

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**DESEMPENHO OPERACIONAL DE UM CONJUNTO TRATOR-
ENFARDADORA DE PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

EDUARDO ZANETTI LAGE

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2015

DESEMPENHO OPERACIONAL DE UM CONJUNTO TRATOR- ENFARDADORA DE PALHIÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Eduardo Zanetti Lage
Engenheiro Agrícola

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Márcio Alves de Souza

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

L174d	Lage, Eduardo Zanetti. Desempenho operacional de um conjunto trator-enfardadora de palhiço de cana-de-açúcar. / Eduardo Zanetti Lage. – Dourados, MS : UFGD, 2015. 45f. Orientador: Prof. Dr. Cristiano Márcio Alves de Souza. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados. 1. Enfardamento. 2. Biomassa. 3. Potência. I. Título. CDD – 633.61
-------	---

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central – UFGD.

©Todos os direitos reservados. Permitido a publicação parcial desde que citada a fonte.

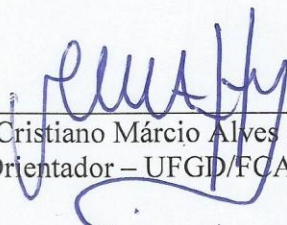
**“Desempenho operacional de um conjunto trator-enfardadora de palhico
de cana-de-açúcar”**

por

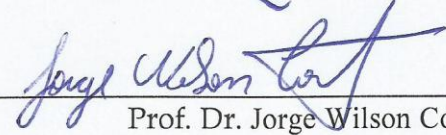
EDUARDO ZANETTI LAGE

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título
de MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Aprovada em: 30/06/2015



Prof. Dr. Cristiano Márcio Alves de Souza
Orientador – UFGD/FCA



Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez
UFGD/FCA



Prof. Dr. Orlando Moreira Júnior
UFGD/FAEN

Dedico essa dissertação aos meus pais
Gilberto Lage e
Lúcia Helena Zanetti Lage.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e irmã que, mesmo de muito longe, me deram todo o suporte que precisei nesses anos em Dourados.

Aos amigos da faculdade que fiz aqui, pela força que me deram nessa jornada. Ao Junior e Gilson, que convivem comigo diariamente, pelo apoio constante ao longo desse tempo.

À UFGD – Universidade Federal da Grande Dourados, pela oportunidade de cursar o mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da FCA – Faculdade de Ciências Agrárias, pela estrutura de ensino fornecida.

À FUNDECT - Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul, pela bolsa de estudo concedida.

Ao professor Dr. Cristiano Márcio Alves de Souza pelo apoio, ensinamentos e orientação, que me foram passados ao longo desse período.

À minha co-orientadora, professora Dra. Leidy Zulys Leyva Rafull, pelo auxílio na elaboração da dissertação.

À Usina São Fernando Açúcar e Alcool, na presença do Diretor Luiz Fernando, pelo apoio à pesquisa e pela sua incansável busca pela sustentabilidade do setor baseado no desenvolvimento tecnológico.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Cana-de-açúcar no Brasil.....	4
2.2 Palhiço de cana-de-açúcar	6
2.3 Máquinas utilizadas no recolhimento de palhiço	7
2.4 Desempenho operacional de enfardamento de palhiço de cana-de-açúcar ...	9
3 MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1 Local.....	11
3.2 Colheita e enleiramento.....	11
3.3 Recolhimento e enfardamento	13
3.4 Delineamento experimental.....	15
3.5 Avaliação do conjunto.....	15
3.5.1 Desempenho operacional	17
3.5.2 Demanda energética.....	17
3.6 Análises estatísticas.....	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1 Desempenho operacional.....	22
4.2 Demanda energética do conjunto trator-enfardadora	28
5 CONCLUSÃO	34
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

LAGE, E.Z. **Desempenho operacional de um conjunto trator-enfardadora de palhiço da cana-de-açúcar**. 38f. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS.

RESUMO

O Brasil é considerado um dos principais produtores de cana-de-açúcar do mundo. Com o aumento das áreas produtivas que tem acontecido nos últimos dez anos e a crescente preocupação com o meio ambiente, a colheita mecanizada de cana crua vem substituindo, gradativamente, a colheita manual com queima prévia. Quando se colhe a cana-de-açúcar crua, fica depositada sobre o solo uma grande quantidade de palhiço, sendo que um dos fatores que mais dificultam o seu uso para a cogeração de energia é a falta de conhecimento de processos ou sistemas que viabilizem sua retirada do campo. Objetiva-se avaliar o desempenho operacional de um conjunto trator-enfardadora de palhiço em função da velocidade de deslocamento e a rotação de acionamento dos mecanismos internos da máquina. As velocidades médias de deslocamento avaliadas foram de 2,17; 2,77; 3,28 e 3,97 km h⁻¹ e as rotações de acionamento da enfardadora foram de 947 e 1.090 rpm. Foram avaliadas a quantidade de palhiço remanescente pós-enfardamento, a capacidade de campo efetiva e operacional, a capacidade de recolhimento efetiva e operacional, a densidade dos fardos, o rendimento de campo, o consumo operacional e específico de combustível, a demanda energética do conjunto, a potência requerida no motor do trator, o consumo específico de energia, a potência requerida na TDP, a potência de tração e o consumo de combustível. Houve influência da velocidade de deslocamento e da rotação de acionamento sobre todas as variáveis estudadas, exceto para a densidade dos fardos, que não foi influenciada pelos tratamentos. A demanda energética do conjunto foi influenciada pelo aumento da velocidade de deslocamento e conseqüentemente da taxa de alimentação, enquanto a rotação de acionamento teve influência relativa.

Palavras-chave: enfardamento; biomassa; potência.

LAGE, E.Z. **Operating performance of a straw gathering system of sugarcane**, 38f. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados-MS.

ABSTRACT

Brazil is considered one of the top producers of sugarcane in the world. With the increase in production areas that have happened over the past decade and the growing concern for the environment, mechanized harvesting of raw sugar cane has replaced, gradually, manual harvesting with previous burning. When harvesting green cane, a lot of remaining straw is deposited on the ground, and one of the factors that hinder its use for energy cogeneration is the lack of knowledge of processes or systems that enable its removal from the field. This work aimed to evaluate the operational performance of a tractor-baler set of straw depending on the traveling speed and the drive speed of the machine's internal mechanisms. Average displacement speeds were evaluated 2.17; 2.77; 3.28 and 3.97 km h⁻¹ and the drive speed of the baler were 947 and 1090 rpm. Were evaluated the amount of post-baling remaining straw, effective and operational field capacity, effective and operational gathering capacity, the density of the bales, field performance, specific and operational fuel consumption, the energy demand of the set, the power required on the tractor engine, the specific energy consumption, power required in the PTO, the traction power and fuel consumption. There was influence on the travel speed and drive speed on all variables except for the density of the bales that was not affected by treatments. The energy demand of the set was influenced by the increase in travel speed, and therefore the feed rate, while the drive rotation had relative influence.

Key words: baling; biomass; power.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é mundialmente reconhecido como líder na produção de cana-de-açúcar e eficiência do setor sucroenergético. Hoje, a indústria canavieira brasileira encontra-se em novo ciclo de expansão, com grandes expectativas de crescimento da produção de açúcar, etanol e bioeletricidade.

A produção de cana-de-açúcar brasileira na última safra (2014/15) foi de 634,8 milhões de toneladas, a produtividade da cultura de 70,5 Mg ha⁻¹ e a área cultivada de 9 milhões de hectares. No Mato Grosso do Sul (MS) a área dedicada para o cultivo da cana-de-açúcar foi de 668,3 mil hectares, aumentando em 2,1% com relação à safra anterior. A produção no estado foi de 42.969,8 mil toneladas e a produtividade de 64,3 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2015). A baixa produtividade no Mato Grosso do Sul pode ser explicada pela geada que afetou o canavial, influenciando diretamente na produtividade da cana-de-açúcar no estado.

Com o aumento, nos últimos dez anos, das áreas cultivadas de cana-de-açúcar, consequentemente aumentaram as dimensões dos problemas do setor sucroenergético. A cana, que historicamente tem sido colhida queimada, tem provocado graves problemas ambientais, existindo muitas cobranças da sociedade civil para sua eliminação. Diversas leis estaduais foram criadas para diminuir e proibir essa prática. Nesse contexto, a colheita mecanizada sem queima prévia ganhou um grande impulso e importância.

Como consequência da colheita mecanizada sem queima prévia, grande quantidade de resíduo, denominado palhico, fica disposto sobre solo. Segundo Ripoli et al. (2003), essa quantidade pode chegar até 30 Mg ha⁻¹.

Ripoli (1991) define o palhico como sendo um material constituído de folhas verdes, ponteiros, palhas, rebolos ou suas frações, colmos ou suas frações e impurezas minerais neles agregados.

Pesquisas agronômicas têm demonstrado as vantagens da permanência desse resíduo no solo, formando uma cobertura vegetal que influencia numa maior retenção de água e promove a estabilização de constituintes do solo. Em contrapartida, tem sido apontado também que o excesso desse material orgânico influencia no retardamento da brotação devido a menor incidência de luz, diminuição

da temperatura do solo e aumento da umidade com consequente proliferação de doenças.

Uma prática que está sendo atualmente muito utilizada nos canaviais sul-mato-grossenses é a de retirar parte desse palhiço remanescente para ser aproveitado com combustível nas caldeiras das indústrias sucroalcooleiras.

O recolhimento do palhiço no campo apresenta-se como um grande desafio para as usinas sucroalcooleiras, devido ao alto custo envolvido para realizar as operações de enleiramento, enfardamento, retirada dos fardos do campo e transporte, além de não contar no seu parque de maquinário com máquinas específicas para a coleta e acondicionamento desse tipo de material.

Outros fatores que dificultam o aproveitamento do palhiço pelas usinas são a baixa densidade e a heterogeneidade desse material. Segundo Michelazzo (2005) a compactação realizada durante a coleta é de grande importância para diminuição dos custos de transporte. Esse mesmo autor aponta que os equipamentos utilizados apresentam baixa capacidade operacional por serem os utilizados para o recolhimento de forragens. Palermo (1998) afirma que em virtude da necessidade de se trabalhar com o palhiço ser recente, não há no mercado enfardadoras que atendam os requisitos de produção e eficiência e que levem em consideração as propriedades físicas do palhiço de cana-de-açúcar.

