

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE COLHEDORA DE CANA-DE-AÇÚCAR ACIONADO POR MICROTRATOR**Ricardo Ferreira Garcia¹ & Jose Francisco Sá Vasconcelos Junior²1 - Engenheiro Agrícola, Professor da UENF/Campos dos Goytacazes-RJ, garcia@uenf.br2 - Engenheiro Agrônomo, Professor da FAETEC/Campos dos Goytacazes-RJ, juniorferrete@yahoo.com.br**Palavras-chave:**

Saccharum officinarum
colheita mecanizada
projeto de máquinas
trator de rabiças

RESUMO

Um protótipo de colhedora de cana-de-açúcar, acionado por um microtrator com a capacidade de cortar e tomba uma linha da cultura, foi desenvolvido e avaliado. O protótipo elaborado se desloca em direção à linha a ser colhida, sendo os caules de cana-de-açúcar conduzidos pelos divisores de linhas e pela estrutura do chassi, realizando o corte dos colmos com suas lâminas de corte montadas em um disco. Um sistema transportador é responsável pelo movimento lateral e tombamento dos colmos cortados. Em testes realizados, encontraram-se dificuldades, como problemas no mecanismo de transporte da máquina e irregularidades do terreno afetando o desempenho operacional. Os resultados demonstraram que algumas modificações deverão ser realizadas no protótipo visando melhorias no seu sistema de funcionamento, principalmente na operação de tombamento lateral, onde parte dos colmos cortados não tombou completamente. O sistema de corte atingiu ótimo desempenho, apresentando corte de soqueiras sem nenhum tipo de dano. A máquina apresentou maior capacidade operacional quando comparado ao sistema tradicional de colheita manual.

Keywords:

Saccharum officinarum
machine design
mechanical harvesting
walk-behind tractor

DEVELOPMENT OF A LOW-COST SUGARCANE HARVESTER PROTOTYPE OPERATED BY A WALK-BEHIND TRACTOR**ABSTRACT**

The aim of this research was to develop and evaluate a prototype of sugarcane harvester operated by a walk-behind tractor with the ability to cut and drop the stalks to the ground. The prototype developed could move toward the line to be harvested, and the sugarcane stalks were conducted by the crop divider and the chassis, hence being cut by the cutting blades built on a disc of the prototype. A conveyor system was responsible for lateral movement and overturning of the cut stalks. Some machine transport problems and land irregularities, which affected operational performance, occurred during field tests. Results demonstrated that certain modifications should be carried out on the prototype to improve the operating system, especially during the lateral and overturning operations, since parts of the cut stalks were not overturned completely. The cutting system, on the other hand, achieved great performance, featuring cut stump without any damage. In addition, when compared to manual cutting, the prototype presented a faster cut.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana e também o primeiro do mundo na produção de açúcar e etanol (MAPA, 2016). Na safra de 2015/2016 o Brasil produziu 658,7 milhões de toneladas em uma área de aproximadamente 8.996 mil hectares CONAB, 2016).

No processo da colheita da cana-de-açúcar, há necessidade de corte, carregamento e transporte do produto, daí a importância das colhedoras, que são máquinas destinadas a cortar, picar e carregar os transbordos que realizarão o transporte. Segundo Garcia (1998), grande parte das máquinas colhedoras em uso no Brasil foram desenvolvidas por tentativas e erros, sem passar por um processo de otimização de seu projeto, porém vários fatores devem ser considerados neste.

A demanda de energia requerida para o corte da cana é um dos fatores que deve ser avaliada, visando um melhor projeto do sistema de corte, como o trabalho de Taghinezhad et al (2012), onde observaram que a energia específica de corte foi de 4,368, 6,978 e 10,021 kN m⁻¹ para entrenós de caules com orientação de 0°, 45° e 90°, e 6,458 e 15,812 kN m⁻¹ para nós de caules com orientação de 0° e 90°, respectivamente.

Shelke et al. (2015) projetaram uma pequena colhedora acionada por um motor à gasolina de 4,6 kW para colheita de cana-de-açúcar visando reduzir a mão-de-obra e custo operacional. No projeto, a força requerida para corte dos caules considerada variou de 29,14 a 106,75 kN.

