



INFLUÊNCIA DE UM TRITURADOR FRONTAL DE BIOMASSA NO DESEMPENHO DE DUAS ENFARDADORAS DE PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Murilo Battistuzzi Martins¹, Jefferson Sandi², João Vitor Paulo Testa³, Aldir Carpes Marques⁴ & Kléber Pereira Lanças⁵

RESUMO: O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com notável potencial para a produção de energias renováveis. O palhiço de cana-de-açúcar é um subproduto da colheita mecanizada que possui excelente poder calorífico podendo ser aproveitado para diversas finalidades na indústria. O presente trabalho teve por objetivo realizar a avaliação de desempenho de duas enfardadoras no recolhimento do palhiço de cana, equipadas com e sem sistema de trituração frontal. As enfardadoras foram tracionadas por um trator agrícola com 191 kW de potência, modelo 4x2 equipado com tração dianteira auxiliar (TDA). Foram mensuradas as variáveis de consumo de combustível ($L h^{-1}$), velocidade operacional ($km h^{-1}$), rendimento operacional do conjunto mecanizado ($ha h^{-1}$), volume (m^3) e massa (kg) dos fardos produzidos. Sem o sistema de trituração frontal (ST) os fardos apresentaram maiores volumes, em função da maior granulometria do palhiço recolhido, porém o consumo volumétrico de combustível e velocidade operacional do conjunto foi inferior em relação ao sistema com trituração (CT). A utilização do pré triturador frontal possibilitou um incremento de 25% no rendimento operacional do conjunto motomecanizado, porém aumentou a demanda de combustível em 38%.

PALAVRAS-CHAVE: aproveitamento energético, colheita, enfardamento, máquinas, mecanização.

INFLUENCE OF A FRONTAL GRINDING SYSTEM IN THE PERFORMANCE OF BALERS

ABSTRACT: Brazil is the world's largest producer of sugarcane, with a notable potential for renewable energy production. Sugar cane straw is a by-product of mechanized harvest, which has excellent calorific value and can be used for various industry purposes. The aim of present work was evaluate the performance of two balers in the cane straw collection, equipped with and without frontal crushing system. The balers were driven by an agricultural tractor with 191 kW of power, model 4x2 equipped with auxiliary front traction (TDA). The variables fuel consumption (Lh^{-1}), operating speed ($km h^{-1}$), operating performance of the mechanized set ($ha h^{-1}$), volume (m^3) and mass (kg) of the bales produced were measured. Without the frontal grinding system (ST), the bundles presented larger volumes, due to the larger collected straw particle size, but the set fuel consumption and operational speed were lower than the grinding system (CT). The front crusher use allowed a 25% increase in powertrain operating performance, but increased fuel demand by 38%.

KEYWORDS: energy recovery, harvesting, baling, machines, mechanization.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura mundial produz anualmente cerca de 2 bilhões de toneladas de resíduos agrícolas de colheita, cerca de 7% desse total é aproveitado para a indústria de matéria prima urbana e 30% aproveitado para produzir energia no meio rural, no entanto 63% desse material não é aproveitado (Tang; Li; Cheng, 2017).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, e além da produção de etanol e açúcar as unidades produtivas têm investido na produção de energia elétrica. O maior aproveitamento dos resíduos da cultura, tem

contribuído para a redução dos custos de produção e aumentado a rentabilidade do negócio (CONAB, 2017).

Segundo Florentino *et al.* (2015), ocorre a nível global o interesse pela obtenção de combustíveis alternativos visando benefícios ambientais e econômicos, sendo que dentre os principais recursos de interesse está a Biomassa. No caso da cultura da cana-de-açúcar a biomassa é composta principalmente pelo bagaço resultante do processamento industrial e pelo palhiço residual da colheita mecanizada.

Carvalho; Veiga e Bizzo (2016) afirmaram que o palhiço de cana-de-açúcar é uma fonte de energia potencialmente importante no cenário agrícola brasileiro. Smithers

¹ ² ³ ⁴ ⁵ E-mails: mbm_martins@hotmail.com ; jffsandi@gmail.com ; joaovitortesta@outlook.com ; aldir.marques@gmail.com ; kplancas@fca.unesp.br

(2014) em estudo relacionado ao aproveitamento do palhicho de cana-de-açúcar na África do Sul, afirma que um terço da energia disponível na lavoura está localizada no topo da planta e no palhicho.