Com a necessidade de recolher o palhiço do campo para ser usado como biomassa na produção de energia elétrica, tornou-se de grande importância estudar o desempenho operacional das máquinas com o intuito de aumentar suas capacidades operacionais. Um dos grandes desafios é aumentar a taxa de alimentação das máquinas enfardadoras a fim de se recolher uma quantidade maior de palhiço sem que se tenham quebras e embuchamentos excessivos, e o aumento de sua velocidade de deslocamento irá influenciar diretamente na taxa de alimentação.

Michelazzo (2005), Mello (2009) e Perea (2009) realizaram estudos quanto a diferentes sistemas de recolhimento de palhiço de cana-de-açúcar, a fim de se conhecer melhor os desempenhos das máquinas e dos equipamentos que são utilizados, podendo escolher um sistema em que se consiga viabilizar economicamente o sistema de recolhimento do palhiço.

Seu recolhimento sendo feito de maneira errada pode acarretar algumas complicações, tanto no campo, com problemas de quebra dos equipamentos, como

na planta industrial da usina, com fardos de baixo poder calorífico e/ou elevados níveis de impurezas minerais.

Portanto, objetivou-se avaliar o desempenho operacional de um conjunto trator-enfardadora de feno utilizado para palhiço, em função da velocidade de deslocamento e rotação de acionamento da enfardadora.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cana-de-açúcar no Brasil

A cana-de-açúcar faz parte da família Poacea do gênero *Saccharum*. 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 foi introduzida no Brasil no século XVI, sendo que as primeiras mudas vieram em 1532, na expedição marítima de Martim Afonso de Souza (AÇÚCAR ITAMARATY, 2015).

Nos primeiros séculos de exploração da cultura foi utilizada quase que exclusivamente para produção de açúcar, mas a partir de 1975 começou também a ser utilizada para a produção em larga escala de etanol (Natale Neto, 2007). A bioeletricidade gerada a partir da queima da biomassa residual do processamento da cana é um produto que começou a ser comercializado a partir de 1987. Segundo a UNICA (2012), nesse ano três usinas do Estado de São Paulo foram as pioneiras a exportar eletricidade para uma empresa distribuidora de energia.

A bioeletricidade produzida a partir do bagaço e da palha da cana-de-açúcar é a terceira fonte mais importante da matriz elétrica do Brasil. Em termos de capacidade instalada, atingiu em maio de 2015 o marco de 10 GW em potência efetivamente fiscalizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (UNICA, 2015).

Recentemente um termo cana-energia foi inventado e vem sendo discutido sob duas visões. A primeira mostra a mudança da visão atual da cana-de-açúcar com alimento para cana-de-açúcar energia. Na segunda visão várias variedades vêm sendo desenvolvida visando o aumento da produtividade agrícola (açúcares, fibras e palhas), mas ambas buscam aumentar a produtividade agrícola, a produção de energia e a eficiência de conversão energética (SANTOS et al., 2013).

O Brasil é mundialmente reconhecido como líder na produção de cana-de-açúcar e eficiência do setor sucroalcooleiro. Hoje, a indústria canavieira brasileira encontra-se em novo ciclo de expansão, com expectativas de crescimento sem precedentes da produção de etanol e bioeletricidade.

A safra brasileira ocorre em duas épocas do ano; na região Centro-Sul a colheita é realizada entre maio e novembro e na região Norte-Nordeste a colheita é feita entre os meses de setembro a fevereiro.

A área cultivada com cana-de-açúcar que foi colhida e destinada para o setor sucroalcooleiro na safra 2014/15 foi de 9.004,5 mil hectares, distribuídos em todos estados brasileiros. A área de cana-de-açúcar teve um acréscimo de 2,2% em relação à safra 2013/14, que foi de 8811,4 mil hectares. São Paulo continua sendo o maior produtor de cana-de-açúcar com 52% (4685,7 mil hectares) da área plantada, seguido por Goiás com 9,5% (854,2 mil hectares), Minas Gerais com 8,9% (805,5 mil hectares) e Mato Grosso do Sul com 7,4% (668,3 mil hectares) (CONAB, 2015).

A produtividade obtida na atual safra apresentou uma redução de 5,7% na média geral, passando de 74,769 Mg ha⁻¹ para 70,495 Mg ha⁻¹. A região centro-sul teve uma redução da produtividade de 7,3% sendo que em São Paulo a redução chegou a 11%, devido a condições climáticas desfavoráveis, além do baixo investimento em manutenção dos canaviais (CONAB, 2015).

A produção total de cana-de-açúcar moída na safra 2014/15 foi de 634,8 milhões de toneladas, sofrendo uma redução de 3,7% em relação à safra anterior, significando uma diminuição de 24,1 milhões de toneladas. Do total dessa safra 53,8% proveio de São Paulo, 10,4% do Goiás, 9,4% de Minas Gerais, 6,8% do Paraná e 6,8% do Mato Grosso do Sul (CONAB, 2015).

Para o estado do Mato Grosso do Sul a área de cana-de-açúcar plantada aumentou em 2,1% passando de 654,5 mil hectares na safra 2013/14 para 668,3 mil hectares na safra 2014/15. A produtividade da cultura também teve um incremento de 1,4% passando de 63,4 Mg ha⁻¹ para 64,3 Mg ha⁻¹; a produção atingiu 42969,8 mil toneladas representando um aumento de 3,6% em relação à safra anterior, que foi de 41496,0 mil toneladas (CONAB, 2015).

No Brasil, historicamente a cana tem sido colhida queimada com o objetivo de facilitar o desempenho de cortador e das máquinas durante o processo de colheita. Segundo Ripoli e Ripoli (2009), essa prática tem sido responsável por provocar graves problemas ambientais, além de provocar problemas de saúde aos cortadores e danos à flora e à fauna, atingir reservas e mananciais e danificar redes elétricas. Nesse sentido, muitas cobranças da sociedade civil para sua eliminação fizeram com que o poder legislativo em vários municípios e estados produtores criassem leis para diminuir e proibir essa prática. No estado de São Paulo, a Lei Estadual Nº 11.241/02 dispõe sobre a eliminação gradativa do uso de fogo na colheita da cana-de-açúcar no estado e estabelece prazos para a eliminação das queimadas. No Mato Grosso do Sul a Lei Nº 3.357, de 9 de janeiro de 2007,

estabelece normas para a redução gradual da queima da palha da cana-de-açúcar, sem prejuízo da atividade agroindustrial canavieira e dá outras providências.

Com a proibição da queima pré-colheita a colheita mecanizada ganhou um grande impulso (SPADOTTO, 2008).

2.2 Palhiço de cana-de-açúcar

Quando realizada a colheita mecanizada da cana crua, é deixada sobre o solo grande quantidade de palhada, produto que desaparece quando se realiza a queima pré-colheita. Com isso há necessidade de recolher e aproveitar essa palhada para a produção de energia, além de poder melhorar a qualidade da rebrota da soqueira, seguindo recomendações de conservação do solo. Spadoto (2008), citando Sartori (2001), disse que existe uma grande variação na quantidade de resíduos resultantes da colheita da cana-de-açúcar sem queima prévia, indo de 6,0 Mg ha⁻¹ a 22,8 Mg ha⁻¹ de palhiço, variação esta decorrente da variedade plantada, idade da planta e condições edafoclimáticas.

A biomassa derivada da cana-de-açúcar, um dos recursos renováveis com grande disponibilidade no Brasil, é formada pelo bagaço e pelo palhiço. O bagaço é um produto fibroso resultante do esmagamento da cana-de-açúcar para extração do caldo e o palhiço é o material remanescente que fica sobre o solo resultante da colheita mecanizada e é formado por palha, folhas verdes, ponteira e/ou suas frações, frações de colmos industrializáveis ou não e eventualmente frações de raízes (RIPOLI, 2004).

Ripoli (2002) concluiu que a variabilidade espacial de palhiço remanescente no solo após a colheita da cana crua é muito grande, encontrando valores que variaram de 4,76 a 14,56 Mg ha⁻¹ e com umidades também bastante variáveis (11,1 a 39,6%). Este mesmo autor afirma que a cultura canavieira pode gerar biomassa na ordem de 15 a 30% em peso das partes aéreas das plantas, dependendo das condições de campo como variedade, idade, número de cortes e condições edafoclimáticas.

Orlando Filho et al. (1998) afirmam que maior quantidade de cobertura vegetal sobre o solo proporciona maior retenção de água e consequentemente da umidade que é responsável pelas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Estudos realizados por esse autor mostram que a adição de matéria orgânica no solo

promove a estabilização dos constituintes do solo melhorando suas características físicas e químicas em função de facilitar a aeração, infiltração de água e sua retenção.

Segundo Caldeira (2002), alguns problemas estão relacionados à presença do palhiço no campo, como o retardamento da brotação devido a: menor incidência de luz, somada à diminuição da temperatura do solo e ao aumento da umidade com consequente proliferação de doenças; imobilização de nutrientes minerais, podendo afetar a produtividade da cultura; dificuldades na operação de máquinas na realização de tratamentos culturais; problemas operacionais causando perdas e injúrias na soqueira, dentre outras.

No contexto atual em que se buscam novas fontes de bioenergia, o palhiço, que se encontra em grande abundância nos canaviais, se apresenta como uma alternativa para serem queimados como combustíveis nas caldeiras das indústrias sucroalcooleiras.

Innocente (2011) encontrou uma umidade média do palhiço de 28,7% e poder calorífico inferior de $2894 \text{ kcal kg}^{-1}$, e conclui que quanto menor a umidade do palhiço enfardado melhor será seu potencial energético.

Ripoli et al. (1990) estudando três variedades de cana-de-açúcar concluíram que o palhiço varia de 17 a 31% em peso úmido, em relação a quantidade de colmos industrializáveis contida no canavial e que seu poder calorífico útil é da ordem de $3600 \text{ kcal kg}^{-1}$.

O poder calorífico do palhiço é equivalente ao da madeira e superior ao do próprio bagaço da cana-de-açúcar, por volta de $1896 \text{ kcal kg}^{-1}$, o que o torna não mais um material descartável, mas sim um importante produto para a agregação de valor no setor sucroalcooleiro (RIPOLI, 1991).

2.3 Máquinas utilizadas no recolhimento de palhiço

Atualmente vêm sendo estudadas algumas formas e máquinas para a retirada do palhiço do campo. Alguns sistemas de recolhimento apresentam capacidades operacionais muito baixas, tornando-se inviáveis pelo alto custo envolvido.