Desta forma, pesquisadores trabalham no desenvolvimento de protótipos considerando fatores importantes em seu projeto, entre eles o dimensionamento dos sistemas de corte e transmissão de potência. Na Índia, Siddaling & Ravaikiran (2015) desenvolveram um microtrator de colheita de cana-de-açúcar para reduzir o esforço de produtores e para aumentar a produção agrícola. De acordo com os autores, a máquina, acionada por um motor de 5,74 kW, foi útil tanto para pequenos ou grandes produtores e apresentou a capacidade de 0,83 kg s⁻¹ (3 t h⁻¹). Quando comparada à colheita manual, se reduziu 50% do tempo de colheita, 70% da mão-de-obra e 18% do custo de produção.

Com o objetivo de reduzir o tempo e mão-de-obra para corte de cana-de-açúcar para pequenos produtores na Índia, Suryawanshi et al. (2013) desenvolveram um microtrator de 5,97 kW. Na avaliação da máquina, o consumo de combustível, capacidade de campo e processamento de material foram de 4,26.10⁻⁷ m³ s⁻¹, 0,18 m² s⁻¹ e 2,74 kg s⁻¹ (1,533 L h⁻¹, 0,065 ha h⁻¹ e 9,872 t h⁻¹) respectivamente, na velocidade de 0,28 a 0,39 m s⁻¹ (1,0 a 1,4 km h⁻¹), e foi observada uma redução de 66% na mão-de-obra.

Gupta et al. (1996) criaram uma pequena colhedora acionada por microtrator com motor de 6 kW. A máquina apresentou redução da mão-de-obra requerida para corte e tombamento de caules de cana e foi observada uma capacidade operacional de 0,36 m² s⁻¹ (0,13 ha h⁻¹) com uma eficiência de campo de 71%.

Bahalayodhin et al. (1991) avaliaram uma máquina colhedora de cana-de-açúcar acionada por microtrator em quatro variedades de cana com 10 meses de idade. Os resultados apresentaram uma capacidade operacional de 0,58 m² s⁻¹ (0,21 ha h⁻¹) e uma média de 4,03 kg s⁻¹ (14,5 t h⁻¹) a uma velocidade de 0,42 m s⁻¹ (1,51 km h⁻¹), e se mostrou ser uma realidade para reduzir a mão-de-obra na colheita de cana na Tailândia.

Forcellini (1989) desenvolveu uma máquina colhedora de forragens de pequeno porte. De acordo com os resultados de testes, observou-se que apesar da máquina ter atingido um grau de desenvolvimento bastante satisfatório, o mecanismo de alimentação deveria ser reprojetoado para melhorar seu desempenho, além da revisão de alguns setores da máquina.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e avaliar um protótipo de colhedora de cana-de-açúcar, acionada por microtrator, visando a disponibilidade de uma máquina para pequenos e médios produtores.

MATERIAL E MÉTODOS

O projeto foi desenvolvido, construído e avaliado no Laboratório de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro e na oficina mecânica da Usina São José,

administrada pela Cooperativa Agroindustrial do Estado do Rio de Janeiro.

Para a realização do desenho e projeto do protótipo de colhedora de cana-de-açúcar em formato eletrônico, utilizou-se o programa computacional AutoCAD® para criar o desenho com as vistas superior, lateral e frontal.

Após a realização do desenho do protótipo, projetaram-se os pontos de acoplamento aos chassis e polia do motor do microtrator modelo Yanmar TC14S, com 10,3 kW de potência à 40 Hz (2.400 rpm) no motor, que foi utilizado no projeto.

O protótipo desenvolvido se desloca em direção à linha a ser colhida, sendo os caules de cana-de-açúcar conduzidos pelos divisores de linhas, ou ponteiras guias, e pela estrutura do chassi, realizando o corte dos colmos de cana-de-açúcar com suas lâminas de corte montadas em um disco de corte em sua base. Um par de rodas de sustentação posicionado na parte frontal da máquina previne que as lâminas de corte toquem o solo e controla a altura de corte. A distância entre os divisores de linha, as rodas de suporte e a bitola do microtrator acionador podem ser reguladas de acordo com a distância entre as linhas de cultivo.

Para a construção da estrutura do protótipo, utilizaram-se barras chatas, cantoneiras e tubos quadrados de aço SAE 1020 unidas por solda de eletrodo revestido.

O sistema de transmissão da máquina foi projetado em dois setores, sendo o sistema de corte da base dos colmos, e o de transporte lateral dos colmos cortados. Foram utilizados dois mecanismos de transmissão diferencial em 90° com relação 1:1, fornecidos pela Yanmar, que são utilizados em outros sistemas de máquinas da empresa. Estas transmissões possuem mecanismo de embreagem e seus manetes de acionamento foram posicionados juntos à alavanca de controle do microtrator.

