

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE BAIXO CUSTO DE
COLHEDORA DE CANA-DE-AÇÚCAR

José Francisco Sá Vasconcelos Junior

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

FEVEREIRO – 2014

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE BAIXO CUSTO DE COLHEDORA DE CANA-DE-AÇÚCAR

JOSÉ FRANCISCO SÁ VASCONCELOS JUNIOR

Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal, com ênfase em Mecanização Agrícola.

Orientador: Prof. Ricardo Ferreira Garcia

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

FEVEREIRO – 2014

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE BAIXO CUSTO DE COLHEDORA DE CANA-DE-AÇÚCAR

JOSÉ FRANCISCO SÁ VASCONCELOS JUNIOR

Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal, com ênfase em Mecanização Agrícola.

Aprovada em 27 de fevereiro de 2014.

Comissão Examinadora:

Dr. Herval Martinho Ferreira Paes - UENF

Dr. Pablo Pereira Correa Klaver - FAETEC

Prof. Sílvio de Jesus Freitas - UENF

Prof. Ricardo Ferreira Garcia - UENF
Orientador

Aos meus pais, José Francisco Sá Vasconcelos e Luiza Helena Martins Vasconcelos, pelo grande apoio em todas as etapas da minha vida, principalmente nessa caminhada de elaboração até a conclusão da dissertação de mestrado em Produção Vegetal;

Aos meus avós, Odilam Nogueira Martins, Hilda Gomes Martins, Francisco da Silva Vasconcelos e Maria Milta Sá Vasconcelos (*in memoriam*).

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, ao Papai do Céu, pela paciência com meus erros e por sempre guiar-me nas minhas “aventuras”;

Aos meus pais, José Francisco (Ferrete) e Luiza Helena, por me aturarem e me darem todo apoio e suporte. Obrigado!

Ao meu orientador, Prof. Ricardo Ferreira Garcia, pela orientação, pela confiança, pela amizade e o fundamental, pelo ensino na otimização do tempo;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa;

Ao meu amigo Wanderson Rabello, pelos conselhos e pela ajuda na conclusão desse trabalho;

À minha namorada Luisa Gomes, pelo apoio e pela compreensão nas horas difíceis da pesquisa científica.

SUMÁRIO

RESUMO	VIII
ABSTRACT	X
1. Introdução	1
2. Revisão de Literatura	5
2.1 A cultura da cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes	5
2.2 Mecanização Agrícola	8
2.2.1 Aspectos ambientais e sociais	8
2.2.2 Aspectos técnicos	10
2.2.3 Desenvolvimento e avaliação de máquinas	12
3. Material e métodos.....	16
3.1 Análise de tensões do sistema de corte do protótipo da colhedora de cana-de-açúcar	16
3.2 Projeto e construção do protótipo de colhedora de cana-de-açúcar	22
3.3 Avaliação do protótipo de colhedora de cana-de-açúcar	23
4. Resultados e discussão	25
4.1 Análise de tensões do sistema de corte do protótipo da colhedora de cana-de-açúcar	25
4.2 Projeto e construção do protótipo de colhedora de cana-de-açúcar	27
4.3 Avaliação do protótipo de colhedora de cana-de-açúcar	34
5. Resumo e conclusões	40

6. Recomendações	42
6.1 Resultados esperados com a realização das modificações	42
7. Referências Bibliográficas.....	44

RESUMO

VASCONCELOS JUNIOR, José Francisco Sá; D. Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Fevereiro de 2014. Desenvolvimento de um protótipo de baixo custo de colhedora de cana-de-açúcar. Professor Orientador: Ricardo Ferreira Garcia.

O processo de modernização da lavoura canavieira, no preparo do solo e no plantio, ocorre desde a década de 60, entretanto, não se verificou nessa época a mesma intensidade da mecanização na colheita do produto. Com os problemas ambientais, como queimadas, e a necessidade de aumentar o rendimento de operações agrícolas, se torna inevitável a mecanização na colheita da cana-de-açúcar. Desta forma, se objetivou nesse trabalho a montagem do protótipo de uma colhedora de cana-de-açúcar de baixo custo, com a capacidade de cortar e tombar uma linha da cultura. O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro e na Usina São José, administrada pela Coagro. 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. Em testes realizados, encontraram-se dificuldades, como irregularidades do terreno e problemas estruturais da máquina. Observou-se que algumas modificações no projeto inicial

deverão ser realizadas visando melhorias no sistema de funcionamento da máquina, principalmente na fase de tombamento lateral da cana-de-açúcar cortada, uma vez que o sistema de corte de sua base atingiu ótimo desempenho. Assim, este trabalho atingiu o objetivo de desenvolver uma primeira versão de um protótipo de uma colhedora de cana-de-açúcar de baixo custo, com a capacidade de cortar e tombar uma linha da cultura, com um nível muito satisfatório de funcionamento.

Palavras-Chave: Mecanização agrícola, projeto de máquinas, colheita mecanizada, *Saccharum officinarum*.

ABSTRACT

VASCONCELOS JUNIOR, José Francisco Sá, D. Sc; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. February, 2014. Development of a low cost sugar cane low cost harvester prototype. Advisor: Ricardo Ferreira Garcia.

The modernization process of sugar cane farming, soil tillage and planting occurs since the 60s, however, there was at that time the same degree of mechanization in harvesting the product. Environmental problems, such as fires, and the need to increase the yield of agricultural operations, becomes inevitable mechanization in harvesting of cane sugar. Thus, the objective in this work assembling the prototype of a sugar cane harvester - of - sugar low cost, with the ability to cut and topple a line of culture. This work was developed in the Laboratory of Agricultural Engineering of the Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro and Plant Coagro. The prototype moves toward the line to be harvested, with the stalks of cane sugar carried by line splitters, guides or tips, and the chassis frame, performing cutting the stalks of cane sugar cutting blades mounted on the blade at its base. In our testing, we found difficulties such as uneven ground, structural machine problems and difficulties in logistics availability of collection areas and transportation. It was observed that some modifications to the initial design should be performed in order to improve the operating machine system, especially in the phase of lateral tipping of sugar cane

cut, since the cutting system has reached its optimum performance basis. Thus, this study, which was designed to simulate and develop a prototype harvester achieved a very satisfactory stage of development despite the prototype may not be ideal in final form.

Keywords: Agricultural mechanization, machine design, mechanical harvesting, *Saccharum officinarum*.

1. INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar é de grande importância para a economia brasileira, uma vez que o Brasil, além de ser o maior produtor mundial, se destaca na produção de açúcar e etanol (MAPA, 2012).

Considerado um dos maiores produtores de cana-de-açúcar, o Brasil, estimou uma produção de 652,02 milhões de toneladas na safra de 2013/2014, podendo atingir um aumento de 10,70% em relação à safra 2012/13, que foi de 588,92 milhões de toneladas, ou seja, foram moídas 64,89 milhões de toneladas a mais que na safra anterior. A produção atual foi alcançada em uma área estimada em 8.799.150 mil hectares, distribuídas entre todos estados produtores, representando um crescimento de 3,70%, ou 314.150 hectares em relação à safra passada (CONAB, 2013). O aumento da área com renovação diminui a infestação por ervas daninhas, reduz a idade média do canavial e conseqüentemente, melhora a produtividade, sendo a produtividade média brasileira estimada em mais de 74 mil kg/ha, sendo maior que a safra 2012/13, que foi de 69,4 mil kg/ha.

O aumento da área pode ser explicado a partir do crescimento natural das áreas das usinas recentemente instaladas, das áreas de renovação e do aumento de moagem em determinadas unidades produtivas. O comportamento da expansão da área de cana-de-açúcar tem suas particularidades em cada região do país, mas a projeção é que haja uma menor área de expansão em relação à safra passada. Segundo CONAB (2013), apenas para o estado do Amazonas não há projeção de plantio de novas áreas. A área de renovação dos canaviais no Brasil, prevista para a safra 2013/14 deverá alcançar 969 mil hectares.

Do total da produção de cana-de-açúcar, 52,12% (339.802,4 mil toneladas) foram destinadas à produção de etanol, gerando um volume total de 27.172,48 milhões de litros. No que se refere ao etanol anidro, a produção foi de 12.015,57 milhões de litros, e em relação ao etanol hidratado, a produção foi de 15.156,91 milhões de litros, representando um aumento de 21,96% e 9,93%, respectivamente em relação à safra 2012/2013. Os 47,88% restantes do total produzido foram destinados à produção de açúcar, o que gerou 312.213,5 mil toneladas do produto, produção 6,88% superior à da safra anterior (CONAB, 2013).

A colheita da cana-de-açúcar processou-se historicamente de forma totalmente manual desde o corte da base até o carregamento e com a queima prévia do canavial. Um primeiro passo no sentido da mecanização foi a introdução do carregamento mecânico dos colmos inteiros. Na década de 50 surgiu, na Austrália, o princípio mecânico de colheita atualmente utilizado no Brasil, o qual combina a operação de colheita com a de carregamento (Magalhães e Braunbeck, 2007).