Franco (2003) e Ripoli (2003) estudaram formas de viabilizar a colheita do palhiço de cana-de-açúcar visando seu aproveitamento como biomassa na cogeração de energia elétrica nas unidades industriais. As opções apresentadas até o momento são: recolhimento a granel, por colhedora de forragem; enfardamento

cilíndrico ou prismático com máquinas autopropelidas ou tracionadas; enfardamentos com prensas algodoeiras e briquetadoras; e colheita integral do canavial, com as colhedoras com o sistema de limpeza desligado.

Michelazzo e Braubeck (2008) analisaram seis sistemas de recolhimento do palhiço na colheita mecânica da cana-de-açúcar, que foram: fardo cilíndrico, picado a granel, briquetado, peletizado, fardo algodoeiro e colheita integral. Estes mesmos autores chegaram à conclusão que o sistema integral apresentou o menor custo total, seguido dos sistemas picado a granel, fardo cilíndrico, fardo algodoeiro, peletizado e briquetado.

Ripoli (2002) cita as operações necessárias para a coleta do palhiço em fardos; são elas: primeiramente, o resíduo remanescente deve ser enleirado por máquinas do tipo ancinho enleirador e posteriormente enfardado. Os fardos podem ser cilíndricos ou prismáticos. Depois os fardos são retirados do campo e colocados em caminhões onde são transportados até a usina para serem processados. O grande número de maquinários envolvidos no processo é que tem dificultado o recolhimento e encarecido este processo.

Ripoli et al. (2003) avaliaram três sistemas de recolhimento de palhiço quanto a sua eficiência energética e obtiveram valores de 99,22% para a colheita integral, 96,41% para o palhiço colhido a granel e 91,45% para o palhiço enfardado.

Perea et al. (2012) estudaram duas modalidades de colheita de palhiço, uma sendo parcialmente integrada (colheita conjunta dos colmos e do palhiço) com separação na indústria pelo sistema de limpeza a seco, e a outra se utilizando de equipamentos para a retirada deste material do solo. Foi usada uma colhedora de forragem Class Jaguar 860, que obteve uma produtividade de 4,95 Mg ha⁻¹ e o custo do palhiço posto na usina foi de R\$58,14 por tonelada. Utilizou-se também uma colhedora Twyster Press 5000 que recolheu o palhiço, sem a necessidade de enleiramento, nas condições seca e verde obtendo valores de produtividade na ordem de 4,83 e 10,29 Mg ha⁻¹; respectivamente, o custo do palhiço posto na usina foi de R\$63,02 por tonelada. Utilizou-se também uma enfardadora do tipo câmara fixa, modelo Agroform AF120, que obteve uma produtividade de 6,89 Mg ha⁻¹ e um custo do palhiço posto na usina de R\$69,44 por tonelada. O mesmo autor concluiu que os três sistemas de recolhimento obtiveram custos mais elevados do que a colheita conjunta dos colmos e do palhiço, sendo que o maior custo foi para o sistema que

recolhia e enfardava o palhiço de valor R\$69,44/Mg contra R\$30,77/Mg, que foi o custo apurado para o sistema de limpeza a seco.

Mello (2009) estudou o desempenho técnico, econômico e energético de uma enfardadora Nogueira Express 5040 que trabalhou em três condições diferentes: uma com palha “in natura” (T1), outra com enleiramento simples (T2) e a outra com enleiramento duplo (T3). As produtividades de enfardamento encontradas foram 7,75, 9,20 e 7,54 Mg ha⁻¹ para os tratamentos T1, T2 e T3, respectivamente.

Torrezan (2003) utilizou no seu estudo uma enfardadora da marca New Holland, modelo BB940, que recolheu o palhiço em três condições de enleiramento: simples, duplo e triplo. As capacidades de recolhimento de palhiço enfardadas foram 7,2, 8,9 e 7,2 Mg ha⁻¹ para o enleiramento simples, duplo e triplo, respectivamente.

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

Segundo Magalhães e Braunbeck (2001), citado por Torresan (2003), a palha quando está seca apresenta uma baixa massa específica. Para diminuir o custo com transporte deve ser efetuado o adensamento, onde o volume é diminuído em aproximadamente 15 vezes. Segundo os autores esse adensamento é feito com as enfardadoras de forragem de êmbolos e as rotativas.

A norma D497 da American Society of Agricultural Engineers (ASAE, 2003) informa a que a eficiência de campo para enfardadoras de fardos grandes é de 80%, variando numa faixa de 70% a 90% e a velocidade de campo dessas máquinas varia de 6,5 a 13,0 km.h⁻¹, sendo a velocidade típica da ordem de 8,0 km h⁻¹.

A Copersucar (1998) realizou estudos para testar a viabilidade de recolher o palhiço deixado no campo após a colheita da cana crua, e foram ensaiadas algumas enfardadoras cujos resultados constam na Tabela 1. As enfardadoras empregadas foram Sode-JS90, Semeato ROL-1518 e New Holland NH-570. Os ensaios foram realizados de dois a três dias após a colheita da cana crua.

Algumas observações, com base nos ensaios, foram estabelecidas sobre o enleiramento: melhora a capacidade de recolhimento de palhiço, reduz danos aos mecanismos recolhedores (que podem trabalhar afastados do solo), evita a propagação do fogo acidental. Com respeito ao tipo de fardos, os resultados indicam que fardos retangulares são os mais indicados, pois apresentam maior capacidade operacional e melhor ocupação na carroceria do caminhão de transportar os fardos.

TABELA 1. Resultado dos ensaios de três enfardadoras realizados pela Copersucar – projeto BRA/96/G31 (1998).

Modelos	Enleiramento	MF (kg)	DF (kg m ⁻³)	QTF (%)	CaEn (Mg h ⁻¹)
JS-90	Sim	105,8	118,0	5,6	1,8
JS-90	Não	119,3	129,3	2,8	2,0
ROL-1518	Sim	285,4	94,7	6,2	2,7
ROL-1518	Não	260,0	107,5	2,3	1,0
NH-570	Sim	15,0	112,0	-	9,0

MF - massa dos fardos; DF - densidade dos fardos; QTF - quantidade de terra nos fardos; CaEn - capacidade de enfardamento.

Gomes (2014) avaliou o desempenho operacional de duas máquinas enfardadoras enleirando 50%, 70% e 90% da quantidade total de palhicho disponível no campo. A máquina 2 apresentou maior eficiência de recolhimento nos três tratamentos. Para a leira com 90% do palhicho da área enleirado, a máquina 2 recolheu 97% do palhicho e a máquina 1 recolheu 91%. A maior diferença foi observada para a leira com 50% do palhicho enleirado, onde obteve uma diferença de 9%. A máquina 1 obteve uma capacidade de campo operacional média de 4,46 ha h⁻¹ enquanto a máquina 2 obteve 5,87 ha h⁻¹. Quanto maior for o volume de palhicho da cana-de-açúcar enleirado, maior será a quantidade de fardos/hora produzidos, já que a impureza mineral não diferiu entre os tratamentos.

Bizuti (2003) estudou o recolhimento de palhicho por meio de uma enfardadora cilíndrica. Neste estudo utilizou-se o enleirador com uma e duas passadas, a produtividade média de palhicho foi de 27 Mg ha⁻¹. A massa específica média dos fardos foi de 168,3 kg m⁻³ para uma passada e 191,6 kg m⁻³ para duas passadas. A enfardadora teve uma capacidade efetiva de 8,5 Mg h⁻¹ e 12,9 Mg h⁻¹, respectivamente, para uma e duas passadas. O consumo de combustível da operação de enfardamento foi de 0,64 L Mg⁻¹ para uma passada e 0,43 L Mg⁻¹ para duas passadas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local

O trabalho de campo foi realizado na Fazenda Fortaleza pertencente a Usina São Fernando Açúcar e Álcool, que se localiza nas coordenadas latitude 22°31'14,08" S e longitude 55°06'14,02 W, e no Laboratório de Projetos de Máquinas da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados, localizado no município de Dourados-MS.

A área experimental estava cultivada com a variedade de cana-de-açúcar RB 855536, plantada no dia 23/11/2010, que foi colhida mecanicamente, em seu 5° corte. O espaçamento de plantio foi de 1,5 m.

A colheita mecanizada da cana crua na área experimental foi realizada no dia 24/02/2015 e a operação de enfardamento do palhiço foi realizada cinco dias após a colheita.

3.2 Colheita e enleiramento

A área experimental em estudo foi colhida mecanicamente, sem queima prévia, por uma colhedora de cana-de-açúcar crua.

Cinco dias após a colheita foi determinada a produtividade de palhiço utilizando-se uma armação quadrada de 1,0 m de lado (Figura 1). Antes da operação de enleiramento, a armação foi lançada, aleatoriamente, sobre a área experimental em cinco pontos. A produtividade de palhiço foi obtida do quociente entre a massa de palhiço e a área da armação, sendo posteriormente corrigidos os valores para Mg ha^{-1} , encontrando o valor de 9,17 Mg ha^{-1} .

As amostras coletadas foram depositadas em sacos de ráfia e levadas para a FAECA/UFGD (Fazenda experimental de Ciências Agrárias), onde suas massas foram aferidas com o auxílio de uma balança Balmak, modelo ELP-25, com capacidade de 25 kg, obtendo assim o peso das amostras.



FIGURA 1. Armação para se determinar a produtividade de palhço de cana-de-açúcar.

Para a operação de enleiramento foi utilizado um trator da marca Valtra, modelo BH 180 (Figura 2), com potência máxima no motor de seis cilindros de 139 kW a 2.300 rpm, torque máximo a 1.400 rpm (663 Nm). Neste trator estava acoplado o enleirador, da marca New Holland, modelo H5980 (Figura 3), que foi usado para confecção das leiras. Este era composto de 17 discos com diâmetro de 1524 mm, com 36 dedos de borracha por disco.



FIGURA 2. Trator Valtra, modelo BH180, onde estava acoplado o enleirador.

O enleirador estava regulado para formar uma leira a partir de cinco linhas de plantio; como o espaçamento entre linhas era de 1,5 m, a leira resultou em um espaçamento total de 7,5 m por passada. Foi feito um total de 24 leiras.



FIGURA 3. Ancinho enleirador, da marca New Holland, modelo H5980, usado na formação das leiras de palhço.

3.3 Recolhimento e enfardamento

No recolhimento de palhço foi usado um trator da marca John Deere, modelo 6165J (Figura 4), onde estava acoplada a enfardadora da marca Kuhn, modelo LSB 1290. O trator tem potência do motor de 123 kW, torque máximo a 1.400 rpm de 717 Nm, seis cilindros, cilindrada de 6,8 L, rotação nominal na TDP de 540/1.000 rpm, massa com lastro de 9.400 kg e eficiência de transmissão entre o motor e a TDP de 86%.