De acordo com Michelazzo e Braunbeck (2008), a operação de recolhimento do palhicho de cana pode ser realizada de diversas formas, sendo possível desde o aproveitamento de máquinas utilizadas para fenação, como enleiradoras e enfardadoras, seguidas de dispositivos de trituração e compactação. Liu; Grisso e Cundiff (2013) descrevem que o desafio da utilização das máquinas forrageiras para uso na biomassa é definir sistemas adequados e rentáveis.

Novas máquinas de enfardamento do palhicho, estão disponíveis à indústria canavieira e apresentam tecnologias modernas de recolhimento, formatação e compactação dos fardos. Tang; Li e Cheng (2017) desenvolveram uma colhedora de grãos multifuncional que realiza o enfardamento do palhicho concomitantemente à colheita, otimizando os recursos energéticos e reduzindo os custos operacionais.

Algumas máquinas de enfardamento são equipadas com dispositivo de trituração frontal, para fracionar a biomassa antes da formação dos fardos. Esse sistema é composto por mecanismos de corte instalados na parte frontal da enfardadora. Máquinas equipadas com facas de corte de palhicho produzem fardos mais densos reduzindo o custo de transporte e recolhimento.

Avaliar o desempenho de sistemas de recolhimento de biomassa e enfardamento é decisivo para a gestão de custos produtivos e viabilidade das operações. Objetivou-se com este trabalho realizar avaliação de desempenho de duas enfardadoras de biomassa equipadas com e sem sistema de trituração frontal, avaliando características dimensionais e ponderais dos fardos, consumo energético e capacidade operacional de enfardamento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na mesorregião de São José do Rio Preto no estado de São Paulo, o clima da região, segundo classificação de Koepen é Aw. O tipo de solo do local foi classificado de acordo com EMBRAPA (2013) como Latossolo vermelho-amarelo do tipo ácrico.

A área experimental de cultivo de cana de açúcar, continha a variedade comercial RB92579 plantada com espaçamento entre linhas de 1,5 m, e estava em seu segundo corte comercial. A colheita foi realizada de forma mecanizada e o palhicho remanescente foi deixado à campo durante cinco dias até que sua umidade média atingisse valores próximos à 30% em secagem natural.

Após o período de secagem à campo o palhicho foi amontoado em leiras com auxílio de equipamento ancinho enleirador, regulado especificamente para movimentação de seus órgãos ativos à 5 cm do solo,

possibilitando o recolhimento de aproximadamente 90% do palhicho remanescente na lavoura. A operação de enfardamento do palhicho foi realizada na mesma data de enleiramento do material.

O ensaio foi realizado com o emprego de um trator agrícola modelo 4x2 com Tração dianteira auxiliar (TDA) e 191 kW de potência. A Tomada de Potência do trator (TDP) foi utilizada para o acionamento dos mecanismos de duas enfardadoras prismáticas com características construtivas idênticas. Na enfardadora 1 foi acoplado um dispositivo de pré-trituração em sua parte frontal (CT) e na enfardadora 2 a entrada do palhicho ocorreu a partir dos rolos de recolhimento sem a pré trituração (ST).

O trator foi instrumentado com dispositivos para coleta e aquisição de dados relacionados ao consumo volumétrico de combustível, velocidade operacional do conjunto, tempo da operação de enfardamento e características pondero-dimensionais dos fardos.

Para aferição do consumo volumétrico de combustível ($L h^{-1}$) foram utilizados dois fluxômetros volumétricos do tipo M-III, da marca Oval Flowmate - LSF45 L, com razão de 0,01 litros por pulso de tensão gerado. O primeiro fluxômetro foi instalado na tubulação entre o filtro secundário de combustível e a bomba pressurizadora de óleo diesel, e o segundo na tubulação de retorno do óleo ao tanque.