A queima prévia da cana-de-açúcar no Brasil era uma operação realizada em 100% das lavouras, pelas grandes indústrias produtoras de açúcar e álcool, com o intuito de aumentar o rendimento de corte e diminuir os riscos de acidentes com animais peçonhentos. A queima da cana-de-açúcar possui pontos negativos como: a poluição, as perdas de açúcares pela exsudação. Além disso, para as características físicas do solo têm a alteração da concentração de gases, a diminuição da fertilidade e umidade do solo e a exposição do terreno aos efeitos erosivos (Langowski, 2007). A queima do canavial como parte do processo de colheita da cana-de-açúcar tende a ser eliminada, por motivos ambientais e de saúde pública, sendo substituída pela colheita mecanizada sem a queima (Braunbeck e Oliveira, 2006).

A colheita mecanizada de cana-de-açúcar no Brasil é uma tendência irreversível e junto a ela vem a preocupação com a qualidade da matéria-prima que chega à indústria. A mecanização do corte da cana-de-açúcar não é uma atividade recente. No Brasil, a primeira experiência ocorreu em 1956 com equipamento totalmente importado. Em São Paulo, iniciou em 1973 com a utilização de tecnologia importada e de fabricação nacional. Em países como Austrália e Cuba, a mecanização do corte da cana-de-açúcar já chega a quase

100% das lavouras. No Brasil, a mecanização é possível em 50% das áreas do Nordeste e em 80% das demais áreas de produção de cana-de-açúcar (Abreu et al., 2009).

No Estado do Rio de Janeiro, mais especificamente na região Norte Fluminense, grande parte da colheita da cana-de-açúcar é realizada de forma manual com o auxílio de queimadas. Esta região, em tempos passados, apresentava uma produção de grande relevância em nível nacional, porém, a região não consegue atingir as mesmas produções atualmente. Todavia, a cana-de-açúcar ainda é a principal atividade agrícola da região. Na safra 2013/14, a região apresentou uma produção superior a dois milhões de toneladas. Contudo, segundo índices fornecidos pela Associação Fluminense dos Plantadores de Cana (Asflucan), a produtividade é baixa ficando em torno de 48 a 50 t/ha.

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 realizaram o transporte.

Grande parte das máquinas colhedoras em uso no Brasil foi desenvolvida por tentativas e erros, sem passar por um processo de otimização de seu projeto (Garcia, 1998). São vários os pontos que merecem atenção por parte dos engenheiros projetistas, entre eles o dimensionamento dos sistemas de corte e transmissão de potência.

A aplicação de programas computacionais específicos que auxiliem no projeto do rotor permite sua simulação, a fim de otimizar seu projeto, eliminando a tentativa e o erro. O programa ANSYS, que tem como base matemática o método de elementos finitos, é hoje largamente aplicado para solucionar os diversos tipos de problemas de engenharia, como análise estrutural, mecânica do contínuo, transferência de calor e fluxo de fluidos.

As vantagens da união entre a análise por elementos finitos e a teoria de otimização são a rápida alteração do projeto com o tempo; a redução de custos para o projeto e a análise; e a eliminação ou a redução dos custos de protótipos (Haghighi et al., 1990).

Diante destas informações, o trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo de colhedora de cana-de-açúcar, acionada por um microtrator, visando com isto o desenvolvimento do setor sucroalcooleiro da região do Norte

Fluminense, contribuindo para o aumento da capacidade operacional, da produtividade, e redução das perdas no processo de colheita da cana-de-açúcar com conseqüente aumento de lucros e redução no preço final do açúcar, do álcool e de outros subprodutos, além de apresentar em especial ao pequeno e médio produtor rural mais uma opção de maquinário agrícola para a operação de colheita mecanizada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes

A cultura da cana-de-açúcar surgiu em Campos dos Goytacazes por volta do século XVII, utilizando-se dos Engenhos Reais, com maior capacidade produtiva, e as engenhocas ou engenhos à tração animal, humana (escravos) ou à roda d'água, que tiveram sua duração até meados do século XIX. Os engenhos possuíam alambiques para a produção de aguardente, que era fabricada com os méis residuais da fabricação do açúcar. Já nas engenhocas, a aguardente era fabricada diretamente do caldo da cana (Pinto, 1995).

Os engenhos a vapor surgiram em 1824 e perduraram até 1877 com a introdução de novas técnicas, tais como a substituição da tração animal por máquina a vapor, substituição de moendas de madeira por moendas de ferro, substituição do fogo direto nos tachos por vapor produzido nas fornalhas e o cozimento do caldo em vasos fechados, o que tornou o processo mais econômico (Pinto, 1995).

Segundo Lamego (1974), a indústria açucareira campista acelerou-se com o advento do grande senhor de engenho e a primeira fábrica a vapor – a de Barra Seca, em São João da Barra. Em 1827, Campos possuía um quantitativo de 700 engenhocas e um engenho a vapor (Pinto, 1995).

A partir de 1850, com a ascensão definitiva da máquina a vapor no processo de fabricação do açúcar em Campos, transformações de natureza diversa intensificaram-se, assim como grande concentração de capital, fazendo desaparecer a engenhoca; senhores de engenho com grande poder sobre terras e escravos, o que lhes acarretava maior prestígio e poder; pequenos proprietários que, não competindo com os grandes latifundiários, desfizeram-se de suas engenhocas e submeteram-se à condição de fornecedores de cana-de-açúcar para os engenhos (Paranhos, 2006). O investimento maciço de capitais nos engenhos e a aquisição de novos equipamentos para ampliar a capacidade da indústria do açúcar geraram, duas vertentes, dois caminhos ainda hoje pouco compreensíveis: o dos engenhos centrais e o das usinas de açúcar (Oscar, 1985; Paranhos, 2006). Os Engenhos Centrais surgiram em 1877 em substituição aos engenhos a vapor, seguidos pelo surgimento das primeiras usinas de açúcar, em uma fase que foi até 1933, com a criação do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), no governo Vargas (Smiderle, 2009).

O Engenho Central era uma unidade de fabricação de açúcar e aguardente ou álcool, capaz de moer grande quantidade de material por dia, composto de equipamentos de última geração, importados de importantes firmas estrangeiras. A intenção da criação de condições e de dispositivos para o surgimento no Brasil de engenhos centrais era desejo do Governo Imperial, através do Gabinete Administrativo. Pretendia-se dotar o país do que existisse de mais moderno em termos de fabricação de açúcar, e o Brasil estava atrasado em mais de uma década comparado com outros eventuais concorrentes (Pinto, 1995).

Com o fim do governo Imperial, em 1889, o novo governo, republicano, não quis continuar financiando os engenhos centrais, como fizera o governo anterior. Dessa forma, novas fábricas foram ofertadas com vantagens técnicas sobre os engenhos centrais. Os franceses as chamavam de usine, que posteriormente passaram a ser chamadas de usinas, e seus donos, de usineiros. Por volta da primeira década do século XX, Campos dos Goytacazes já possuía 27 usinas de cana e aguardente, ficando os engenhos e seus antecessores no passado (Pinto, 1995).

As usinas da primeira metade do século XX possuíam vida própria. O usineiro era um senhor absoluto dentro dos seus limites, fornecendo moradia aos funcionários, assistência médica hospitalar, escola, jardim de infância, dentista,

armazém para as compras, cinema, pontes, praça de esportes, banda de música, festas, festejos de padroeiros etc. Era admirado e respeitado por todos, chegando mesmo a se envolver em assuntos familiares, dando conselhos, realizando casamentos e batizando crianças. Em contrapartida, o usineiro exigia de seus funcionários dedicação, obediência e lealdade (Pinto, 1995).

Para a construção das usinas, os franceses forneceriam os equipamentos a um custo bem menor que o dos engenhos centrais. As usinas poderiam moer canas próprias e comprar cana dos vizinhos sem ter gastos com transporte, pois não precisavam de grande quantidade de cana, uma vez que essas usinas possuíam capacidade de moagem bem inferior à dos engenhos centrais, já que eram fábricas menores, requerendo, dessa forma, menos matéria-prima para cada unidade industrial (Smiderle, 2009).

Nos últimos 40 anos, várias usinas de açúcar e/ou álcool encerraram atividades em Campos dos Goytacazes, trazendo prejuízos econômicos e sociais para a região, pelo fato da cana-de-açúcar ser a principal atividade econômica da região, sendo elas: Baixa Grande, Cambaíba, Cupim, Mineiros, Novo Horizonte, Outeiro (Cardoso Moreira), Queimado, Santa Maria, São João, Barcelos, Poço Gordo e Sapucaia.

Um dos fatores que contribuíram para o fechamento das usinas é o fato das mesmas terem sido instaladas muito próximas umas das outras e um outro fator foi a concorrência, principalmente aquela efetuada pelas usinas maiores e melhor administradas. Não só os engenhos centrais sucumbiram a essa nova realidade, como também usinas menores (Pinto, 1995). Além disso, o país apresentou certas dificuldades como baixa produtividade e a crise nacional, em consequência de políticas econômicas do setor sucroalcooleiro que apoiou o desenvolvimento e a ampliação das usinas, mas não dos canaviais, formando grandes usinas tecnificadas sem matéria-prima para produção.

Atualmente, no município de Campos dos Goytacazes, existem em atividade três usinas, sendo as usinas Paraíso, Cana-Brava e a Cooperativa Agroindustrial do Estado do Rio de Janeiro (Coagro), que arrendou a antiga usina São José em 2003 e devendo se transferir em 2015 para a Usina Sapucaia, desativada e vendida recentemente. Além disso, a Coagro, pretende renovar cerca de 7.688 ha, que se encontram em total abandono. Esses fatos podem representar uma possível melhoria na situação atual do setor sucroalcooleiro

campista. Entretanto, o setor em questão necessita de medidas que proporcionem o desenvolvimento tecnológico de suas atividades agrícolas e industriais, colocando-o em condições favoráveis de competitividade.