Características da enfardadora Kuhn, modelo LSB 1290 (Figura 5): largura da plataforma recolhadora: 2,30 m; número de batidas do pistão: 46 batidas/min; comprimento do curso: 69,5 cm; controle da densidade da câmara de enfardamento: 4 cilindros hidráulicos; comprimento da câmara de enfardamento: 3m; número de atadeiras: 6 (tipo Raussendorf); espaço entre os cordéis: 180 mm; potência mínima do trator: 107 kW; potência da TDP: 85 kW; frequência de rotação da TDP: 1.000 rpm e dimensões do fardo conforme fabricante: comprimento: 2,20 m; largura: 1,20 m; altura: 0,90 m.



FIGURA 4. Trator John Deere, modelo 6165J.



FIGURA 5. Enfardadora Kuhn, modelo LSB 1290, utilizada para recolhimento de palhiço de cana-de-açúcar.

Para determinar a rotação de acionamento da máquina mediu-se a rotação da tomada de potência do trator (TDP) utilizando um tacômetro com mira a laser da marca Instrutherm e modelo TD-712, com resolução de 0,1 rpm. As rotações utilizadas no motor do trator foram de 1.900 e 2.200 rpm e as respectivas leituras do tacômetro na TDP foram de 947 e 1.090 rpm.

As velocidades de deslocamento do trator foram variadas por meio do escalonamento das marchas (2A, 3A, 4A e 1B) obtendo as seguintes médias para as quatro velocidades 2,17; 2,77; 3,28 e 3,97 km h⁻¹. Não foi possível usar maiores velocidades devido ter-se observado embuchamento da máquina em alguns casos, e a decisão comercial foi limitar a velocidade.

3.4 Delineamento experimental

O experimento para analisar o desempenho operacional foi montado no esquema de parcelas subdivididas, em delineamento inteiramente casualizado com 3 repetições onde a parcela constituiu-se de duas rotações de acionamento da enfardadora fornecidas pela TDP do trator (947 e 1.090 rpm) e as subparcelas de quatro velocidades médias de deslocamento do conjunto trator-enfardadora (2,17; 2,77; 3,28 e 3,97 km h⁻¹).

3.5 Avaliação do conjunto

Na avaliação do conjunto trator-enfardadora foram determinadas as capacidades de campo efetiva e operacional, a capacidade de enfardamento efetiva e operacional, a densidade do fardo, o palhiço remanescente e a demanda energética do conjunto.

As distâncias entre os fardos, e conseqüentemente a distância total percorrida pelo conjunto trator-enfardadora, foram medidas com uma trena de 50 m. O tempo necessário para a produção de 5,0 fardos foi cronometrado com o auxílio de um cronômetro digital Vollo, modelo VL1809, com resolução de 0,01 s.

A densidade dos fardos foi determinada pelo quociente entre a massa e o volume dos fardos. Para determinar o volume dos fardos de palhiço foram medidas as suas dimensões principais (altura, comprimento e largura), com o auxílio de uma trena de 5,0 m e resolução de 1,0 mm. A massa de cada fardo (Figura 6) foi determinada por meio de um dinamômetro, marca Líder, modelo PR30, com capacidade de 1.000 kg.



FIGURA 6. Pesagem dos fardos no campo com o auxílio do dinamômetro.

O palhiço remanescente foi coletado após a operação de enfardamento e as amostras foram coletas na leira onde a enfardadora passou. Foi feita uma armação de um metro quadrado (Figura 7) com base na largura de recolhimento da enfardadora e o palhiço foi coletado em três pontos ao longo da distância percorrida pelo conjunto trator-enfardadora.



FIGURA 7. Coleta de palhiço remanescente de cana-de-açúcar após a operação de enfardamento.

As amostras de palhiço coletadas foram depositadas em sacos plásticos onde foram levadas para a FAECA/UFGD (Fazenda Experimental de Ciências Agrárias). As amostras tiveram suas massas aferidas com a balança Balmak, modelo ELP-25, com capacidade de 25 kg, assim obtendo a quantidade de palhiço remanescente, após o enfardamento, em Mg ha^{-1} .

3.5.1 Desempenho operacional

A capacidade de campo foi determinada dividindo-se a área da parcela pelo tempo gasto para colher a parcela, tempo este que foi cronometrado utilizando um cronômetro digital Vollo, modelo VL1809, com 0,01 s de resolução, sendo seus valores expressos em ha h^{-1} .

A capacidade de campo operacional foi obtida pela relação entre a capacidade de campo efetiva e o rendimento de campo (ASAE, 2003).

A capacidade de enfardamento efetiva foi obtida da relação entre a massa total de palhiço enfardado e o tempo gasto durante a operação (Equação 1). A capacidade de enfardamento operacional foi determinada pela relação entre a capacidade de enfardamento efetiva e o rendimento de campo (ASAE, 2003).

$$C_c = 3,6 \frac{m_g}{t} \quad (1)$$

em que,

C_c - capacidade de enfardamento, Mg h^{-1} ;

m_g - massa de palhiço recolhida e enfardada, kg;

t - tempo gasto na unidade experimental, s.

3.5.2 Demanda energética

A potência demandada pela enfardadora e fornecida pelo trator para tracionar e acionar a máquina foi obtida pela soma da potência necessária para vencer a resistência ao rolamento e a potência para acionar a enfardadora (Equação 2).

$$P_m = \frac{P_{RR}}{\eta_1 \cdot \eta_2} + \frac{P_{TDP}}{\eta_1} \quad (2)$$

em que,

P_m - potência equivalente no motor do trator demandada pela enfardadora, kW;

P_{RR} - potência requerida na barra de tração, kW;

P_{TDP} - potência exigida para acionar a enfardadora, kW;

η_1 - eficiência de transmissão mecânica entre o motor e a TDP do trator, dec.;

η_2 - relação entre a potência na barra de tração e a potência disponível na TDP, dec.

A potência na barra foi calculada pelo produto da resistência ao rolamento pela velocidade de deslocamento (Equação 3).

$$P_{RR} = \frac{R_R \cdot V}{3600} \quad (3)$$

em que,

R_R - resistência ao rolamento, em N;

V - velocidade de deslocamento, km h⁻¹.

Para vencer a resistência ao rolamento, torna-se necessária uma força que deve ser incluída no cálculo da potência requerida para a tração da máquina. Os valores de resistência ao rolamento dependem das dimensões das rodas, da pressão dos pneus, do tipo e da umidade do solo. Para efeito de cálculo, assume-se que a enfardadora trabalha em condições em que a umidade do solo é inferior à sua capacidade de campo, estando o solo firme.

A resistência do solo ao rolamento para rodas em solo não movimentado (ASAE, 2003) foi determinada pelas equações 4 e 5.

$$R_R = W \cdot \left(\frac{1,2}{C_n} + 0,04 \right) \quad (4)$$

onde,

$$C_n = \frac{I_c \cdot b \cdot d}{W} \quad (5)$$

em que,

W - carga dinâmica sobre a roda, em N;

C_n - coeficiente de mobilidade, que depende do índice de cone, das dimensões do pneu e da carga dinâmica;

I_c - índice de cone do solo no momento da operação, Pa;

b - largura do pneu, m;

d - diâmetro indeformado do pneu, m.

A potência de tração equivalente no motor do trator foi determinada utilizando-se uma relação de 0,62 entre a potência na barra e a potência na TDP e uma eficiência de transmissão do motor para a TDP de 86%.

A potência requerida para acionar os mecanismos internos da enfardadora foi determinada conforme metodologia apresenta em ASAE (2003), conforme Equação 6.

$$P_{TDP} = \mu \cdot P_{pto} \quad (6)$$

em que,

P_{pto} - potência requerida na TDP do trator para acionar uma enfardadora de fardos retangulares grande, kW;

μ - constante de correção para palhiço, adm.

A potência requerida na TDP para acionar uma enfardadora que faz fardos retangulares grandes foi estimada em função de sua taxa de alimentação (ASAE, 2003), conforme Equação 7. A potência da TDP equivalente no motor do trator foi determinada utilizando-se uma eficiência de transmissão do motor para a TDP de 86%.

$$P_{pto} = 4,0 + 1,3 \cdot F \quad (7)$$

em que,

F - taxa de alimentação, $Mg \ h^{-1}$.

O material envolvido no trabalho foi o palhiço, sendo um resíduo muito heterogêneo e de maior densidade. Assim, o objetivo do uso da constante de correção de palhiço foi obter resultados mais próximos da realidade da demanda de potência desse tipo de material enfardado com máquinas projetadas para materiais menos densos.

Para determinar o valor da constante de correção foi realizado um processo iterativo no módulo da constante e então foi obtido o consumo de combustível estimado. Esses procedimentos foram repetidos até que o consumo estimado se igualasse ao consumo de combustível obtido experimentalmente.

O consumo horário de combustível experimental foi obtido da mensuração do consumo de combustível do trator em relação ao seu tempo de uso diário. O consumo horário de diesel foi estimado em função da potência na tomada de potência, conforme descrito na Equação 8 (ASAE, 2003).

$$Q = 0,223 \cdot P_{TDP} \quad (8)$$

em que,

Q - consumo horário de combustível, L h⁻¹.

O consumo operacional de combustível foi determinado pelo quociente do consumo horário de combustível e a capacidade de campo operacional (Equação 9).

$$CO = \frac{Q}{C_{co}} \quad (9)$$

em que,

CO - consumo operacional de combustível, L ha⁻¹;

Cco - capacidade de campo operacional, ha h⁻¹.

O consumo específico de combustível foi determinado pelo quociente do consumo horário de combustível e a capacidade de enfardamento efetivo (Equação 10).

$$CE = \frac{Q}{C_c} \quad (10)$$

em que,

CE - consumo específico de combustível, L Mg⁻¹.

O consumo específico de energia foi determinado pela relação entre a potência requerida no motor do trator e a capacidade de enfardamento efetivo (Equação 11).

$$CEe = \frac{P_m}{C_c} \quad (11)$$

em que,

CEe - consumo específico de energia, kWh Mg⁻¹.

3.6 Análises estatísticas

Os dados obtidos dos testes de desempenho operacional foram submetidos à análise de variância e os efeitos dos tratamentos foram testados pelo teste F, com significância de 10%. Quando significativo pelo teste F, os dados foram

submetidos ao processo de regressão polinomial, sendo os coeficientes testados pelo teste t, a 10% de probabilidade.