O consumo volumétrico de combustível foi calculado pela diferença entre os valores dos pulsos gerados pelos fluxômetros na entrada do sistema e retorno ao tanque de armazenamento, de acordo com a Equação 1.

$$Ch = \left(\frac{\sum (pe - ps) \cdot 3,6}{\Delta t} \right) \cdot 10 \quad (1)$$

Em que:

Ch = consumo horário de combustível ($L h^{-1}$);

$\Sigma(pe - ps)$ = diferença entre os somatórios de pulsos dos fluxômetros de entrada e de retorno do motor, equivalendo ao volume de combustível gasto;

Δt = tempo gasto no percurso da parcela (s);

3,6 = fator de conversão;

A velocidade de trabalho foi definida à campo de acordo com a qualidade de recolhimento, e mantida no tratamento aquela em que o sistema de recolhimento das enfardadoras conseguisse recolher efetivamente acima de 95% do palhicho presente na leira. A rotação do motor do trator foi ajustada para fornecer 1000 rpm na tomada de potência com o objetivo de atender as especificações de funcionamento das enfardadoras. A velocidade operacional foi determinada através de um receptor GPS modelo Garmim MAP 60csx em faixas de deslocamento de 200 metros.

O rendimento operacional e o consumo de combustível por área foram determinados através das Equações 2 e 3.

$$\eta_{op} = \frac{A}{T_{prod}} \quad (2)$$

em que:

η_{op} - rendimento operacional (ha h⁻¹);

A - área total trabalhada (ha);

T_{prod} - tempo efetivo de trabalho (h).

$$CC = \frac{CCh}{A} \quad (3)$$

em que:

CC - consumo volumétrico de combustível por área (l ha⁻¹);

A - área total trabalhada (ha);

CCh - consumo horário de combustível (l h⁻¹).

As características dimensionais e ponderais dos fardos foram determinadas com uso de trena graduada e célula de carga modelo Alfa Z-5t, com capacidade para até 5000kg. Todas as medições dos fardos foram obtidas a campo logo após o momento de descarga pela enfardadora. O volume dos fardos foi determinado através da Equação 4.

$$Vf = Lf Af Cf \quad (4)$$

Em que:

Vf - volume do fardo (m³);

Lf - largura do fardo (m);

Af - altura do fardo (m);

Cf - comprimento do fardo (m).

O delineamento experimental utilizado foi o de distribuição em faixas, com parcelas formadas por linhas de recolhimento com 200 metros de comprimento e quatro repetições. Os resultados foram submetidos ao teste de normalidade e análise de variância, sendo que as médias finais de cada tratamento foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1 pode-se observar os valores de consumo de combustível, rendimento operacional e velocidade de deslocamento do conjunto trator enfardadora com e sem a utilização do triturador frontal.

Tabela 1 – Desempenho operacional e consumo de combustível da enfardadora com e sem uso do triturador frontal.

Tratamento	Velocidade de deslocamento (m s ⁻¹)	Consumo de combustível (l h ⁻¹)	Consumo de combustível por área (l ha ⁻¹)	Rendimento operacional (ha h ⁻¹)
Com triturador frontal	0,98 a	28,32 a	8,77 a	3,23 a
Sem triturador frontal	0,74 b	17,79 b	7,12 a	2,42 a
F	118,55*	332,64*	3,04 ^{NS}	1,97 ^{NS}
CV (%)	15,53	24,63	19,14	30,84

Médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si na coluna pelo teste Tukey (p≤0,05).

A utilização do triturador frontal na enfardadora CT possibilitou maior velocidade de deslocamento em relação ao sistema ST, possivelmente ocasionada pelo melhor ajuste da biomassa fracionada ao sistema de compactação dos fardos. O consumo volumétrico de combustível foi maior no sistema com trituração, apresentando 28,32 L h⁻¹ em relação ao tratamento sem o triturador frontal de 17,79 L h⁻¹. Os valores de consumo volumétrico de combustível foram afetados possivelmente pela maior requisição de potência do conjunto motomecanizado quando o sistema necessitava além de formar e compactar os fardos, triturá-los antes do recolhimento, assim como a velocidade de deslocamento.

Os valores de consumo divergiram dos obtidos por Gomes *et al.* (2017) de 21,53 (L h⁻¹), em avaliação do desempenho operacional e econômico de enfardadoras de palhiço da cana-de-açúcar utilizando diferentes volumes de enleiramento. O consumo volumétrico de combustível é um padrão pouco referencial para comparação de equipamentos em operações agrícolas, já

que ele aumenta de acordo com a requisição de trabalho útil da máquina e cresce exponencialmente em relação à requisição de potência do conjunto motomecanizado.