2.2 Mecanização agrícola

2.2.1 Aspectos ambientais e sociais

O processo de modernização da lavoura canavieira ocorre desde a década de 60. Porém, não se verificou nessa época a mesma intensidade da mecanização na colheita do produto (Abreu et al., 2009). De acordo com Ripoli e Ripoli (2005), o início da mecanização se deu com o surgimento das primeiras carregadoras de cana-de-açúcar visando substituir o carregamento manual.

Veiga Filho (2006) relata que a indução à mecanização da cana-de-açúcar deve-se a um amplo conjunto de fatores. O primeiro deles, de natureza econômica, é o aumento de custos de produção da colheita manual ou a redução dos mesmos com a adoção da colheita mecânica induzindo a um aumento de rentabilidade da atividade, que permite fazer os investimentos necessários para aumentar a eficiência do processo produtivo agrícola. Um segundo fator, de natureza técnico-operacional, é originado pelo acesso e pela disponibilidade às máquinas, à assistência técnica e ao financiamento, domínio do novo padrão tecnológico, entre outros. E um terceiro fator, derivado da legislação ambiental com ações exercidas pelo Ministério Público e pela sociedade civil em geral.

Salvi et al. (2010), na mesma linha de pensamentos do autor citado, relatando que, nos últimos anos, o sistema de colheita tem passado por uma fase de substituição do corte semimecanizado para o mecanizado devido aos fatores mão de obra, ambiental e legislativo. O fator de mão de obra se deve ao elevado custo dos encargos trabalhistas no Brasil e à escassez de trabalhadores para atender a demanda crescente da produção no país. O fator ambiental e legislativo deve-se às pressões da sociedade, reivindicando regulamentação da prática na lavoura canavieira, estabelecendo um cronograma para a total eliminação das queimadas.

Com a Lei Estadual 5.990 de 20 de junho de 2011, foi definido que nas lavouras em áreas passíveis de mecanização da colheita, a redução da queima seria de 20% até 2012; 50 % até 2014; 80% até 2018 e cessasse até 2020. Já para as plantações onde a colheita mecanizada não pode ser implantada os prazos são maiores: até 2016, redução de 20%, até 2018, 50%, até 2022, 80% e 2024 para acabar definitivamente com a prática.

Segundo Moreira (2006), esse fator legislativo, onde o governo vem se mobilizando para reduzir as queimadas, é um grande incentivo à mecanização.

O Ministério Público Federal no Rio de Janeiro (MPF/RJ) vem atuando no município de Campos dos Goytacazes, onde as queimadas acontecem com frequência, estabelecendo liminares que suspendem temporariamente a utilização de queimadas como parte do processo de colheita da cana-de-açúcar nas áreas. O objetivo do MPF é proteger a integridade física dos trabalhadores rurais, pois, de acordo com investigações feitas, as empresas não avisam as datas e os horários das queimadas, sem mencionar que essas queimadas podem ser acidentais ou criminosas, o que já resultou na morte de uma trabalhadora em 2009. As queimadas também colocam em risco a vida de todos que se encontram nos locais onde elas acontecem.

Estudando os efeitos da queima dos canaviais, Delgado (1985) observou aspectos favoráveis e desfavoráveis dessa prática. Dentro do aspecto agrônomo, consideram-se como fatores positivos da queima, as facilidades nas operações de descompactação e preparo do solo, o cultivo das soqueiras, o maior teor de cinzas no solo, a eliminação da broca da cana-de-açúcar, das cigarrinhas e de outras pragas, o que facilita o corte manual e mecanizado, que por sua vez aumenta o rendimento do cortador e da máquina. Ainda o mesmo autor considera como fatores negativos, a destruição dos inimigos naturais da broca da cana-de-açúcar, a facilidade no desenvolvimento de ervas daninhas, a perda de parte da matéria orgânica do solo provocada pela incidência da temperatura elevada, a predisposição do solo à ação mais agressiva das chuvas e o maior ressecamento pela exposição direta aos raios solares.

No período de safra da cana-de-açúcar de 2009, em Campos dos Goytacazes, foram registrados 3.370 casos crônicos de doenças respiratórias e oftalmológicas, atingindo principalmente crianças e idosos (Ribeiro 2010).

Segundo Fernandez et al. (2010), os custos das doenças respiratórias relacionadas à poluição atmosférica na cidade de Rio Grande, podem ser mensurados por meio de metodologias que forneçam dados reais dos gastos com as internações hospitalares ocorridas em determinado período. Verificaram que, no ano de 2009, os gastos hospitalares chegaram a um total de R\$ 2.242.687,96; a morbidade respiratória, que foi obtida pelo número de dias perdidos de trabalho multiplicado pelo tempo médio de permanência por internação, representou um total de R\$ 191.106,28. Esta relação mostra o valor que a sociedade paga efetivamente pelas doenças respiratórias, as externalidades negativas são internalizadas por meio do montante pago (Monteiro, 2011).

O fogo usado para a facilitação do corte da palha da cana-de-açúcar gera graves danos ambientais como a destruição de espécies da fauna nativa, a alteração da umidade da terra, o aquecimento da superfície, a alteração das taxas de infiltração de água, a diminuição da fertilidade do solo, dentre outros (Ribeiro, 2010). A saída atual é pagar mais caro pelo corte da cana-de-açúcar crua, sem queima, ou implementar a colheita mecanizada, saída viável economicamente frente à restrição de corte manual após a queima. Se aplicada de forma adequada pode aumentar a capacidade operacional, reduzir as perdas no processo de colheita com consequente aumento de lucros e redução no preço final de seus produtos, destacando-se o álcool e o açúcar.

Por outro lado, o processo de mecanização causa problemas sociais graves, pois é dada pouca atenção ao destino dos trabalhadores rurais e as consequências sociais que sofrerão com a mecanização total da colheita da cana-de-açúcar. O desemprego resultante desse processo tende a aumentar a miséria e a violência, principalmente onde há elevada absorção de trabalhadores rurais (Abreu et al., 2009). Mas por outro lado, a utilização de máquinas agrícolas pode tornar o processo de colheita mais rápido e menos oneroso, e ainda eliminando o trabalho árduo da colheita manual.

2.2.2 Aspectos técnicos

A mecanização da colheita é de extrema importância no setor devido ao encarecimento crescente de mão de obra do corte manual e ao interesse na obtenção de aumentos nos desempenhos das operações de colheita, com sua

consequente diminuição de custo. Uma máquina colhedora de cana-de-açúcar autopropelida moderna pode substituir em torno de 100 homens por hora, dependendo das condições da cultura (Abreu et al., 2009). Porém, é necessário que haja um estudo técnico e econômico para avaliar a viabilidade de sua utilização em determinada área, aumentando a necessidade da sistematização das lavouras.

A sistematização tem grande relevância para o sucesso da colheita mecânica da cana-de-açúcar (Almeida et al. 2009). Os autores observaram que os níveis de perdas visíveis foram menores em talhões adequadamente sistematizados quando comparados com canaviais comerciais. O que se justifica pelo incremento no número de manobras e de paradas da colhedora, como consequência dos desníveis no microrrelevo, das ruas mortas e das fileiras de plantio sem paralelismo, que são condições que afetam os rendimentos das máquinas tanto em termos quantitativos como qualitativos.

Vários fatores de campo estão envolvidos no sucesso da colheita da cana-de-açúcar, destacando-se entre eles: o nivelamento do solo, o formato e o comprimento dos talhões, a produtividade e a homogeneidade do canavial, as características das cultivares, a qualidade da operação, o treinamento de operadores e a velocidade de trabalho (Benedini e Conde, 2008).

No município de Campos dos Goytacazes, Solano (2011) definiu os fatores limitantes da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, a fim de propor uma melhora nas condições desta operação. O mesmo autor verificou grande heterogeneidade e a maioria dos talhões fora da padronização recomendada para mecanização da colheita da cana-de-açúcar. Notou-se que apenas 7,18% dos talhões apresentaram comprimento de fileiras de plantio recomendadas.

Ripoli et al. (1999), avaliando o desempenho operacional de uma colhedora de cana-de-açúcar crua em função da velocidade de avanço encontraram uma capacidade bruta máxima de $110,18 \text{ t h}^{-1}$. Observaram também que a velocidade ótima de trabalho foi aproximadamente $7,0 \text{ km h}^{-1}$ quando foi determinado um consumo de combustível de $0,61 \text{ L t}^{-1}$.

Da avaliação do desempenho operacional e econômico de uma colhedora em canavial sem queima prévia realizada, em julho de 1998, utilizando-se a variedade RB835089 em soqueira de 3º corte, foi observado que a velocidade de

deslocamento tem influência no desempenho operacional e econômico, assim como a eficiência do sistema de colheita. A velocidade de colheita, de $5,39 \text{ km h}^{-1}$ apresentou o melhor desempenho econômico, menores perdas no campo e menor índice de matéria estranha. Já Rosa et al. (2009), constataram que a velocidade de deslocamento não influencia nas perdas visíveis de cana-de-açúcar, determinando velocidade média de $8,0 \text{ km h}^{-1}$ para o trabalho das colhedoras.

