In: **Congresso internacional sobre geração distribuída e energia no meio rural**, 2006, Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000100021&script=sci_arttext>. Acesso em: 18 março de 2014.

GONÇALVES, D. B. **A regulamentação das queimadas e as mudanças nos canaviais paulistas**. São Carlos, v.1, 127 p, 2002.

HASSUANI, S. J.; LEAL, M. R. L. V.; MACEDO, I. C. Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash. Piracicaba: PNUD Brasil, **Centro de Tecnologia Canavieira**. 2005. 216 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Disponível em:<[ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_\[mensal\]/Fasciculo/lspa_201401.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/lspa_201401.pdf)>. Acesso em 17/03/2014.

INNOCENTE, A. F. Cogeração a partir da biomassa residual da cana-de-açúcar – Estudo de caso. 2011. 108 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu-SP, 2001.

JANNUZZI, G. M. Uma avaliação das atividades recentes de P&D em energia renovável no Brasil e reflexões para o futuro. **Energy Discussion Paper**, Campinas, n. 2.64-01/03, p. 1-12, 2003.

LANZOTTI, C. R. **Uma análise energética de tendências do setor sucroalcooleiro**. 2000. 95 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

MACEDO, I. C.; LEAL, M. R. L. V.; SILVA, J. E. A. R. Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil. **São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente**, 2004.

MALUF, G. **A competição entre o etanol de segunda geração e a produção de eletricidade pelo uso do bagaço**. 2014. 93 p. Dissertação (Mestrado em Agronegócio) - Escola de Economia de São Paulo, da Fundação Getúlio Vargas – EESP – FGV, São Paulo-SP, 2014.

MANECHINI, C.; JÚNIOR, A. R.; DONZELLI, J. L. Benefits and problems of trash left in the field. In: HASSUANI, S. J., VERDE LEAL, M. R. L., MACEDO, I. C. (Ed.).

Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash. Project BRA/96/G31 PNUD –CTC. Unipress Disc Records do Brasil, Série Caminhos para Sustentabilidade, Piracicaba, São Paulo, 2005. Cap. 3, p. 27-35.

MANFRIN, T. S. V.; VELAZQUEZ, S. Cogeração de energia a partir do aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar. **VII Jornada de Iniciação Científica**, Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2011.

MAPA (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO) <
<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>> Acessado em 20/05/2014.

MEDEIROS, D. **Efeitos da palha de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) sobre o manejo de plantas daninhas e dinâmica do banco de sementes.** 2001. 126p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

MELLO, A. M. **Desempenho de uma enfardadora prismática no recolhimento do palhiço.** 2009. 89p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

MIALHE, L. G. **Manual de Mecanização Agrícola.** São Paulo, Ed. Agronômica Ceres, 1974, 301 p.

MICHELAZZO, M. B.; BRAUNBECK, O. A. Análise de seis sistemas de recolhimento do palhiço na colheita mecânica da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v.12, n.5, p.546–552, 2008.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Boletim Mensal dos Combustíveis Renováveis.** Edição nº 68. Março, 2013. Disponível em:
http://www.mme.gov.br/spg/galerias/arquivos/publicacoes/boletim_mensal_combustiveis_renovaveis/Boletim_DCR_nx_068_-_setembro_de_2013.pdf Acesso em 13 março de 2014.

MOLINA JR., W. F. et al. Aspectos econômicos e operacionais do enfardamento de resíduo de colheita de cana-de-açúcar para aproveitamento energético. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 13, n. 5, p. 28-31, 1995.

MOLINA JR, W. F. **Enfardamento de resíduo de colheita de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): Aplicação dos desempenhos operacional e econômico**. 1991. 101p. Dissertação (Mestrado e máquinas agrícolas) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

MONTANHA, G. K. et al. Consumo De Combustível De Um Trator Agrícola No Preparo Do Solo Para O Algodão Irrigado Em Função Do Tipo De Solo. In: XL Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA, 2011, Cuiabá-MT, 2011.

MULLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba**. 2005. 94 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

ORLANDO FILHO, J.;ROSSETO, R.; MURAOKA, T.;ZOTELLI, H.B. Efeitos do sistema de despalha (cana crua x cana queimada) sobre algumas propriedades do solo. **Revista STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 16, n. 6, p. 30-33, jul./ago., 1998.

PAOLIELLO, J. M. M. **Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira**. 2006. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2006.

PEREA, L. A.; BIAGGIONI, M. A. M.; SERAPHIM, O. J. Avaliação de sistemas de manejo do palhicho de cana-de-açúcar no campo e na indústria. **Revista Energia na Agricultura**. Botucatu, vol. 27, n. 1, janeiro-março, 2012, p.89-108.

PIERROSSI, M. A.; FAGUNDES, S. A. Enfardamento de Palha. Cana-de-açúcar – do Plantio à colheita, **Departamento de Fitotecnia UFV**, Viçosa, 2012, 257p.