Para testar o modelo matemático foi feita comparação entre os dados de consumo horário de combustível observado e aquele obtido pelo modelo matemático, utilizando-se a combinação do teste t aplicado ao erro médio (Equação 12), do coeficiente de correlação linear ($r_{Y_jY_1}$) e do acerto do modelo matemático ($|1 - \bar{e}|$).

$$t_{\bar{e}} = \frac{\bar{e} - 0}{S_{\bar{e}}} \sim t_{\alpha}(n-1) \quad (12)$$

Sendo:

$$S_{\bar{e}} = \frac{S_e}{\sqrt{n}} \quad (13)$$

em que,

$\bar{e}$ - erro relativo médio;

$S_{\bar{e}}$ - desvio padrão do erro médio;

S_e - desvio padrão;

n - número de observações;

α - significância do teste F;

$t_{\bar{e}}$ - valor do teste t do erro médio.

O erro relativo médio entre os dados de consumo horário de combustível observado e aquele obtido pelo modelo matemático foi determinado utilizando-se a Equação 14. Considerando-se que o erro (Equação 15) é uma variável que segue uma distribuição normal e ocorre ao acaso, pode-se testar a hipótese ($H_0: \bar{e} = 0$) que o erro relativo médio é zero:

$$\bar{e} = \frac{\sum_i^n \frac{Y_{si} - Y_{0i}}{Y_{0i}}}{n} \quad (14)$$

$$e = \frac{Y_s - Y_0}{Y_0} \quad (15)$$

em que,

Y_s - vetor de valores simulados;

Y_0 - vetor de valores observados;

e - erro relativo;

$i = 1, 2, \dots, n$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se que houve influência da interação entre a velocidade de deslocamento e a rotação de acionamento sobre todas as variáveis estudadas, exceto para a densidade dos fardos que não foi influenciada pelos tratamentos e o consumo operacional, que foi influenciado pela rotação (Quadro 2).

Quadro 2. Resumo da análise de variância dos dados de palhiço remanescente (PR), capacidade de campo efetiva (CCE) e operacional (CCO), capacidade de enfardamento efetiva (CEE) e operacional (CEO), densidade (D), consumo operacional (CO), consumo específico (CE) e rendimento de campo (RC).

FV	GL	PR	CCE	CCO	CEE	D
RO	1	14,89	0,90**	0,46**	3,74	2,63
Erro(A)	4	0,35	0,62	0,08	26,66	631,63
V	3	2,71	5,89**	0,97**	307,29**	1876,31
VxRO	3	5,55*	0,96*	0,18*	103,26*	779,82
Resíduo	12	7,99	1,13	0,05	121,64	4022,45
CV	-	22,7	13,5	16,9	24,8	10,9
		CEO	RC	CO	CE	
RO	1	0,10	15,21**	37,79**	0,01	
Erro(A)	4	3,71	2,61	0,71	0,008	
V	3	48,54**	33,07**	2,19	0,17**	
VxRO	3	16,60*	5,42*	2,45	0,03*	
Resíduo	12	4,92	1,59	1,08	0,01	
CV	-	28,8	2,1	11,8	6,4	

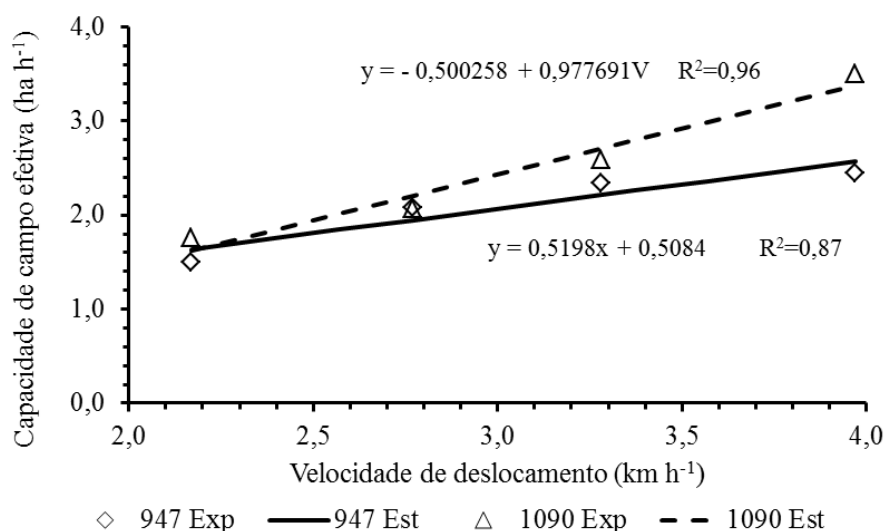
* e ** significativo a 10% e 5% de probabilidade, pelo teste F. RO: Rotação; V: Velocidade; GL: Grau de liberdade.

4.1 Desempenho operacional

A densidade média dos fardos do palhiço da cana-de-açúcar obtidas para as velocidades de deslocamento do conjunto trator-enfardadora e as duas rotações foi de $167,14 \pm 14,13 \text{ kg m}^{-3}$. Em trabalho realizado por Palermo (1998) obteve-se densidade superiores, com valores médios de $247,7 \text{ kg m}^{-3}$. Por outro lado, no trabalho realizado por Copersucar (1998) a maior densidade encontrada depois do ensaio de cinco enfardadoras foi de $129,3 \text{ kg m}^{-3}$. Gomes et al. (2014) encontrou uma densidade média para os fardos de $169,27 \text{ kg m}^{-3}$, resultado semelhante ao encontrado no presente trabalho.

Pôde ser observado que a capacidade de campo efetiva aumenta linearmente com o aumento da velocidade de deslocamento para as duas rotações usadas na TDP do trator (Figura 8). Torrezan (2003) observou valores de capacidade de campo efetiva de enfardamento de palhiço de 1,09 a 3,64 ha h⁻¹, com média no enfardamento de 3 leiras de 2,91 ha h⁻¹, resultados semelhantes aos apresentados na Figura 8.

Quando a rotação de 1.090 rpm foi usada no acionamento da enfardadora observou-se maiores valores de capacidade de campo efetiva, quando comparada à rotação de 947 rpm. Esse resultado está ligado ao fato da rotação de acionamento da máquina ter sido feita pela variação da rotação do motor do trator, uma vez que com menos energia disponível na menor rotação acabou-se aumentando as perdas de movimento com o aumento da velocidade.

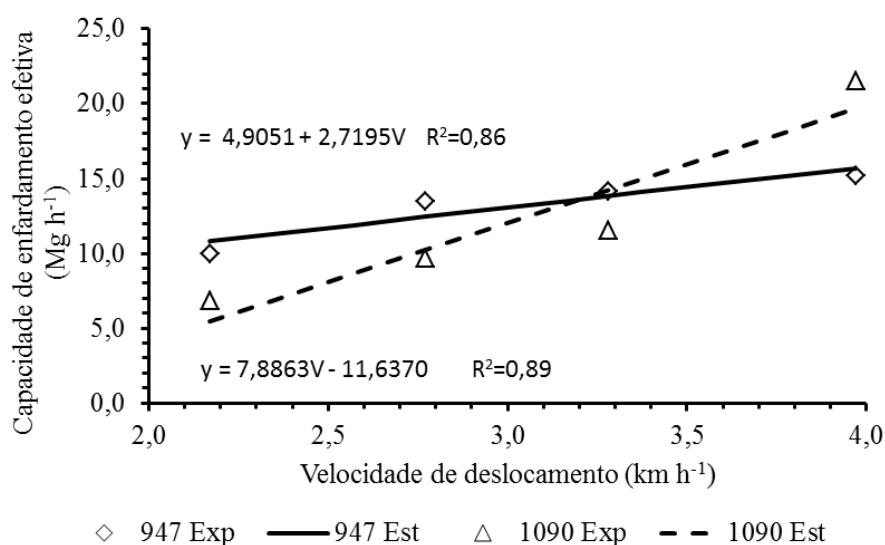


*Significativo a 10% pelo teste t.

FIGURA 8. Capacidade de campo efetiva em função da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora para as respectivas rotações da TDP do trator.

Para velocidades de deslocamento abaixo de 3,20 km h⁻¹, o conjunto teve maior valores da capacidade de enfardamento do palhiço utilizando a rotação de 947 rpm, enquanto para valores acima dessa velocidade a capacidade de enfardamento foi maior para a rotação de 1.090 rpm (Figura 9). Resultados semelhantes foram obtidos por Torrezan (2003) e Copersucar (1998), com dados variando de 9,0 a 20,29 Mg h⁻¹.

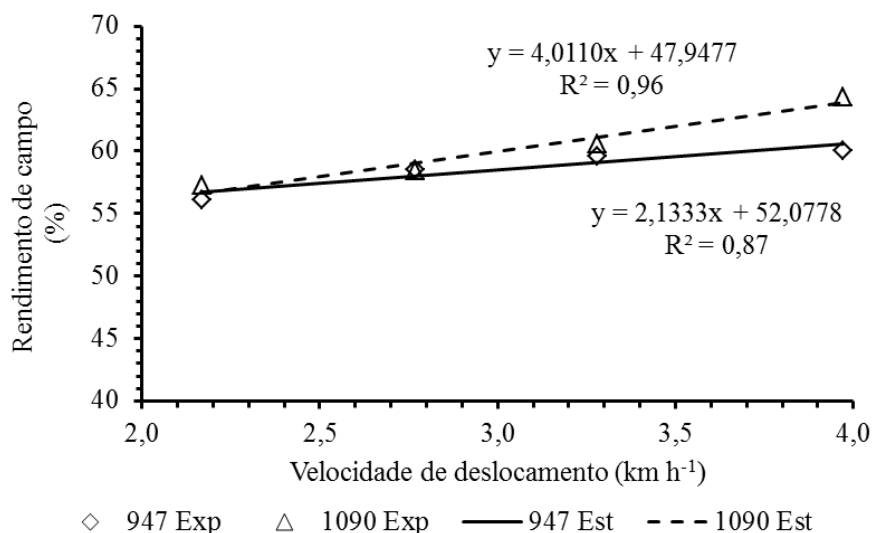
Bizuti (2003), trabalhando com fardos cilíndricos, obteve capacidade de enfardamento de $8,5 \text{ Mg h}^{-1}$.



*Significativo a 10% pelo teste t.

FIGURA 9. Capacidade de enfardamento de palhço de cana-de-açúcar em função da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora para as respectivas rotações.