O sistema de corte da base dos colmos é composto por um disco de 25 cm de diâmetro, fixado no eixo de saída da transmissão deste setor, com três facas de corte dispostas tangencialmente com ângulo de 35° em relação ao eixo perpendicular de corte, proporcionando o corte dos colmos por deslizamento. As facas de corte

possuem comprimento total de 20 cm, sendo 12 cm o comprimento útil de corte e trabalham com velocidade periférica de 42 m s⁻¹.

Para a simulação das forças atuantes no sistema de corte, um modelo matemático de disco de corte e lâminas foi desenvolvido utilizando o programa computacional de elementos finitos ANSYS, de acordo com Garcia e Vasconcelos Junior (2015).

Utilizou-se a análise dinâmica transiente para determinar a resposta dinâmica de uma estrutura sob a ação de cargas variáveis com o tempo. Esse tipo de análise pode ser utilizado para determinar a variação da posição, das forças e das tensões a que a estrutura é submetida com o tempo, como resposta a qualquer combinação de cargas estáticas, transientes e harmônicas, uma vez que a faca de corte, ao realizar o corte do material, ultrapassa este com um ângulo de 35°, havendo variação da posição de aplicação da força ao longo da faca, com o tempo.

O sistema de transporte lateral dos colmos cortados é composto por duas correntes transportadoras acionadas pela outra transmissão. As correntes possuem dentes distanciados em 40 cm para facilitar o transporte do material e trabalham com velocidade periférica de 0,67 m s⁻¹.

Duas rodas com pneus de borracha, responsáveis pela sustentação frontal da máquina e com rotação de 360°, e regulagem da altura do corte foram posicionadas na parte frontal externa de cada lado da máquina.

Depois de construído, o protótipo da colhedora foi testado em canaviais no município de Campos dos Goytacazes, RJ – duas áreas com produtividade média de 3,5 kg m⁻² (35 t ha⁻¹), sendo uma no terceiro corte e outra no quinto corte, com espaçamento de 1,2 m.

Avaliou-se o desempenho da máquina, considerando a qualidade do corte, o tombamento, a capacidade operacional e as condições gerais de operação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O projeto do protótipo da colhedora de cana-de-açúcar construído apresenta-se em vistas superior e frontal, conforme as Figuras 1 e 2.

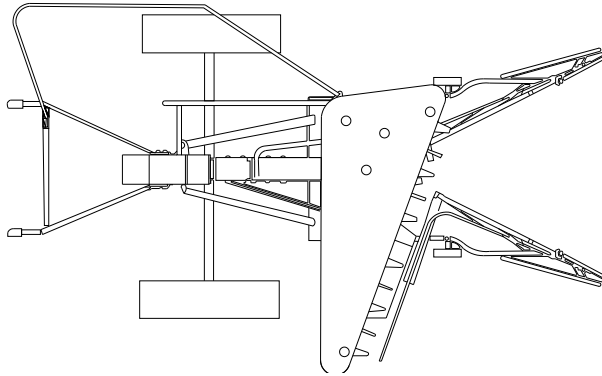


Figura 1. Vista superior do projeto da colhedora.

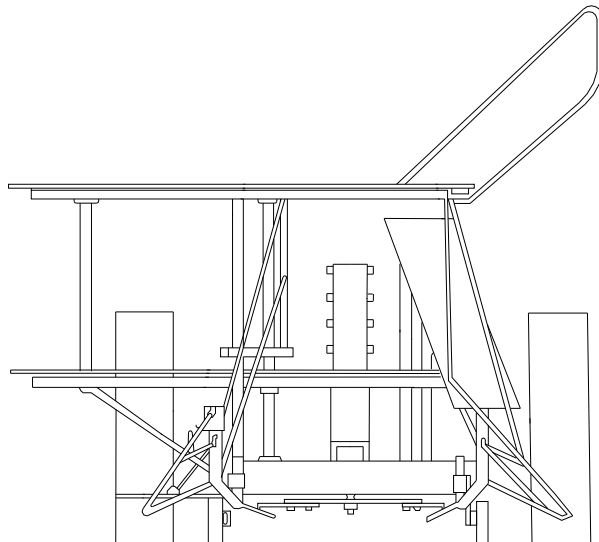


Figura 2. Vista frontal do projeto da colhedora.

As imagens da colhedora de cana-de-açúcar construída apresentam-se em vistas frontal, laterais e posterior, conforme as Figuras 3, 4, 5 e 6.



Figura 3. Vista frontal da colhedora.



Figura 4. Vista lateral direita da colhedora.