É importante, além da tecnologia, o controle de qualidade, o qual, com a correção e a eliminação de desperdícios e falhas, a redução de custos e o aumento da produtividade trará vantagens numerosas na competitividade do campo.

Em trabalho realizado em Campos dos Goytacazes, Manhães et al. (2013), observaram que a rotação do exaustor primário utilizado no trabalho foi de 800 rpm, valor acima do recomendado pelo fabricante, isso devido a grande quantidades de folhas verdes e palha no canavial no momento da colheita. Com aumento da rotação do exaustor primário, diminui-se a quantidade de impurezas, mas, em contrapartida, aumenta-se a quantidade de perdas dos tipos lascas e pedaços soltos. Os mesmos autores concluíram que as condições de campo devem ser sistematizadas e adequadas à colheita mecanizada da cana-de-açúcar visando redução de perdas e melhores condições de rebrota.

Com o objetivo de avaliar a qualidade das operações agrícolas para a cultura de cana-de-açúcar, envolvendo o preparo do solo e a aplicação de defensivos, Fernandes et al. (2000) constataram que a utilização da mecanização no sistema de produção, se não bem conduzida, acarreta resultados insatisfatórios em relação aos padrões desejados. Assim, Solano (2011) determinou os principais parâmetros de viabilidade para o sistema de colheita: relevo do terreno, área, comprimento, largura e irregularidade dos talhões. Quanto à cultura, foram selecionados os seguintes parâmetros: área cultivada, variedades, produtividade e espaçamento entre fileiras.

2.2.3 Desenvolvimento e avaliação de máquinas

O projeto, o desenvolvimento e a avaliação de uma máquina envolvem etapas importantes e permitem a criação de um implemento específico para atender uma determinada demanda.

Trabalhando com o desenvolvimento de uma colhedora acionada por trator de rabiças, Forcellini (1989) projetou, construiu e testou um protótipo de colhedora de forragens destinada a pequenos produtores. O autor levantou e analisou diferentes concepções de máquinas e os respectivos parâmetros com a finalidade de formar uma base para o projeto. Obteve-se uma máquina robusta, de peso e dimensões reduzidas, de fácil acionamento, porém, observaram-se algumas falhas durante ensaios que foram corrigidas com a reconstrução de alguns setores.

Gupta et al. (1996) também desenvolveram uma colhedora de cana-de-açúcar acionada por um trator de rabiças com motor à gasolina de 6 kW. O trabalho foi direcionado a produtores de países em desenvolvimento que não podem comprar máquinas colhedoras caras utilizadas em países desenvolvidos. A máquina desenvolvida reduziu as exigências de trabalho para cortar e tombar os caules de cana-de-açúcar. Em testes de campo, a colhedora apresentou capacidade operacional média da máquina de 0,13 ha h⁻¹ com eficiência de campo média de 71%. A capacidade de campo encontrada supera em torno de oito vezes a capacidade operacional de um trabalhador na região de Campos dos Goytacazes, segundo informações da Coagro.

A mecanização da colheita tornou-se uma necessidade dos tempos modernos, mas perdas de 10 a 15% são frequentes quando a cana-de-açúcar é colhida crua. A deflexão e o corte de base são responsáveis por danos na cana colhida e na soqueira. As colhedoras cortam a cana em sua base pelo impacto, usando dois discos rotativos com múltiplas lâminas. A alternativa para o corte por impacto é o corte por deslizamento. Em estudo de Mello e Harris (2003), foram determinados a influência do tipo de lâmina e o passo do perfil serrilhado na presença de um momento fletor causado pela ação do rolo defletor. Foram comparados os danos causados na cana-de-açúcar e a energia gasta para cada corte. As lâminas inclinadas para frente com passo serrilhado de 3 mm foram as que apresentaram os melhores resultados.

Segundo Garcia (1998), geralmente, as máquinas agrícolas têm sido desenvolvidas por tentativas e erros. Um protótipo da máquina é construído e

avaliado. De acordo com os resultados obtidos na avaliação experimental, o protótipo é alterado e, novamente, submetido a testes. Encontrando-se o protótipo em condições normais de funcionamento, ele é utilizado como matriz, para produção em série de máquinas que irão ao mercado consumidor. O projeto de máquinas com base em técnicas de projeto assistido por computador (CAD) permite a produção de uma máquina agrícola mais eficiente, segura e barata, além de propiciar sensível redução do tempo de seu desenvolvimento.

O método numérico de elementos finitos vem sendo amplamente utilizado na solução de problemas de engenharia e se tornando a base computacional de vários sistemas CAD.

Com a finalidade de otimizar o peso dos braços de um mecanismo destinado à colheita de melões, Edan et al. (1992) desenvolveram um procedimento para a análise e otimização, usando o método de elementos finitos. O programa ANSYS foi utilizado em ambos os processos de análise e otimização. Uma primeira análise foi feita, objetivando determinar as tensões estáticas críticas dos braços. O projeto inicial foi então aperfeiçoado, aplicando-se a técnica de otimização, para minimizar o peso dos braços, enquanto se assegurava que estes seriam suficientemente fortes para aguentar o peso do melão. O projeto final encontrado foi significativamente mais leve do que o inicial. Essa redução em peso proporcionou melhoria no projeto da máquina, reduzindo suas forças inerciais.

Queiroz et al. (1994a) utilizaram um modelo matemático baseado em análise por elementos finitos, a fim de otimizar o projeto de um mecanismo trilhador de arroz, que consistia em um eixo cilíndrico com dedos adicionados a ele. Um projeto inicial foi modelado, seguindo as dimensões de um protótipo previamente avaliado. Uma solução analítica foi utilizada, para validação do modelo. O resultado da otimização mostrou que o rotor do mecanismo da trilha poderia ser construído com uma economia de 65% do material.

Um modelo computacional baseado em análise por elementos finitos, para predição e avaliação do desempenho dinâmico de um suporte de montagem de um motor diesel no chassi, foi estudado por Zhu et al. (1989). Utilizando o programa ANSYS, foi analisada a influência dos furos para os parafusos, para fixação da peça, a posição dos entalhes de reforços e as condições de contorno, como a posição de aplicação de forças, quanto à frequência natural e à forma

modal da peça. Foram encontradas relações entre os furos para os parafusos e os entalhes de reforços com a frequência natural da peça. As equações teóricas geradas a partir da resposta da análise harmônica puderam ser usadas para prever os valores máximos de deslocamento da peça sob a excitação do motor em funcionamento.

Queiroz et al. (1994b) desenvolveram um modelo por elementos finitos, para analisar e otimizar o projeto de discos de arado. O modelo foi validado comparando-se seus resultados com uma solução analítica. Concluiu-se que o disco poderia ser reprojetoado com a alteração de seu furo central, reduzindo cerca de 44% de sua massa. Seria possível também alterar sua espessura e seu raio de curvatura, a fim de reduzir em cerca de 23% sua massa original.

Smith et al. (1989) analisaram um suporte de montagem de um motor diesel no chassi sob condições de cargas estáticas, para simular as máximas cargas de serviço, usando o programa ANSYS. Uma vez encontradas as tensões distribuídas no suporte, alterações no projeto foram feitas, adicionando reforços, como covas e faixas, para fortalecer a peça nas áreas de maiores tensões. Os resultados destas alterações indicaram uma redução significativa das tensões nas áreas críticas do suporte. Também foi avaliada a fadiga do suporte, e os resultados para esta nova condição foram aceitáveis.

Garcia (1998) realizou análises do rotor e da faca de corte de uma colhedora de forragem utilizando o programa ANSYS ED 5.3. A distribuição de tensões ao longo do rotor foi avaliada e, logo em seguida, teve seu projeto otimizado, visando minimizar seu volume e, conseqüentemente, seu peso. A faca de corte também foi analisada quanto à sua distribuição de tensões. Os modelos foram verificados comparando-se os resultados obtidos pelo programa ANSYS com os resultados obtidos por soluções analíticas para problemas mais simples. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o modelo desenvolvido usando o programa ANSYS apresentou resultados próximos aos das soluções analíticas e que o trabalho de otimização conduzido indicou que o volume do rotor de corte da colhedora poderia ser reduzido em 58,32%.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro e na oficina da usina São José, administrada pela Coagro, onde se desenvolveu um protótipo de colhedora de cana-de-açúcar de baixo custo, com a capacidade de cortar e tombar uma linha da cultura para ser adaptada a um microtrator com potência no motor de 14 cv.

O protótipo desenvolvido neste projeto 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 foram reguladas de acordo com a distância entre as linhas de cultivo.

Na primeira parte do projeto, foi realizada a análise de tensões do sistema de corte do protótipo, na segunda parte do trabalho, o protótipo foi projetado e construído, e na terceira parte, o protótipo foi avaliado em condições de campo.

3.1 Análise de tensões do sistema de corte do protótipo da colhedora de cana-de-açúcar

O programa computacional ANSYS versão 10.0 foi utilizado para avaliação da análise de tensões do sistema de corte do protótipo.

Os componentes modelados foram considerados como fabricados em aço SAE 1020, e foram utilizadas as seguintes propriedades desse material, segundo Shigley e Mischke (1989), nos modelos desenvolvidos:

- módulo de elasticidade transversal - $209 \cdot 10^3$ MPa;
- tensão de cisalhamento - 250 MPa;
- coeficiente de Poisson - 0,3, e
- massa específica aparente - $7,85 \cdot 10^{-6}$ kg mm⁻³;
- Tensão de cisalhamento - 250 MPa.