Observa-se que o rendimento de campo aumentou linearmente com o incremento da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora (Figura 10). Analisando o efeito da rotação da TDP sobre o rendimento de campo na operação de enfardamento e palhço, observou-se que a rotação de 1.090 rpm proporcionou maiores valores de rendimento do que a de 947 rpm, principalmente para as maiores velocidades. Resultados de rendimentos de campo de 46,3 e 70,5% para o enfardamento de palhço com fardos retangulares e cilíndricos, respectivamente, foram obtidos de Howe e Sreesangkon (1990).

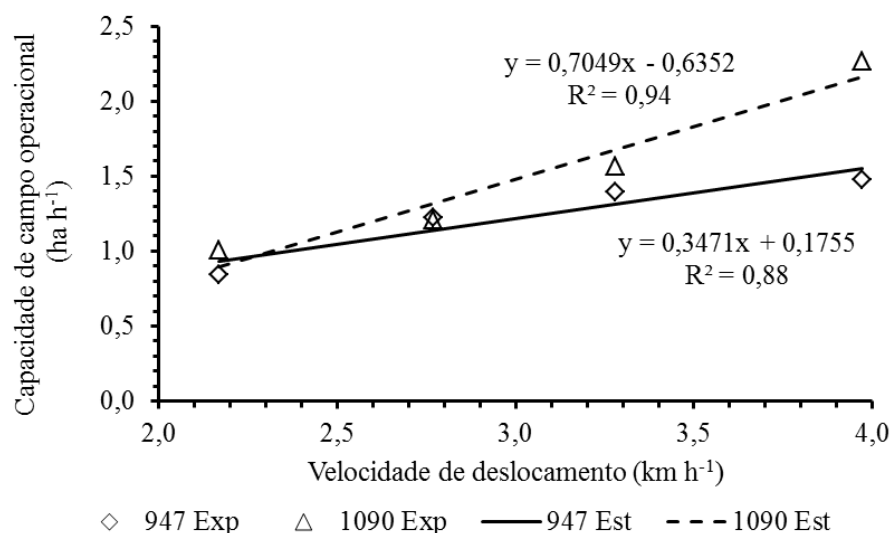


*Significativo a 10% pelo teste t.

FIGURA 10. Rendimento de campo no enfardamento do palhico em função da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora para as duas rotações da TDP do trator.

A capacidade de campo operacional aumenta quando é incrementada a velocidade de deslocamento, conforme dados apresentados na Figura 11. A rotação de 1.090 rpm proporcionou maiores valores de capacidade de campo operacional do que quando a rotação de 947 rpm foi usada. Gomes (2014) obteve valores de capacidade de campo operacional médio da ordem de 5,2 ha h⁻¹, enquanto Molina Júnior et al. (1995) observaram 0,26 ha h⁻¹.

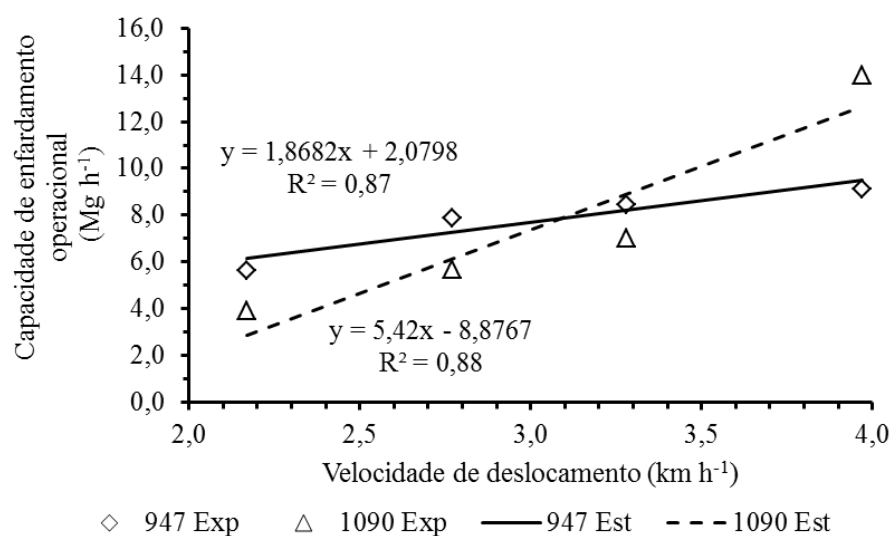
A tendência foi de aumentar a diferença entre as capacidades de campo operacional obtidas nas rotações de 947 e 1.090 rpm com o aumento da velocidade de deslocamento (Figura 11). Na menor velocidade não se observou diferença entre as capacidades de campo operacional. Tendência semelhante foi observada na capacidade de campo efetiva e do rendimento de campo.



*Significativo a 10% pelo teste t.

FIGURA 11. Capacidade de campo operacional do enfardamento do palhço em função da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora para as duas rotações da TDP do trator.

Nota-se que houve aumento da capacidade de enfardamento da máquina com o aumento da velocidade de deslocamento do conjunto, para as duas rotações da TDP (Figura 12). Molina Júnior et al. (1995) obtiveram capacidade operacional de 1,11 Mg h⁻¹ e Howe e Sreesangkon (1990) de 1,04 Mg h⁻¹.

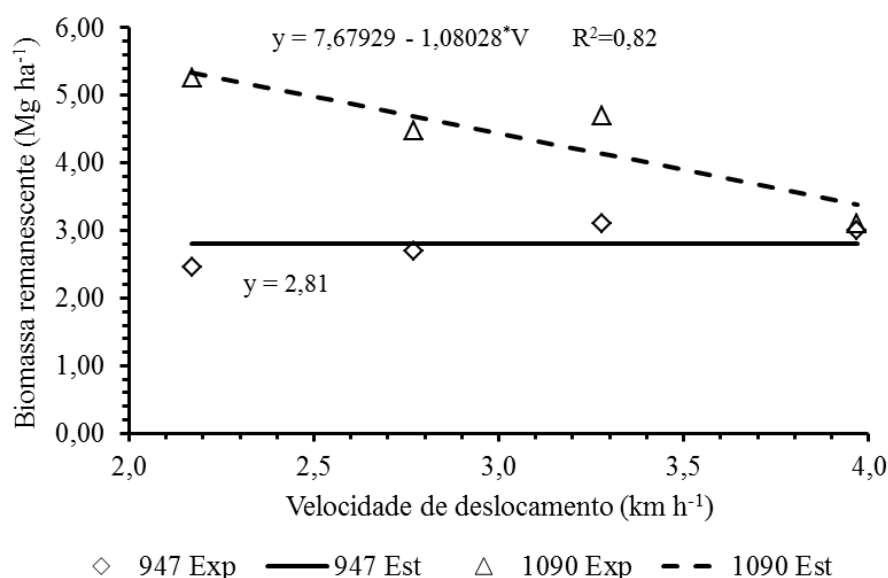


*Significativo a 10% pelo teste t.

FIGURA 12. Capacidade de enfardamento operacional de palhço em função da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora para as duas rotações da TDP do trator.

Observa-se que para velocidades de deslocamento inferiores a $3,1 \text{ km h}^{-1}$, a rotação de 947 rpm proporcionou as maiores capacidades de enfardamento, enquanto para maiores velocidades a rotação de 1.090 rpm proporcionou maiores capacidades (Figura 12).

Verifica-se que não houve influência da velocidade de deslocamento da máquina sobre os valores de massa remanescente de palhiço quando foi usada 947 rpm de rotação de acionamento da enfardadora (Figura 13). Por outro lado, quando foi usada a rotação de 1.090 rpm, houve redução da biomassa remanescente com o aumento da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora. Torrezan (2003) obteve $19,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ de biomassa remanescente no enfardamento de palhiço da cana, enquanto Bizuti (2003) encontrou valores em torno de $17,3 \text{ Mg ha}^{-1}$.



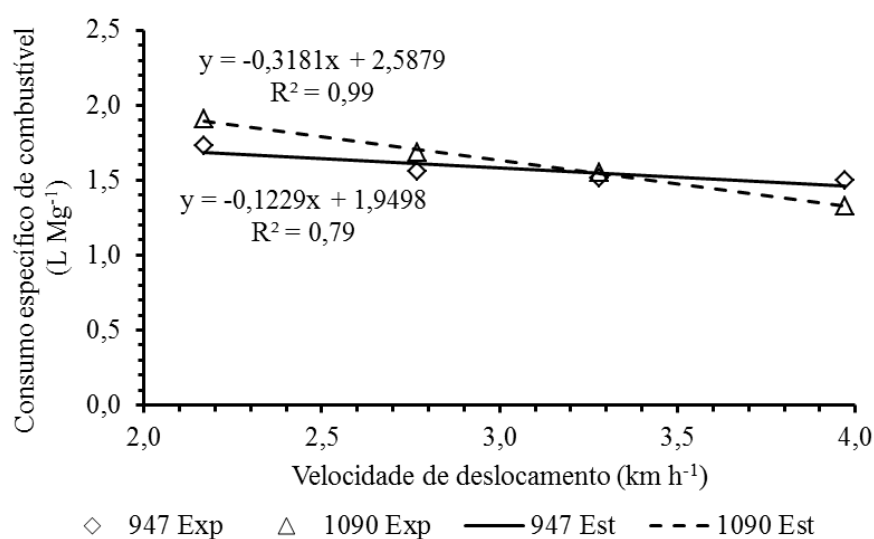
*Significativo a 10% pelo teste t.

FIGURA 13. Massa remanescente do palhiço da cana-de-açúcar em função da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora para as respectivas rotações da TDP do trator.

O consumo operacional do trator quando tracionou e acionou a enfardadora foi de 10,03 e 7,52 L ha⁻¹ para as rotações de 947 e 1.090 rpm, respectivamente. Resultados semelhantes foram obtidos por Torrezan (2003) e por

Molina Júnior et al. (1995), que encontraram valores de 10,59 e 16,5 L ha⁻¹, respectivamente.

O consumo específico de combustível do trator diminui com o aumento da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora. Observa-se que os menores valores de consumo específico foram verificados na rotação de 1.090 rpm, a partir da velocidade de 3,27 km h⁻¹. Resultados semelhantes foram obtidos por Torrezan (2003), Molina Júnior et al. (1995) e Molina Júnior (1991), que encontraram valores de 1,42; 3,91; e 4,17 L Mg⁻¹, respectivamente.



*Significativo a 10% pelo teste t.

FIGURA 14. Consumo específico de combustível do trator durante a operação de enfardamento do palhço da cana-de-açúcar em função da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora para as respectivas rotações da TDP do trator.