Figura 5. Vista lateral esquerda da colhedora.



Figura 6. Vista posterior da colhedora.

O resultado da avaliação do projeto do sistema de corte da colhedora determinou tensão máxima equivalente (von Mises) na faca de corte de 138,6 MPa, localizada na extremidade de corte da faca,

no ponto de início do corte. Este valor determinado está abaixo da tensão de ruptura do aço SAE 1020, sendo considerado, na simulação, o valor de 250 MPa para a tensão de cisalhamento e 450 MPa para as tensões de tração e compressão.

Na avaliação de uma colhedora de forragem, Garcia et al. (1998) observaram tensão equivalente máxima encontrada na faca de 144,6 MPa, próxima a observada neste trabalho. Taghinezhad et al. (2012) observaram tensões de ruptura para colmos de cana com diâmetros pequeno, médio e largo de 1,33; 1,21 e 0,98 MPa, sendo estes valores muito inferiores à tensão máxima equivalente observada para a faca.

O primeiro teste do protótipo foi realizado em um canavial queimado em terreno com topografia favorável, sem lombo e espaçamento correto entre as linhas da cultura.

Em teste preliminar, foi verificado que as lâminas do sistema de corte da base dos colmos encontravam-se posicionado à frente do sistema de transporte lateral dos colmos. Desta forma, o material foi cortado antes de entrar em contato com o sistema de transporte, ocasionando o tombamento do material para frente e não no transporte lateral como previsto no projeto (Figura 7), problema também observado por Forcellini (1989) e Bahalayodhin et al. (1991).



Figura 7. Tombamento dos colmos para frente e não no mecanismo de transporte lateral.

Outro problema observado no teste preliminar foi com o sistema de rodagem, que se apresentava com o ângulo de giro pequeno, o que proporcionava manobras ineficientes do protótipo em situação de campo, ao acompanhar as linhas de cultivo e

realizar manobras de fim de linha. A falta de lastro na parte traseira da máquina também foi outro fator observado que conferia uma grande dificuldade na condução da máquina no campo devido à má distribuição de peso. Forcellini (1989), em seu teste inicial, também relata um grande problema do sistema de rodagem, tendo uma capacidade de manobra ineficiente, porém devido ao engate do microtrator à carreta.

Em relação ao corte basal dos colmos de cana-de-açúcar, foi verificado um bom desempenho do sistema de corte (Figura 8), deixando a soqueira sem danos, de acordo com a metodologia adaptada de Kroes (1997), ou seja, sem defeitos de corte como danos periféricos, rachaduras, fragmentações ou arranquio de soqueiras (Figura 9), permitindo uma rebrota adequada.



Figura 8. Condições das soqueiras cortadas pelo protótipo de colhedora de cana-de-açúcar.

CLASSIFICAÇÃO DOS DANOS	GRAU	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
SEM DANOS	1		
DANOS PERIFÉRICOS	2		
RACHADURA	3		
FRAGMENTADO	4		

Figura 9. Metodologia utilizada para classificação dos danos às soqueiras adaptada de Kroes (1997).

Após realizar as devidas modificações mecânicas, sendo estas o reposicionamento do sistema de corte da máquina em aproximadamente 17 cm em relação ao sistema de transporte, redimensionamento da estrutura de suporte das rodas de apoio, proporcionando, às mesmas, capacidade de giro de 360° e colocação de lastros na parte traseira da máquina, o protótipo foi avaliado novamente.

A avaliação foi realizada em outro canavial queimado, com produtividade aproximada de 3,5 kg m⁻² (35 t ha⁻¹), apresentando uma irregularidade elevada, com elevado quebra lombo e espaçamento entre as linhas da cultura irregulares, uma irregularidade também encontrada por Solano (2011). Essas irregularidades do terreno induziram à interferência das lâminas com o solo, sendo necessário o ajuste da altura das rodas de apoio para prosseguimento da avaliação. Com uma velocidade de avanço aproximada de 0,35 m s⁻¹ (1,27 km h⁻¹), obteve-se em média uma capacidade de campo teórica de 0,42 m² s⁻¹ (0,15 ha h⁻¹) e uma capacidade operacional de colheita de 1,48 kg s⁻¹ (5,33 t h⁻¹).