Para realizar a análise de tensões do sistema de corte do protótipo da colhedora de cana-de-açúcar, um modelo inicial foi elaborado com dimensões predefinidas, considerando-se um disco de corte de base com oito facas dispostas tangencialmente com ângulo de corte de 35°.

O modelo foi desenvolvido utilizando-se o elemento PLANE82, definido por um quadrilátero formado por oito nós, considerando uma malha de elementos e condições de contorno.

A análise de tensões de materiais elásticos no programa ANSYS foi realizada com base na Equação 1.

$$[K] \cdot \{u\} = \{F^a\} + \{F^r\} \quad (1)$$

em que

$[K]$ = matriz de rigidez total, obtida por meio do somatório das matrizes de

rigidez dos elementos;

$\{u\}$ = vetor de deslocamento dos nós;

$\{F^a\}$ = vetor das forças totais aplicadas, e

$\{F^r\}$ = vetor das forças de reação.

Para se analisar as tensões da faca de corte do protótipo de colhedora, foi utilizada uma análise dinâmica transiente, técnica usada para determinar a resposta dinâmica de uma estrutura sob a ação de cargas variáveis com o tempo. Esse tipo de análise pode ser utilizada 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.

A força aplicada na faca de corte foi calculada em função da rotação do rotor de corte, de 1.830 rpm, e da potência requerida para acionar a colhedora, estimada por dois métodos. Primeiramente, utilizou-se o índice estabelecido por Berge (1951) de $0,88 \text{ W.h/kg}^{-1}$. Para uma capacidade máxima de colheita de 25.000 kg/h^{-1} , considerando-se uma produtividade de 50 t/ha^{-1} , velocidade de deslocamento de $3,6 \text{ km/h}^{-1}$ e distância entre linhas de 1,2 m, obteve-se uma potência de 22 000 W. Depois, utilizou-se a Equação 2, apresentada pela Norma ASAE D497 (ASAE, 1990) que estabelece a determinação da potência exigida para uma colhedora de forragem.

$$P = 1.500 + 0,92 \cdot F \quad (2)$$

em que:

P - potência demandada, W;

F - taxa de alimentação, kg/h^{-1} .

Considerando uma taxa de alimentação de 25.000 kg/h^{-1} , obteve-se uma potência demandada de 24.500 W. Na análise do projeto considerou-se, então, o valor de 24.500 W, por apresentar maior margem de segurança.

A equação de movimento utilizada na realização da análise dinâmica transiente pelo programa ANSYS é dada pela Equação 3.

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [C] \cdot \dot{u} + [K] \cdot \{u\} = \{F(t)\} \quad (3)$$

em que:

- $[M]$ - matriz de massa;
- $\{\ddot{u}\}$ - vetor de aceleração dos nós;
- $[C]$ - matriz de amortecimento;
- $\{\dot{u}\}$ - vetor velocidade dos nós;
- $[K]$ - matriz de rigidez total, obtida por meio do somatório das matrizes de rigidez dos elementos;
- $\{u\}$ - vetor de deslocamento dos nós;
- $\{F(t)\}$ - vetor força.

Um modelo paramétrico tridimensional da faca de corte foi desenvolvido em linguagem APDL (ANSYS Parametric Design Language). Na Figura 1, é apresentado um esquema do modelo da faca de corte do protótipo de colhedora utilizado no projeto da máquina, e na Figura 2, é apresentado o sistema de corte, composto por disco e lâminas dispostas tangencialmente.

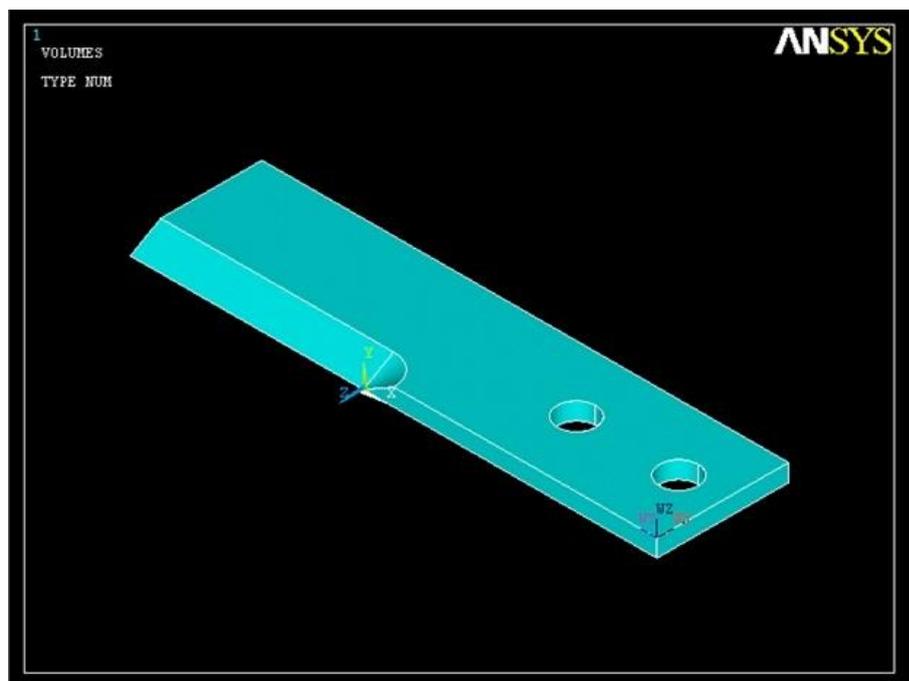


Figura 1. Modelo da faca de corte utilizado no projeto da máquina.

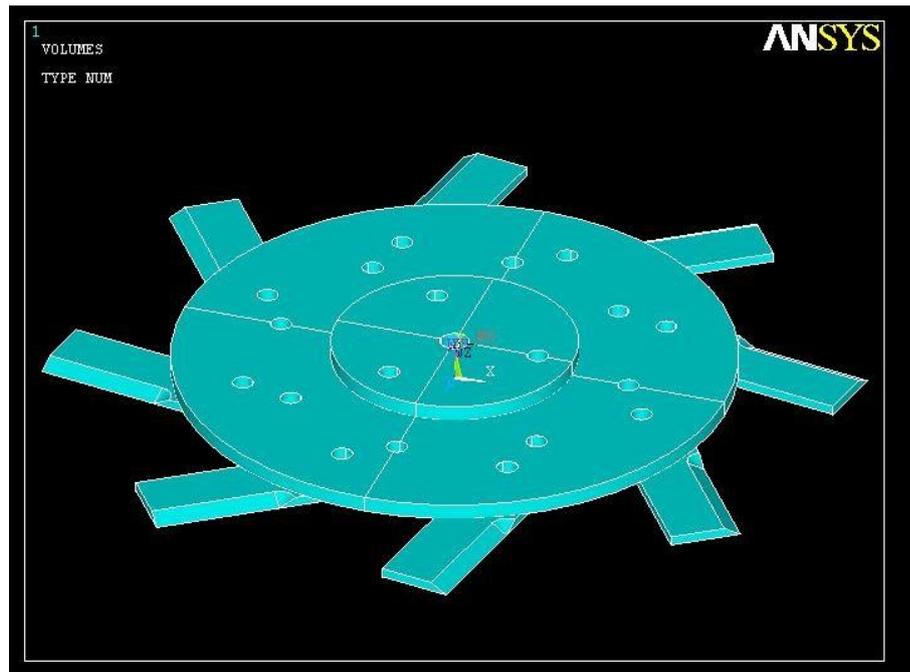


Figura 2. Modelo do sistema de corte, composto por disco e lâminas utilizados no projeto da máquina.

Foram utilizados o elemento PLANE82, formado por um quadrilátero contendo oito nós, e o elemento SOLID45, composto por um poliedro de seis lados, contendo 20 nós e a simulação foi realizada para um intervalo de tempo total de $4,10 \cdot 10^{-3}$ segundos, que corresponde ao tempo que a faca leva para percorrer toda a seção transversal de material a ser cortado, considerando a frequência do disco de corte de 1.830 rpm, e oito facas dispostas no disco. Na Figura 3, é apresentado um esquema da malha de elementos da seção de corte da faca gerada na solução do problema.

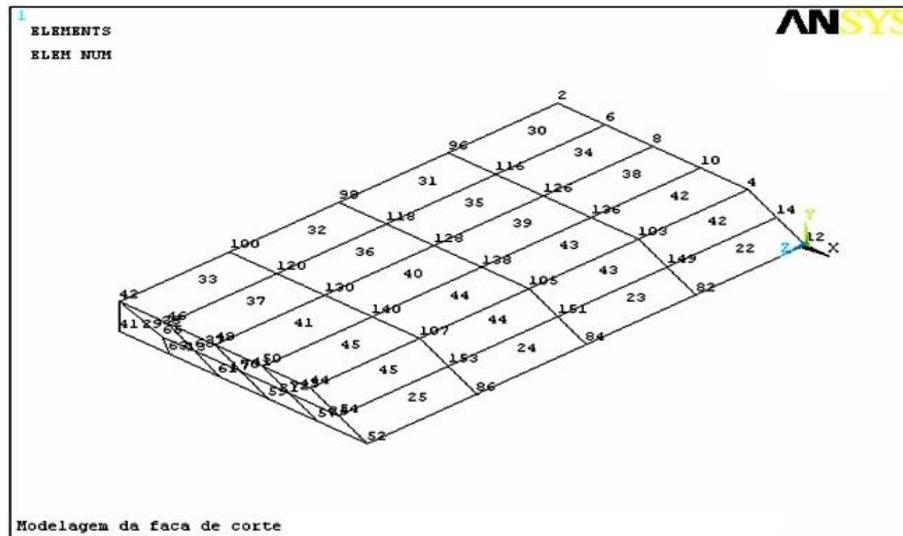


Figura 3. Malha de elementos utilizada na modelagem da seção de corte da faca.