4.2 Demanda energética do conjunto trator-enfardadora

No Quadro 3 está apresentado o resumo da análise estatística dos dados de consumo horário de combustível observado e obtido com o modelo matemático. Pôde-se verificar que o consumo horário calculado médio foi semelhante ao consumo horário observado médio, e que o erro se manifesta de maneira aleatória na comparação entre os dados dos dois consumos de combustível.

O acerto do modelo matemático demonstra que a predição do consumo horário de combustível calculado apresentou erro relativo menor que 3% com relação aos dados médios do consumo do trator (Quadro 3).

O coeficiente de correlação linear foi positivo e significativo, demonstrando que os valores obtidos pelo modelo matemático são representativos. O valor do coeficiente de correlação linear não foi maior devido ao fato dos dados observados terem sido obtidos em área comercial. Nesse caso, as medidas foram feitas nos reabastecimentos do tanque de combustível do trator, enquanto no modelo os valores são calculados em função da taxa de alimentação e parâmetros operacionais, em que se observou maior variação dos dados do que aqueles obtidos de maneira média no talhão, como no caso comercial.

QUADRO 3. Resumo da análise estatística dos dados de consumo horário de combustível observado e obtido com o modelo matemático.

Teste estatístico	Observado (Y_i)	Calculado (Y_j)
Consumo horário médio ($L\ h^{-1}$)	11,78a	11,76a
Teste t do erro médio ($\bar{e}$)		0,428 ^{ns}
Coeficiente de correlação linear ($r_{Y_j Y_i}$)		0,79 ^{**}
Acerto médio do modelo ($ 1 - \bar{e} $)		0,978

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si ($p < 0,05$). ^{ns} não significativo a 5%. ^{**} Significativo a 5%, pelo teste t.

Na Figura 15 pode-se observar que não houve diferença entre as duas rotações de acionamento da enfardadora em relação à potência de tração. Observamos que com o aumento da velocidade de deslocamento a potência de tração exigida para movimentar a enfardadora também aumentou. Resultados semelhantes foram obtidos por Souza et al. (2001).

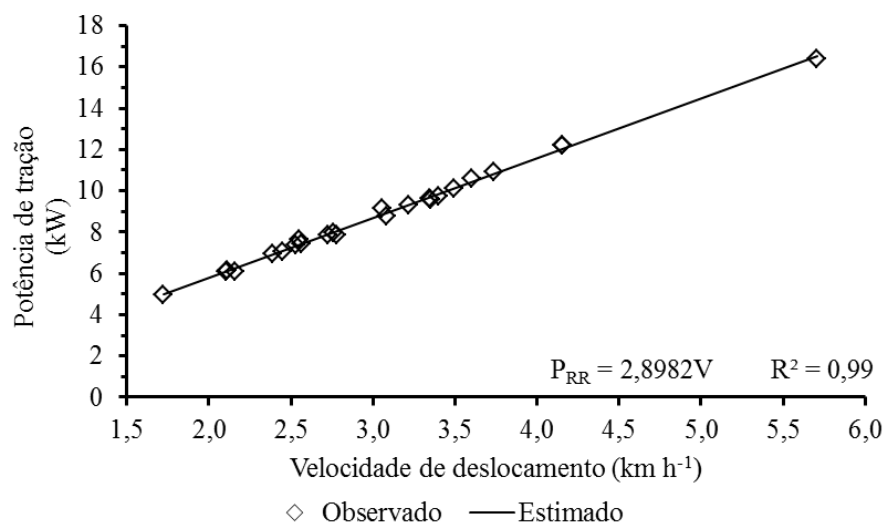


FIGURA 15. Potência de tração em função da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora.

A taxa de alimentação da enfardadora em função da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora, para as duas rotações de acionamento da máquina, está apresentada da Figura 16. Observa-se que houve aumento linear da taxa de alimentação da máquina com o aumento da velocidade de deslocamento, independentemente da rotação de acionamento da enfardadora usada.

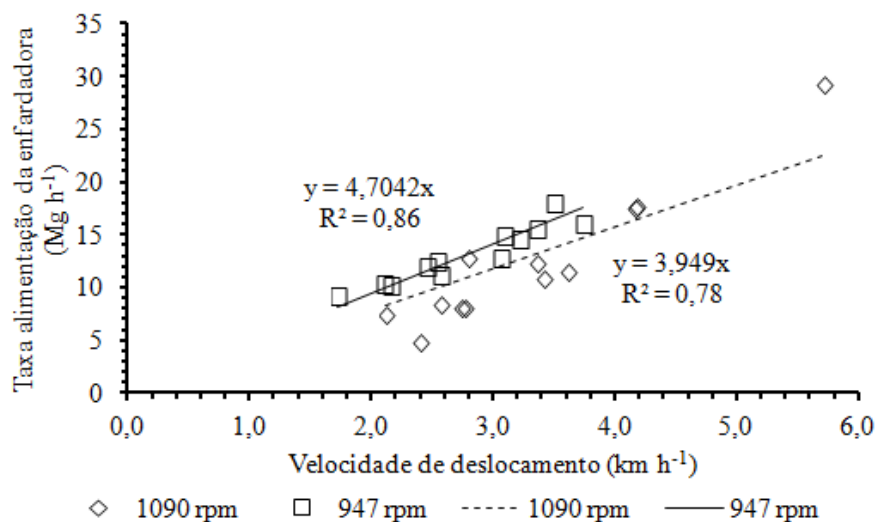


FIGURA 16. Taxa de alimentação da enfardadora em função da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora.

A potência requerida na TDP do trator para acionar a enfardadora em função da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora, para as duas

rotações adotadas para acionamento da máquina, está apresentada na Figura 17. Observa-se que a potência requerida na TDP do trator aumentou seus valores com o aumento da velocidade de deslocamento da máquina, independentemente da rotação usada para o acionamento da máquina.

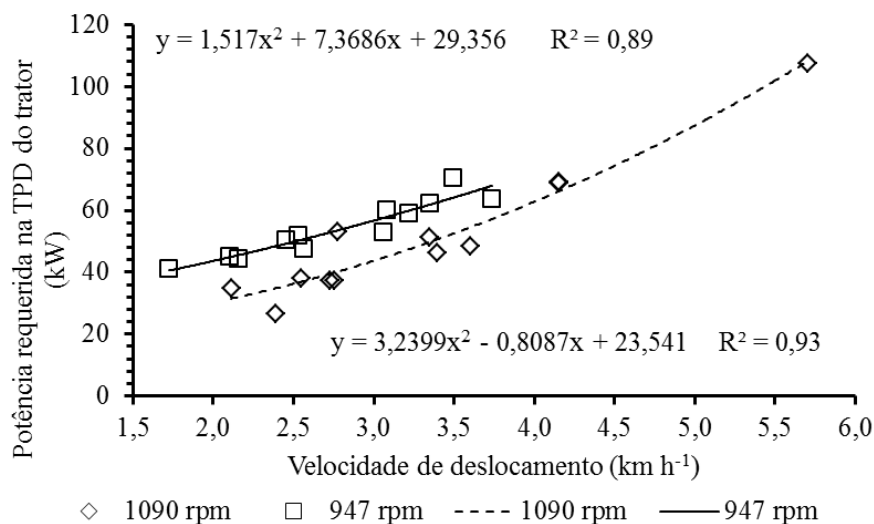


FIGURA 17. Potência requerida na TDP do trator para acionar a enfardadora em função da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora para as duas rotações de acionamento.

Analisando o efeito da rotação de acionamento da máquina, pôde ser verificado que houve maiores valores de potência requerida na TDP do trator para acionar a enfardadora na rotação de 947 rpm até a velocidade de deslocamento de 3,73 km h⁻¹. Entretanto, na rotação de 1.090 rpm, a partir da velocidade de deslocamento de 4,22 km h⁻¹ a potência requerida na TDP passou a se apresentar maior que a obtida com a rotação de 947 rpm. Embora não fosse de se esperar maior potência na TDP na menor rotação de acionamento, esse fato pode ser explicado pela taxa de alimentação ter sido maior na menor rotação, conforme Figura 15.

Na Figura 18 observa-se que a baixas velocidades a rotação de 1090 rpm representou uma potência requerida no motor menor que na rotação de 947 rpm, mas com o aumento da velocidade de deslocamento da máquina a potência requerida no motor também aumentou, apresentando comportamento semelhante ao verificado na potência da TDP (Figura 17).

A rotação de 947 rpm teve uma demanda de potência maior porque a máquina recolheu uma quantidade de palhço maior que na rotação de 1.090 rpm,

que teoricamente demandaria uma potência maior, obtendo o valor médio de $13,19 \text{ Mg h}^{-1}$ superior à rotação de 1090 rpm em 6,37%.

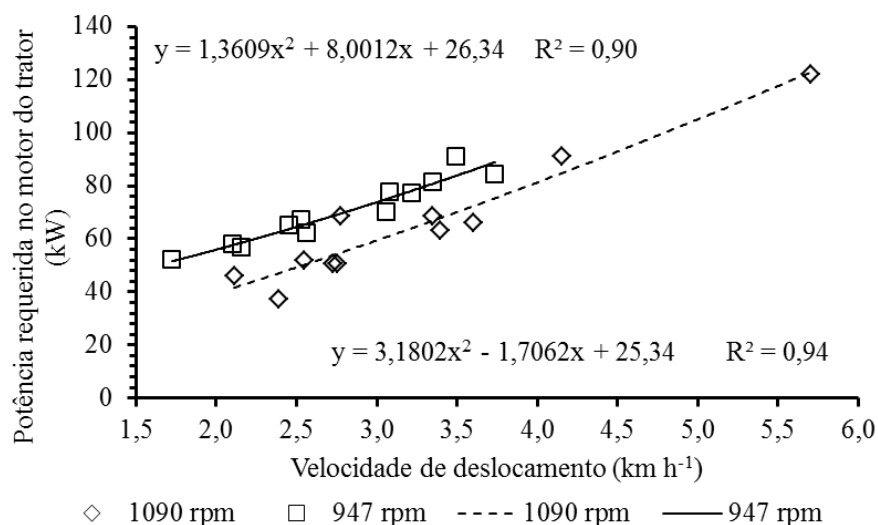


FIGURA 18. Potência requerida no motor do trator em função da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora.

Na Figura 19 está apresentada a potência requerida no motor do trator em função da taxa de alimentação da máquina. Pode-se observar que a potência aumentou linearmente com a taxa de alimentação da máquina.