O consumo de combustível por área não apresentou diferença estatística, ratificando que a maior velocidade e aproveitamento do combustível se equiparam em relação aos tratamentos avaliados. Carvalho; Veiga e Bizzo (2016) encontraram resultados semelhantes de consumo para o enfardamento do palhiço, no entanto em avaliação da energia consumida nos sistemas de recolhimento, avaliaram que a melhor opção energética para o aproveitamento do palhiço foi obtida com a colheita integral da planta.

O rendimento operacional é uma referência importante para a avaliação das operações agrícolas com relação ao tempo de execução e à sua eficiência. A enfardadora ST resultou no menor valor de rendimento de 2,42 ha h⁻¹, em relação ao equipamento com trituração frontal 3,23 ha h⁻¹. Esse valor é semelhante ao encontrado por Lemos *et al.* (2014), em experimento utilizando uma

enfardadora prismática sem triturador frontal onde o rendimento operacional apresentado foi de 2,23 ha h⁻¹, entretanto Gomes *et al.* (2016) também em avaliação de desempenho operacional de duas enfardadoras prismáticas sem triturador frontal obtiveram rendimentos de 3,46 ha h⁻¹.

Os valores apresentados permitem inferir que o enfardamento com trituração frontal possibilitou um incremento de 25% no rendimento operacional do

conjunto, devido ao aumento de velocidade de recolhimento. Esse aumento da capacidade de trabalho resultará em operações mais econômicas quando o custo operacional de enfardamento superar o custo excedente em combustível, que foi 38% superior em relação ao enfardamento sem o sistema de trituração.

As características dimensionais, volume e massa dos fardos obtidos nos tratamentos com e sem utilização do triturador frontal, são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões, volume e massa dos fardos com e sem triturador frontal.

Tratamento	Altura (m)	Largura (m)	Comprimento (m)	Volume (m ³)	Massa fardos (kg)
Enfardadora (CT)	0,85 a	1,20 a	2,10 a	2,15 a	435,3 a
Enfardadora (ST)	0,82 a	1,21 a	2,18 b	2,18 a	423,5 a
F	4,76 ^{NS}	2,78 ^{NS}	8,76*	0,49 ^{NS}	0,64 ^{NS}
CV (%)	2,16	0,98	2,75	2,88	4,71

Médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si na coluna pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

A densidade dos fardos produzidos pela enfardadora CT apresentou valores ligeiramente superiores aos da enfardadora (ST), sendo apresentada uma densidade de 202,4 kg m⁻³ e 194,2 kg m⁻³ respectivamente.

A operação de adensamento pode ser relacionada também com os valores de comprimento dos fardos, sendo que esta dimensão é relacionada à ação de um pistão hidráulico de compactação da enfardadora. Tang; Li e Cheng (2017) desenvolveram um sistema de colheita integrada com enfardamento, e alcançaram densidades de 206 a 216 kg m⁻³ para a cultura do arroz (*Oryza sativa* L.). Essa operação apresentou um resultado interessante do ponto de vista econômico, já que representou pioneirismo na integração de atividades de colheita e enfardamento, algo que até o momento não ocorre na agricultura brasileira.

Verifica-se que o comprimento dos fardos foi menor no sistema ST, possibilitando inferir que o material recolhido sem prévio fracionamento oferece maior resistência ao sistema de compactação da máquina e pode apresentar maiores espaços sem preenchimento no interior do fardo. Carvalho; Veiga e Bizzo (2016) afirmaram que materiais com granulometria de 50 a 100mm dispensam a necessidade de rotores estacionários na indústria para processamento do palhiço, permitindo a queima simultânea dos fardos. Os autores afirmam que a queima do palhiço inteiro pode ocasionar problemas no controle da temperatura e funcionamento das caldeiras.

A altura e largura dos fardos não apresentaram diferença estatística, porém a diferença apresentada pelo comprimento dos fardos pode estar relacionada ao fato de que, quando não se utiliza o triturador frontal as partículas do palhiço recolhido são maiores, resultando em maior quantidade de espaços porosos no momento da compactação dos mesmos. Para os dois tratamentos o volume dos fardos resultou em valores próximos, entretanto apresentaram valores inferiores aos obtidos por Gomes *et al.* (2017), com valores entre 2,59 e 2,61 m³.