Foram empregadas soluções analíticas para um problema mais simples utilizando-se elementos finitos, para se fazer a verificação do modelo implementado, devido à impossibilidade de obtenção de dados experimentais para validação dos modelos desenvolvidos. Desta forma, utilizou-se a mesma malha, o mesmo tipo de elemento, as mesmas propriedades dos materiais e as dimensões aproximadas das usadas no desenvolvimento do modelo da faca de corte do protótipo de colhedora.

Para a verificação do modelo de análise de tensões da faca de corte, comparam-se as tensões obtidas utilizando-se o modelo de elementos finitos empregando o programa ANSYS, e as obtidas por meio de solução analítica apresentada por Nash (1972). Este autor apresentou a solução analítica para obtenção de tensões em uma viga submetida a momentos fletores. Para simular esta situação no programa ANSYS, gerou-se o mesmo elemento utilizado, apresentado na Figura 3. Um dos lados das extremidades da faca foi mantido engastado, enquanto na outra extremidade foi aplicada uma força na direção X de 583 N. As tensões na direção Z obtidas com a utilização do programa ANSYS foram comparadas com os valores obtidos pela Equação 4.

$$\sigma_z = \frac{(M_x \cdot I_{yy} + M_y \cdot I_{yx}) \cdot y + (-M_y \cdot I_{zz} - M_x \cdot I_{xy}) \cdot x}{I_{yy} \cdot I_{xx} - I_{xy}^2} \quad (4)$$

em que:

- σ_z - tensão normal na direção Z, N/m²;
- M_x - momento fletor na direção X, N.m;
- M_y - momento fletor na direção Y, N.m;
- I_{xx} - momento de inércia com relação ao eixo X, m⁴;
- I_{yy} - momento de inércia com relação ao eixo Y, m⁴;
- I_{xy} - produto de inércia com relação ao plano XY, m⁸;
- x - abcissa do ponto de interesse em relação ao centro de gravidade da seção, m;
- y - ordenada do ponto de interesse em relação ao centro de gravidade da seção, m.

3.2 Projeto e construção do protótipo de colhedora de cana-de-açúcar

Para a realização do desenho e projeto do protótipo de colhedora de cana-de-açúcar em formato eletrônico, utilizou-se o programa computacional AutoCAD versão 2011 para criar o desenho com as vistas superior, lateral e frontal.

Após a realização do desenho do protótipo, projetaram-se os pontos de acoplamento ao microtrator utilizado no projeto. O microtrator considerado neste trabalho foi o modelo Yanmar TC14S, com 10,3 kW (14 cv) de potência no motor, comprimento de 2,22 m, largura de 0,82 m, altura de 1,43 m e massa de 433 kg (Figura 4).



Figura 4. Microtrator Yanmar modelo TC14S (Fonte: Folder do fabricante).

Para a construção da estrutura do protótipo, utilizaram-se tubos de aço de seção quadrada em aço de baixo teor de carbono SAE 1020.

O sistema de transmissão da máquina foi dividido em dois setores, sendo o sistema de corte da base dos colmos e o sistema de transporte lateral do material cortado. 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.

Duas rodas de sustentação, com pneus de borracha, responsáveis pela sustentação frontal da máquina, dirigibilidade e regulagem da altura do corte, foram posicionadas na parte frontal externa de cada lado da máquina. Estas rodas possuem regulagem da altura determinada por chapas de metal com aberturas para posicionamento dos parafusos de fixação e permitem a rotação de 360°.

O sistema de corte da máquina é composto por um disco, fixado no eixo de saída da transmissão deste setor. Este disco possui diâmetro de 25 cm e nele foram fixadas três facas de corte dispostas tangencialmente com ângulo de 35° em relação ao eixo perpendicular de corte. As facas de corte possuem comprimento total de 20 cm, sendo 12 cm o comprimento útil de corte.

O sistema de transporte do material cortado é composto por uma corrente transportadora acionada pela outra transmissão. As correntes possuem dentes distanciados em 40 cm para facilitar o transporte do material cortado.

3.3 Avaliação do protótipo de colhedora de cana-de-açúcar

O protótipo da colhedora de cana-de-açúcar foi testado em três canaviais, o primeiro na fazenda Partido próximo à usina São José, sendo que este canavial encontrava-se no 3° corte e apresentava uma produtividade média de 35 t/ha, o segundo na localidade denominada Canavial do Colégio também próximo à mesma usina, sendo que este canavial encontrava-se no quinto corte, com uma produtividade média de 35 t/ha, e o terceiro, realizado nas dependências da usina Sapucaia, onde o canavial encontrava-se sem tratamentos culturais necessários, estando em seu oitavo corte e apresentava uma produtividade inferior a 30 t/ha.

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

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de tensões do sistema de corte do protótipo da colhedora de cana-de-açúcar

O resultado da verificação do modelo da análise de tensões na face de corte, comparando-se os valores de tensões normais obtidos na direção Z, calculados através do programa ANSYS com os valores obtidos por uma solução analítica para a face de corte engastada, em uma extremidade, e submetida a uma força de 583 N na direção X, na outra extremidade é apresentado na Figura 5, em uma regressão linear entre os resultados das duas soluções.

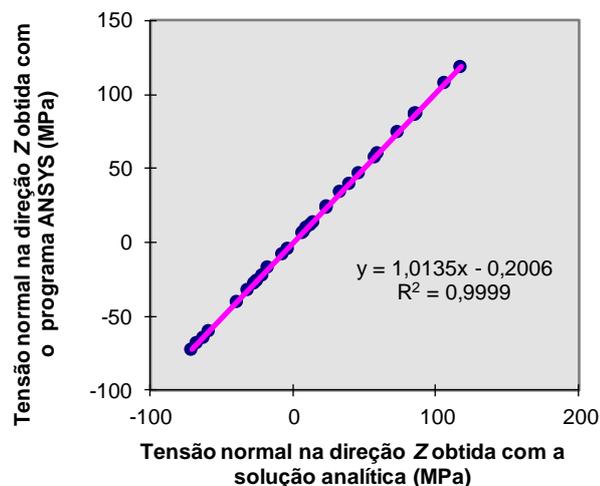


Figura 5. Comparação da tensão normal na face de corte, obtida com o programa ANSYS e com a solução analítica.

Pode-se observar que a inclinação da reta gerada pela regressão dos pontos foi próxima a 45° , em que a equação da reta $y=ax+b$ apresentou $a = 1,0135$ e $b = -0,2006$, mostrando a boa correlação entre os valores obtidos com o programa ANSYS e os encontrados com a solução analítica.

O programa computacional ANSYS, utilizado para a avaliação do projeto da faca de corte da colhedora, executou com sucesso a análise dinâmica da mesma.

Na análise de tensões, a tensão equivalente máxima encontrada na faca foi de 133 MPa, localizada na extremidade de corte da faca, no ponto de início do corte, que foi inferior à tensão de ruptura do material considerado. Em trabalho de avaliação de uma colhedora de forragem, modelo JFZ10, Garcia et al. (1998) observaram tensão equivalente máxima encontrada na faca de 144,6 MPa. A tensão encontrada (133 MPa) é inferior à tensão de ruptura do aço considerado (aço 1020 laminado a frio), que tem valor de 250 MPa.

A Figura 6 apresenta um gráfico com a evolução da distribuição de tensões, durante o tempo em que a faca foi exposta a uma força transiente. Foram selecionados nós ao longo do fio de corte da faca, localizados da extremidade direita da faca, onde se inicia o processo de aplicação da força, passando pelo centro da faca até sua extremidade esquerda.