PRETO, E. V.; MORTOZA, G. L. **Geração de energia elétrica utilizando biomassa**. 2010. 82p. TCC (Trabalho de conclusão de curso), Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

RIPOLI, M. L. C. & RIPOLI, T. C. Cana-de-açúcar: Palhiço como fonte de energia. 1ª Ed, **Campinas: Instituto Agrônômico**, 2010, p. 791-819.

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

RIPOLI, M. L. C.; GAMERO, C. A. Palhiço de cana-de-açúcar: Ensaio padronizado de recolhimento por enfardamento cilíndrico. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu-SP, vol. 22, n. 1, 2007, p.75-93.

RIPOLI, M.L.C. **Ensaio de dois sistemas de colheita da biomassa de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) para fins energéticos**. 2004. 213 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu-SP, 2004.

RIPOLI, T. C. C. **Utilização do material remanescente da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): equacionamento dos balanços energéticos e econômicos.**, 1991, 150p. Tese (Livre-docência), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

RIPOLI, T.C.C.; MOLINA, W.F.; COELHO, J.J.D.; SACCOMANO, J.B. Estudo sobre enfardamento de resíduos de cosecha de caña verde. **STAB**, Piracicaba, v.11, n.4, p.29-31, mar./abr, 1991.

RIPOLI, T.C.C; RIPOLI, M.L.C. Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente. Piracicaba, 2004. 302 p.

RIPOLI. Algumas considerações sobre palhico como fonte de energia. **In: Seminário internacional de cana & energia**, 2001, Ribeirão Preto. Ribeirão Preto: Instituto nacional de eficiência energética; Instituto de desenvolvimento Agroindustrial, 2001, 32 p.

ROMÃO JUNIOR, R. A. **Análise da viabilidade do aproveitamento da palha da cana-de-açúcar para cogeração de energia numa usina sucroalcooleira**. 2009. 165p. Dissertação (Mestrado e Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2009.

SÃO PAULO. Lei n. 11.241, de 19 de setembro 2002. Dispõe sobre eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, 20 set. 2002. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/norma?id=217>>. Acesso em: 20 agosto de 2014.

TOLENTINO, G.; FLORENTINO, H. O.; SARTORI, M. M. P. Metodologias e Técnicas Experimentais: Modelagem matemática para o aproveitamento da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar com menor custo. **Brangantia**, Campinas, v.66, n4, p.729-735, 2007.

TORQUATO, S. A. Cana-de-açúcar para indústria: O quanto vai precisar crescer. **Instituto de Economia Agrícola**. São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=7448>>. São Paulo, 2006. Acesso em 17/03/2014.

TORQUATO, S. A.; RAMOS, R. C. Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista: ações visando à preservação ambiental. **Instituto de Economia Agrícola**. São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=12390>>. Acessado em: 20/08/2014.

TORREZAN, H. F. **Enleiramento e enfardamento prismático de palhiço de cana-de-açúcar: Alguns parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética**. 2003. 106p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2003.

UNICA – União da indústria da cana-de-açúcar. **Califórnia valoriza etanol brasileiro de cana-de-açúcar para manter seu ar mais limpo**. São Paulo. 2014. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/27781786920311168105/california-valoriza-etanol-brasileiro-de-cana-de-acucar-para-manter-seu-ar-mais-limpo/>> Acessado em 13/03/2014.

UNICA – União da indústria da cana-de-açúcar. **Tecnologia do CTC para recolher palha de cana beneficia bioeletricidade e etanol celulósico** São Paulo. 2011. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/36120944920335416218/tecnologia-do-ctc-para-recolher-palha-de-cana-beneficia-bioeletricidade-e-etanol-celulosico/>> Acessado em 12/03/2014.

UNICA (União da indústria da cana-de-açúcar)
<<http://www.unica.com.br/noticias/show.asp?nwsCode=%7BE6F14E3A-0D53-4C4C-93C1-F52E6805596C%7D>> Acessado em 10/10/2012.

VASCONCELOS, G. C. de et al. Energia lignocelulósica da biomassa: uma perspectiva sustentável. Resumos do II Congresso Brasileiro de Agroecologia. **Revista Brasileira Agroecologia**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 1017-1020, 2007.

VELINI, E. D.; NEGRISOLI, E. Controle de plantas daninhas em cana crua. In: Congresso brasileiro da ciência das plantas daninhas, 22, 2000, Foz do Iguaçu. **Palestras...** Foz do Iguaçu: 2000. p. 148-164.

ZANCUL, A. **O efeito da queimada de cana-de-açúcar na qualidade do ar em Araraquara**. São Carlos. 1998. 99p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) Escola de Engenharia de São Carlo, Universidade de São Paulo, 1988.