A enfardadora CT produziu fardos com massa estatisticamente igual à ST, os valores obtidos foram superiores aos encontrados por Lötjönen e Paappanen (2013), em trabalho com fardos prismáticos de gramíneas em diferentes enfardadoras, onde encontraram a massa de fardos entre 246,16 e 345,42 kg e de Martelli; Bentini e Monti (2015) no enfardamento prismático de *Panicum* spp. com 319 kg.

Fardos com volumes maiores e menores de massa, oneram a operação de carregamento pois necessitam de maior quantidade de viagens de recolhimento e transporte. Smith (2014) afirmou que o sistema de colheita mecanizada de cana, bem como o de recolhimento do palhiço devem ser justificados economicamente, porém alguns efeitos como melhoria das condições fitossanitárias da lavoura e do solo nem sempre são consideradas no cálculo final.

Tang; Li e Cheng (2017) afirmaram que a perda de biomassa nos sistemas de cultivo agrícolas representam uma fonte potencial de poluição ambiental e que a geração de alternativas para aproveitamento desse material são necessárias para minimizar o problema.

4 CONCLUSÃO

A enfardadora equipada com triturador frontal apresentou o maior consumo horário de combustível e velocidade operacional de trabalho, possibilitando que o enfardamento fosse realizado em menor tempo.

A operação de enfardamento com o uso do sistema de pré-trituração frontal possibilitou um incremento de 25% na capacidade de campo do conjunto trator-enfardadora, o que pode ser desejável em situações onde o período de recolhimento é pouco flexível, ou o fator tempo de recolhimento é preponderante.

5 REFERÊNCIAS

CARVALHO, D. J.; VEIGA, J. P. S.; BIZZO, W. A. Analysis of energy consumption in three systems for collecting sugarcane straw for use in power generation. **Energy**, Amsterdã, p. 178-187, 2016.

Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. V4. Safra 2017/2018, 2017, p.1 - 73.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. Ed., 2013. 353 p.

FLORENTINO, H. O.; PATO, M. V.; JONES, D. CANTANE, D. Production and management of sugarcane biomass – process optimization. In: JACOB-LOPES, E.; ZEPKA, L. Q. (Ed.). **Biomass Production and Uses**. London: Intech, 2015. Chap. 2, p. 10-28.

GOMES, A. R. A.; CORREIA, T. P. S.; DIAS, P. P. KATO, L. H.; SILVA, P. R. A. Desempenho operacional e econômico de duas enfardadoras prismáticas de palhicho de cana de açúcar. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 31, n. 3, p. 207-214, 2016.

GOMES, A. R. A.; CORREIA, T. P. S.; KATO, L. H.; EIRAS, D. L.; SILVA, P. R.A. Avaliação do desempenho operacional e econômico de enfardadoras de palhicho da cana-de-açúcar utilizando diferentes volumes de aleiramento. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 32, n. 4, p. 334-341, 2017.

LEMOS, S. V.; DENADAI, M. S.; GUERRA, S. P. S.; ESPERANCINI, M. S.T.; BUENO, O. C.; TAKITANE, I. C. Economic efficiency of two baling systems for sugarcane straw. **Industrial Crops and Products**, Oxford, v. 55, p. 97-101, 2014.

LIU, J.; GRISSO, R.; CUNDIFF, J. Harvest Systems and Analysis for Herbaceous Biomass. In: MATOVIC, M. D. **Biomass Now Cultivation and Utilization**. London: InTech, 2013. Chap. 6, p. 113-150.

LÖTJÖNEN, T.; PAAPPANEN, T. Bale density of reed canary grass spring harvest. **Biomass and Bioenergy**, Finland, v. 51, p. 53-59, 2013.

MARTELLI, R.; BENTINI, M.; MONTI, A. Harvest storage and handling of round and square bales of giant reed and switchgrass: An economic and technical evaluation, **Biomass and Bioenergy**, Finland, v. 83, p. 551-558, 2015.

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

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, v. 27, n. 1, p. 89-108, 2012.

SMITHERS, J. Review of sugarcane trash recovery systems for energy cogeneration in South Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Bloemfontein, v. 32, n. 915, p. 915-925, 2014.

TANG, Z.; LI, Y.; CHENG, C. Development of multi-functional combine harvester with grain harvesting and straw baling. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v. 15, n. 1, p. 164-196, 2017.