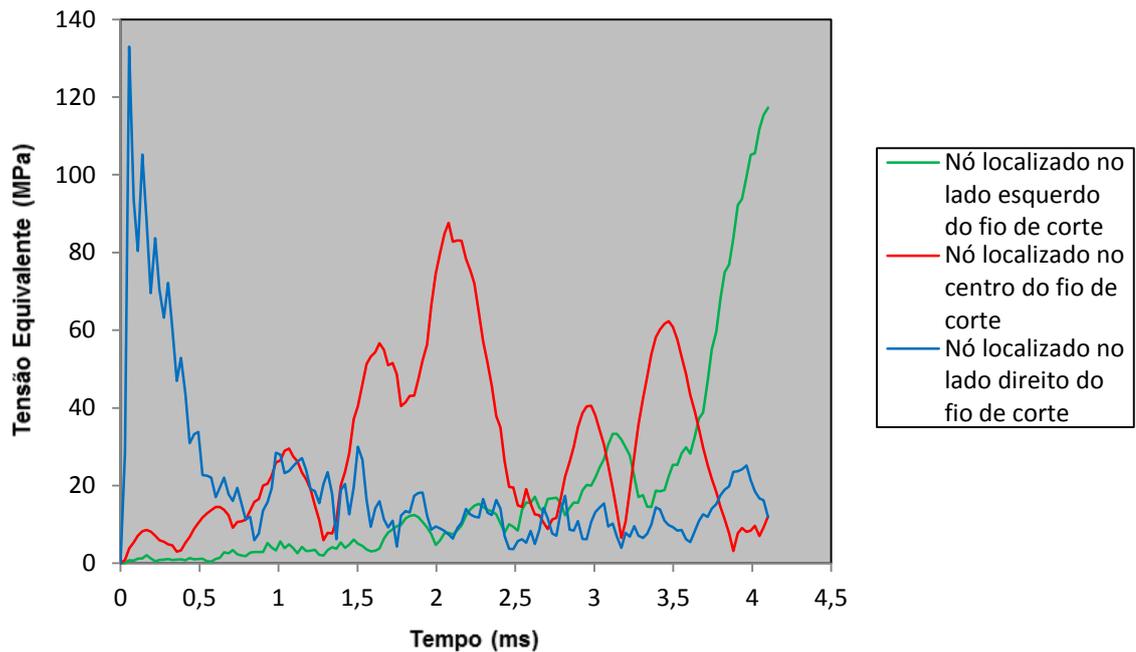


Figura 6. Evolução da distribuição de tensões ao longo de três nós da face de corte.

Verificou-se que a tensão equivalente em cada nó foi maior no instante em que a força estava sendo aplicada sobre cada um deles; houve deslocamento da tensão máxima ao longo da face, de uma extremidade a outra, devido ao ângulo existente entre a face e o disco de corte, evento também observado por Garcia et al. (1998).

Em avaliação de diferentes angulações de lâminas de corte para a cana-de-açúcar, Mello (2005) observou que houve uma redução nas forças de corte com o aumento da velocidade para lâminas inclinadas para frente e para trás, em relação à lâmina reta convencional.

4.2 Projeto e construção do protótipo de colhedora de cana-de-açúcar

O protótipo de colhedora de cana-de-açúcar foi desenhado em AutoCAD, e suas vistas superior, lateral e frontal estão apresentadas nas Figuras 7, 8 e 9, respectivamente.

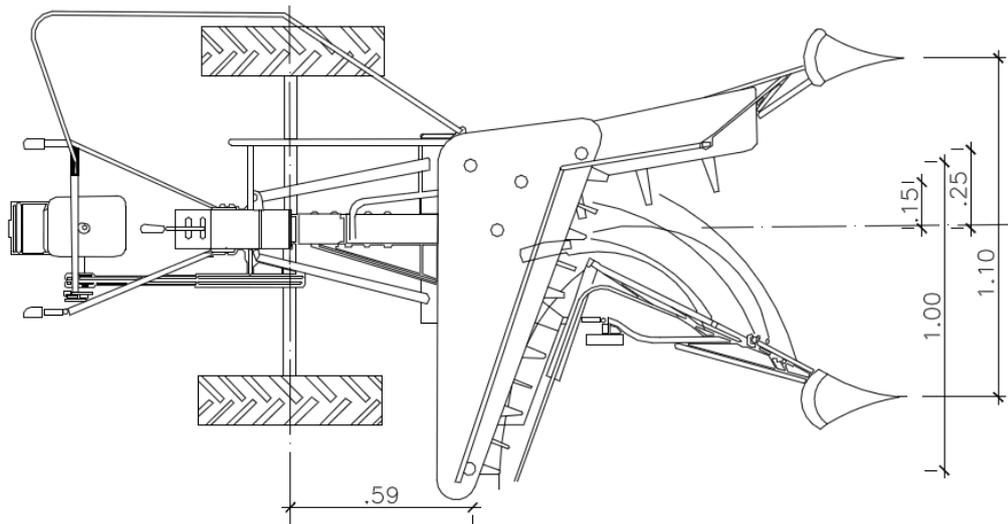


Figura 7. Vista superior do protótipo de colhedora de cana-de-açúcar.

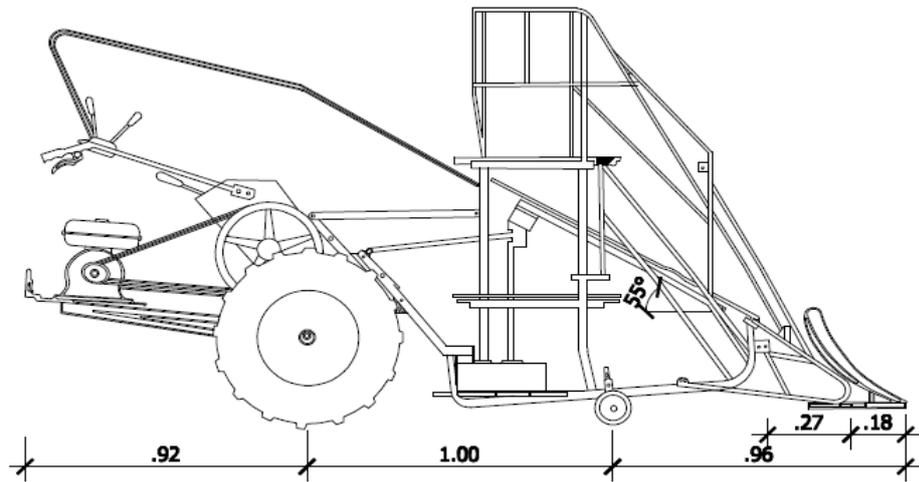


Figura 8. Vista lateral do protótipo de colhedora de cana-de-açúcar.

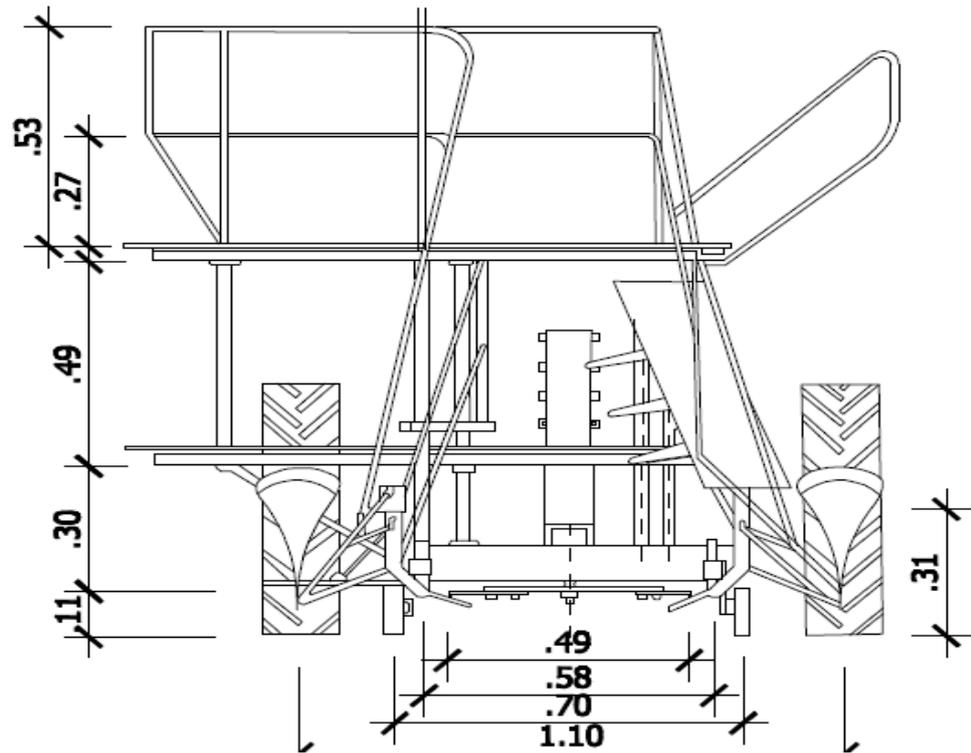


Figura 9. Vista frontal do protótipo de colhedora de cana-de-açúcar.

A sequência de montagem da máquina seguiu as etapas apresentadas nas Figuras de 10 a 18.



Figura 10. Acoplamento da máquina ao microtrator para a fabricação do chassi.



Figura 11. Montagem do chassi, posicionamento das rodas e caixa de transmissão do sistema de corte.



Figura 12. Posicionamento da caixa de transmissão do sistema de transporte e do eixo das correntes transportadoras.



Figura 13. Montagem do sistema de corte.