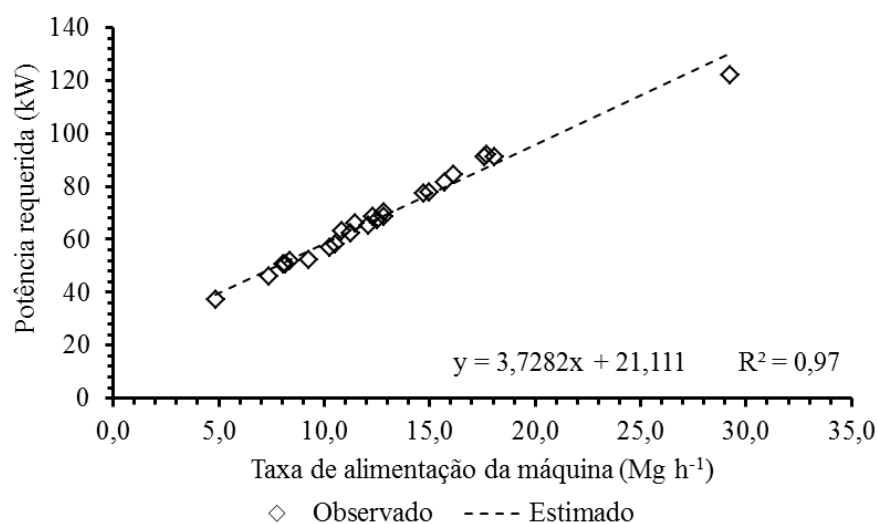


FIGURA 19. Potência requerida no motor do trator em função da taxa de alimentação da enfardadora.

Na Figura 20 pode ser observada uma pequena variação do consumo específico de energia para a rotação de 947 rpm, sendo que o maior valor encontrado foi de 4,96 kWh Mg⁻¹ e o menor foi de 4,44 kWh Mg⁻¹. O consumo específico de energia é menor na rotação de 947 rpm porque nessa rotação foi recolhida uma quantidade maior de palhico. Na rotação de 1.090 rpm, o consumo de energia diminui com o aumento da velocidade de deslocamento, pois a máquina começa a recolher uma quantidade de resíduo maior em relação a outra rotação.

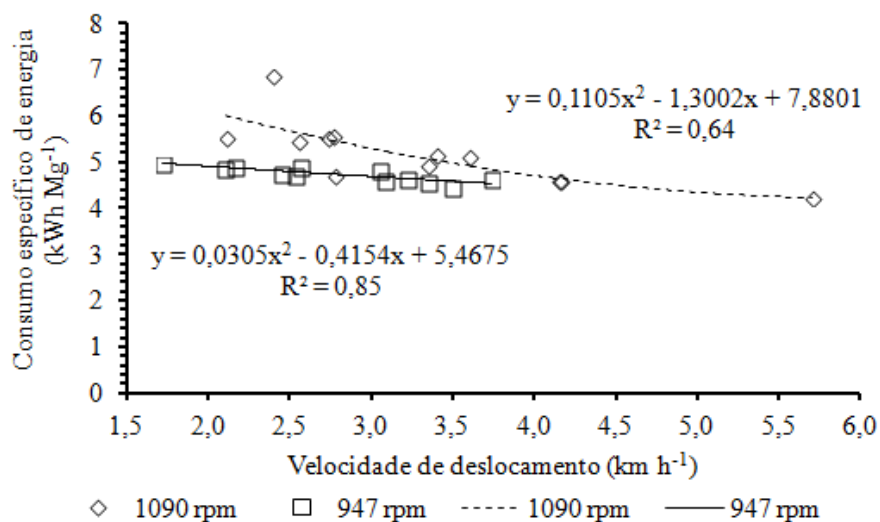


FIGURA 20. Consumo específico de energia em função da velocidade de deslocamento do conjunto trator-enfardadora para as duas rotações de acionamento da máquina.

5 CONCLUSÃO

Houve influência da velocidade de deslocamento e da rotação de acionamento sobre todas as variáveis estudadas, exceto para a densidade dos fardos que não foi influenciada pelos tratamentos.

A enfardadora proporciona maior desempenho operacional quando foi usada maior rotação e maiores velocidades de deslocamento do conjunto trator-enfardadora.

As potências de tração e acionamento da enfardadora aumentaram com o aumento da velocidade, independentemente da rotação adotada.

Os consumos de combustível e de energia do conjunto se apresentaram menores quando foi usada uma maior velocidade de deslocamento, e conseqüentemente da taxa de alimentação, enquanto a rotação de acionamento teve influência relativa.

O aumento da capacidade de enfardamento não ocorre de maneira isolada dos fatores rotação e velocidade, mas sim com o efeito conjunto.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇÚCAR ITAMARATY. A introdução da cana-de-açúcar no Brasil http://www.acucaritamarati.com.br/textos/brasil_acucar.htm Acesso em: 01/06/2015.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Agricultural Machinery Management Data. ASAE Standards, Engineering Practices, and Data. San Joseph, 2003. p. 377. (ASAE D497.4 FEB03).

BIZUTI, S.F.G. Enleiramento e enfardamento cilíndrico de palhço 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.

CALDEIRA, D.S.A. Palhço residual de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) colhida mecanicamente (sem queima prévia): manejo, fertilização, influência no perfilhamento e produtividade da cultura. Botucatu, 2002. 94 p. Tese (Doutorado) Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Cana-de-açúcar, safra 2014/2015, quarto levantamento, abril de 2015. Conab Acomp. da safra bras. de cana-de-açúcar, v. 1 – Safra 2014/15, n. 4 - Quarto Levantamento, Brasília, abr. 2015.

COPERSUCAR – 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, 1998.

FRANCO, F.N. Alguns parâmetros de desempenho operacional de um sistema de recolhimento de palhço de cana-de-açúcar (*saccharum spp*) a granel 2003. 113 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

GOMES, A.R.A.; SILVA, P.R.A.; DIAS, P.P. Avaliação do teor de impureza e massa específica de fardos prismáticos em três volumes de recolhimento do palhço de cana-de-açúcar. Revista Acta Iguazu, Cascavel, v.3, n.3, p.66-73, 2014.

GOMES, A.R.A. Desempenho operacional de duas enfardadoras de fardos prismáticos retangulares no palhço de cana-de-açúcar. Dissertação (Mestre em Agronomia), Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, UNESP, 2014, p.75.

HOWE, R.; SREESANGKON, P. Costs and performance of equipment for baling sugar cane tops and leaves. 56p. 1990. S. I. United States Agency of Internacional Development.

MAGALHÃES, P.S.G.; BRAUNBECK, O.A. Colheita de cana-de-açúcar verde: energia renovável para uma agricultura sustentável. Disponível em: <http://www1.agrobrasil.com.br/agroartigos/artigo9.html>. Acesso em: 04 nov 2001.

MELLO, A. M. Desempenho de uma enfardadora prismática no recolhimento de palhiço. Piracicaba, 2009. Dissertação (mestrado) Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz.

MICHELAZZO, M. B.; BRAUNBECK, O.A. Análise de seis sistemas de recolhimento do palhiço na colheita mecânica da cana-de-açúcar. Revista Agriambi, Campina Grande, v.12, n.5, p.546-552, 2008.

MICHELAZZO, M. B. Análise de sensibilidade de seis sistemas de recolhimento do palhiço da cana-de-açúcar. 2005. 86 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola/ Máquinas Agrícolas) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual Paulista, Campinas, 2005.

MOLINA JÚNIOR, W.F.; RIPOLI, T.C.; GERALDI, R.N.; AMARAL, J.R. Aspectos econômicos e operacionais do enfardamento de resíduos de colheita de cana-de-açúcar para aproveitamento energético. STAB - Açúcar Alcool e Subprodutos, Piracicaba, v.13, n.5, p.28-31, 1995.

NATALE NETO J. A saga do álcool. Osasco: Novo Século Editora. 347p. 2007.

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.

PALERMO, E.L. Parâmetros mecânicos no enfardamento do palhiço da cana-de-açúcar. 1998. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola/Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 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 palhiço de cana-de-açúcar no campo e na indústria. Revista Energia na Agricultura, Botucatu, v.27, n.1, p.89-108, 2012.

RIPOLI, M. L. C; RIPOLI, T. C. C; GAMERO, C. A. Colheita integral: retrocesso ou barateamento do sistema? IDEA NEWS, Piracicaba, v. 4, n. 28, p. 66-67, jan. 2003.

RIPOLI, T.C.C.; MOLINA JUNIOR, W.F.; NOGUEIRA, M.C.S.; MATOS, J.R. Equivalente energético da palhada da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 20., 1990, Piracicaba. Anais... Piracicaba: FEALQ, SBEA, 1990. p. 249-62.

RIPOLI, M.L.C. Ensaio de dois sistemas de obtenção de biomassa de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) para fins energéticos. 2004. 213 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

RIPOLI, M. L. C. Mapeamento do palhiço enfardado de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) e do seu potencial energético. 2002. 91 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2002.

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

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente. Piracicaba: Edição dos Autores, 2009. 333 p.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J.H. Bioenergia e Biorrefinaria - Cana-de- Açúcar e Espécies Florestais. Ed.1, Viçosa: UFV, 2013. 551p.

SARTORI, M.M.P. Otimização da produção de energia e biomassa do resíduo de colheita em variedades de cana-de-açúcar. Botucatu, 2001. Tese (Doutorado) Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

SOUZA, C.M.A.; QUEIROZ, D.M.; DIAS, G.P.; PINTO, F.A.C. Potência necessária para acionamento de uma colhedora de fluxo axial para feijão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.5, n.3, p.538-545, 2001.

SPADOTTO, A.F. Desenvolvimento de programa computacional aplicado ao empacotamento do palhiço de cana-de-açúcar. Dissertação (Mestre em Engenharia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, UNESP, 2008, p.62.

TORREZAN, H. F. Enleiramento e enfardamento prismático de palhiço de cana-de-açúcar: alguns parâmetros de desempenho operacional e eficiência energética. Piracicaba, 2003. Dissertação (mestrado) Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz.

UNICA. Bioeletricidade de cana no brasil completa 25 anos com três Belo Monte adormecidas nos canaviais. 23/05/2012. <http://www.unica.com.br/noticia/14531440920334804993/bioeletricidade-de-cana-no-brasil-completa-25-anos-com-tres-belo-monte-adormecidas-nos-canaviais/>. Acesso em: 01/06/2015.

UNICA. Bioeletricidade. Terceira fonte de energia mais importante do país, biomassa da cana atinge 10 mil MW. 25/05/2015. <http://www.unica.com.br/noticia/25950095920338941144/terceira-fonte-de-energia-mais-importante-do-pais-por-cento2C-biomassa-da-cana-atinge-10-mil-mw-/>. Acesso em: 01/06/2015.