Em microtratores de menor potência, Siddaling & Ravaikiran (2015) obtiveram capacidade operacional de 0,83 kg s⁻¹ (3 t h⁻¹) para uma máquina acionada por um motor de 5,74 kW, Gupta et al. (1996) determinaram capacidade de campo de 0,36 m² s⁻¹ (0,13 ha h⁻¹) utilizando um motor de 6 kW. Suryawanshi et al. (2013), utilizando um microtrator com 5,97 kW, obtiveram 2,74 kg s⁻¹ (9,87 t h⁻¹). Já Bahalayodhin et al. (1991), avaliando uma máquina colhedora acionada por um microtrator à diesel com potência de 5,9 kW, determinaram uma capacidade operacional de 4,03 kg s⁻¹ (14,5 t h⁻¹).

Segundo Garcia & Silva (2010), a capacidade operacional do corte manual da cana-de-açúcar queimada da Usina Santa Cruz, em Campos dos Goytacazes, é de 0,21 kg s⁻¹ (0,75 t h⁻¹) por pessoa. Nesta situação, o protótipo de colheita de cana-de-açúcar desenvolvido permite, aproximadamente, a substituição de sete homens por hora. Considerando o corte da de cana-de-açúcar sem queima prévia em Campos dos Goytacazes, RJ, de acordo com dados obtidos na EMATER, RJ, a capacidade operacional é de 0,12 kg s⁻¹ (0,44 t h⁻¹) por pessoa (GARCIA &

SILVA, 2010), ou seja, nesta situação o protótipo viria substituir aproximadamente 12 homens por hora.

CONCLUSÕES

- A máquina colhedora desenvolvida pode substituir aproximadamente sete homens por hora, levando-se em consideração a cana queimada, e 12 homens por hora, considerando-se a cana crua.
- Os resultados deste trabalho, de simular e desenvolver um protótipo de uma colhedora, apresentam uma máquina que mesmo não estando em forma final, atingiu um grau de desenvolvimento muito satisfatório, cumprindo com o objetivo para o qual foi construído.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAHALAYODHIN, B.; KANAMITSU, M.; GOTO, Y. Performance of a self-propelled walking type whole stalk green sugarcane harvester. *Natural Science*, v.25, p.157-161, 1991.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Culturas – cana-de-açúcar. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em: 15 de abril de 2016.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Indicadores da Agropecuária. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_04_15_17_11_05_revista_marco_2016_versao_final_para_internet.pdf>. Acesso em: 15 de abril de 2016.

FORCELLINI, F.A. **Desenvolvimento do protótipo de colhedora de forragens acoplável a tratores de rabiças**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.

GARCIA, R.F. **Otimização de componentes de uma colhedora de forragens**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

GARCIA, R.F.; QUEIROZ, D.M.; DIAS, G.P. Análise de tensões na face de corte de uma colhedora de forragem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, p.219-223, 1998.

GARCIA, R.F.; SILVA, L.S. Avaliação do corte manual e mecanizado de cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes, RJ. **Engenharia na Agricultura**, v.18, n.3, p.234-240, 2010.

GARCIA, R.F., VASCONCELOS JUNIOR, J.F.S. Análise de tensões no mecanismo de corte de um protótipo de colhedora de cana-de-açúcar. **Engenharia na Agricultura**, v.13, n.5, p.428-434, 2015.

GUPTA, C.P.; LWIN, L.; KIATIWAT, T. Development of a self-propelled single-axle sugarcane harvester. **Applied Engineering in Agriculture**. v.12, n.4, p.427-434, 1996.

KROES, S. **The cutting of sugarcane**. Tese PhD (Doctor of Applied Science) – University of Southern Queensland, Toowoomba. 1997.

SHELKE, G.D.; BORIKAR, S.S.; AWATHALE, M.P.; KHANTE, A.P.; ZODE, P.M. Design of

Sugarcane Harvesting Machine. **International Journal for Innovative Research in Science & Technology**. v.1, n.11, p.122-127, 2015.

SIDDALING, S.; RAVAIKIRAN, B.S. Design and fabrication of small scale sugarcane harvesting machine. **International Journal of Engineering Research and General Science**. v.3, n.4, p. 293-298, 2015.

SOLANO C.S. **Avaliação técnica e econômica dos sistemas de colheita da cana-de-açúcar no município de Campos dos Goytacazes**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.

SURYAWANSHI, V.; THAKUR, S.S.; SHARMA, S. Performance evaluation of self-propelled sugarcane harvester. **Journal of Sugarcane Research**. v.3, n.1, p.35-40, 2013.

TAGHINEZHAD, J.; ALIMARDANI, R.; JAFARI, A. Effect of Sugarcane Stalks' Cutting Orientation on Required Energy for Biomass Products. **International Journal of Natural and Engineering Sciences**. v.6, n.3, p.47-53, 2012.