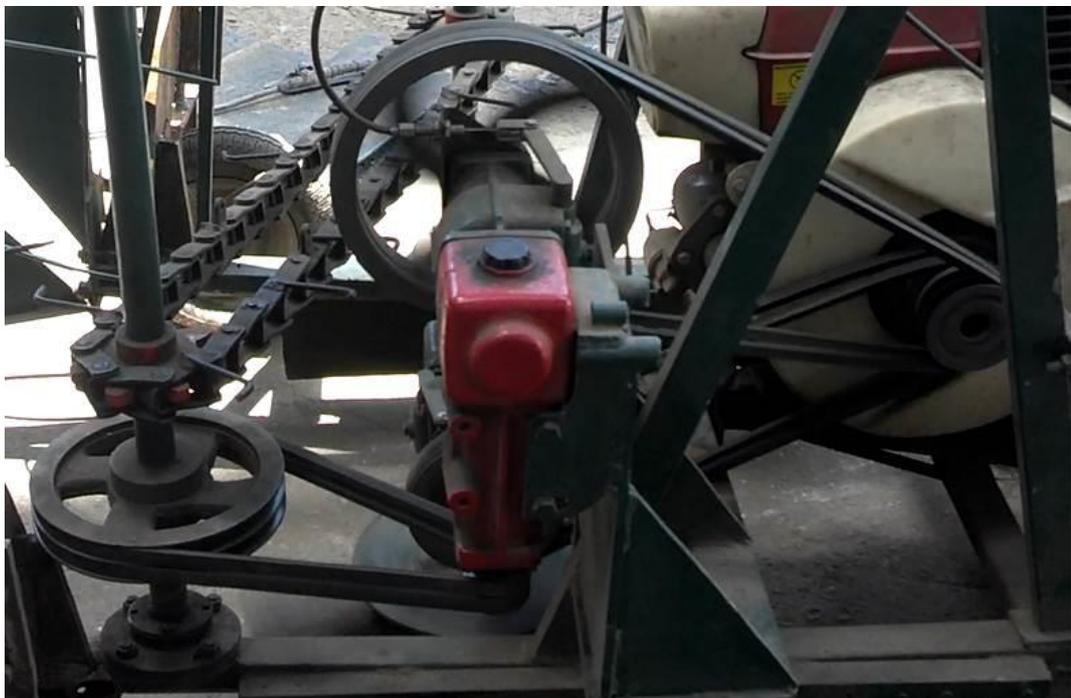


Figura 14. Montagem do sistema de transmissão com polias e correias.



Figura 15. Montagem das engrenagens e correntes transportadoras.



Figura 16. Montagem das ponteiras guias.



Figura 17. Vista lateral da máquina na fase final de montagem.



Figura 18. Vista frontal da máquina na fase final de montagem.

4.3 Avaliação do protótipo de colhedora de cana-de-açúcar

O primeiro teste do protótipo foi realizado no dia 12 de junho de 2013, em um canavial queimado próximo à usina São José, com terreno com topografia favorável, sem lombo e espaçamento correto entre as linhas da cultura.

Com o início dos testes, foi verificado que seu sistema de corte encontrava-se posicionado 17 cm à frente do sistema de transporte (Figura 19). Com isso, o material foi cortado antes de entrar em contato com o sistema de transporte, ocasionando o tombamento do material pra frente e não no transporte lateral como deveria acontecer (Figura 20), problema também observado por Forcellini (1989).



Figura 19. Posicionamento do sistema de corte.



Figura 20. Tombamento da cana pra frente e não no transporte lateral.

A correta sequência do fluxo para o corte da cana-de-açúcar deve ser contato com o sistema de transporte na parte superior; contato com sistema de corte na parte de base; transporte lateral para fora do protótipo e tombamento no solo.

Outro problema encontrado 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 manobrar ineficiente, devido ao engate do trator e à carreta.

Em relação ao corte da base da cana-de-açúcar, foi verificado um bom desempenho do sistema de corte (Figura 21), onde a soqueira que crescerá para o próximo corte encontra-se sem danos, de acordo com a metodologia adaptada de Kroes (Figura 22), ou seja, sem defeitos de corte, esmagamento ou arranquio de soqueiras.



Figura 21. Corte da cana-de-açúcar.

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

Figura 22. Metodologia para a classificação dos danos às soqueiras adaptadas de KROES (1997).

Após realizar as devidas modificações mecânicas, sendo estas a redução do sistema de corte da máquina em 17 cm em relação ao sistema de transporte e alteração na estrutura do sistema de rodagem, proporcionando ao mesmo uma capacidade de giro de 180° e posicionamento da barra de contrapeso na parte traseira da máquina (Figura 23), o protótipo foi testado novamente no dia 11 de setembro de 2013.



Figura 23. Modificações na redução do sistema de corte, alteração na estrutura do sistema de rodagem, e posicionamento do lastro.

O teste foi realizado em outro canal queimado, denominado canal do Colégio, próximo à usina São José. Nesta área, o terreno encontrava-se em piores condições em relação ao primeiro teste, apresentando uma irregularidade elevada, com quebra lomba grande e espaçamento entre as linhas da cultura irregulares. Essas irregularidades do terreno induziram ao rompimento da estrutura do sistema de rodagem, onde logo no início do teste foi verificado uma torção das barras que sustentavam a roda do lado direito, pois a mesma estava trabalhando fora do nível em relação à roda do lado esquerdo do protótipo, ou seja dentro de um dos sulcos de plantio.

Com isso o teste foi impedido de ser feito e o protótipo retornou para oficina da usina São José para efetuar os reparos necessários. As estruturas do sistema de rodagem foram todas alteradas, reforçadas, respeitando as características de suporte mas passando a proporcionar um giro de 360° do mesmo (Figura 24), para a realização de um novo teste.



Figura 24. Alteração e reforço do sistema de rodagem.

Devido ao intenso corte mecanizado e à necessidade de material para a contínua moagem da usina, os canaviais próximos à usina São José foram colhidos, sendo inevitável a realização do teste em outra localidade. Um novo teste foi marcado para o dia 13 de novembro de 2013 na usina Sapucaia em um canavial queimado e com grandes irregularidades, devido à usina encontrar-se inoperante desde 2009.

Nesta nova tentativa de testar o protótipo, onde o mesmo estava dependente de um caminhão com levante hidráulico para efetuar o transporte, o

protótipo chegou à área de teste com graves problemas estruturais no chassi, provavelmente devido ao embarque e transporte mal feito na usina São José, onde o mesmo se encontrava.

Após a constatação de que a estrutura do chassi estava comprometida, foi realizado, na própria área de teste, um ajuste na regulagem da altura de corte do protótipo, com intuito de levantar a frente do mesmo, pois a lâmina de corte se encontrava em contato com o solo. Um ajuste mecânico foi realizado para regular a altura do corte com o objetivo de minimizar o problema e realizar novo teste.

Porém, não foi possível a realização de novo teste com o ajuste mecânico. Os problemas estruturais eram grandes e na área de teste não havia suporte para a realização dos reparos mecânicos necessários, como corte e solda de ferragens. Assim, o protótipo voltou para as dependências da Usina Sapucaia para novos reparos.

Após os reparos necessários, o protótipo encontrava-se em perfeitas condições de uso, mas devido a problemas climáticos, como intensa precipitação, as operações de colheita mecanizada foram suspensas, não permitindo mais operações agrícolas em canaviais no ano de 2013.

Desta forma, espera-se a disponibilidade de área para corte com boas condições de relevo e clima visando determinar o rendimento do protótipo em campo em condições reais da cultura, visando determinar seu desempenho operacional, analisando a capacidade efetiva bruta, capacidade de campo efetiva, eficiência de campo, eficiência de manipulação e perdas totais.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

A análise de tensões do sistema de corte do protótipo da colhedora de cana-de-açúcar foi realizada utilizando-se o programa ANSYS 10. O modelo foi verificado comparando-se os resultados obtidos pelo programa ANSYS com os obtidos por soluções analíticas para um problema mais simples. Com base nos resultados encontrados, pode-se concluir que:

- o modelo desenvolvido usando o programa ANSYS apresentou resultados próximos aos das soluções analíticas, viabilizando a utilização do programa ANSYS para este tipo de análise realizada;
- a tensão máxima encontrada na faca de corte foi de 133 MPa e ocorreu na extremidade do fio de corte da faca, no ponto do início do corte;
- a utilização do programa ANSYS tem grande importância na resolução de problemas de grande complexidade, quando comparada com a limitação das soluções analíticas.

Em relação ao projeto, construção e avaliação do protótipo, pode-se concluir que:

- ao final dessa parte do trabalho, pode-se realizar uma análise do atendimento, por parte do protótipo, dos requisitos de projeto inicialmente proposto e verificar se este cumpre com o objetivo para o qual foi construído. Os requisitos de projeto que ainda não foram totalmente atendidos determinarão futuras alterações no protótipo com vista a melhorá-las;

- 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;
- constatou-se também, no decorrer do trabalho, um enorme interesse de agricultores e indústrias ligadas à área, pelo protótipo e suas características, confirmando assim, a grande necessidade desse equipamento para agricultura;
- assim, para um primeiro protótipo, obteve-se uma máquina próxima do ponto ideal de funcionamento, apresentando boas perspectivas para obtenção de uma versão final da máquina que possa vir a ser utilizada como cabeça de série, para a produção comercial;
- com este princípio, recomenda-se que o trabalho do referido protótipo tenha continuidade atendendo as recomendações de melhorias.

6. RECOMENDAÇÕES

Para se obter um resultado satisfatório, onde o protótipo atenderá todas as exigências e o mesmo cumprir os trabalhos com sucesso, é de grande importância que as sugestões de melhoria sejam realizadas, dentre elas:

- Redimensionamento das partes estruturais do chassi;
- Utilização de rodas maiores com eixos reforçados;
- Aumento dos dentes do sistema de transportes;
- Redimensionamento do sistema de corte, regulagem de altura independente dos sistemas de rodagem;
- Posicionamento de placas de acrílico para proteção dos operadores;
- Modificação das alavancas de acionamento das caixas de transmissão, tornando-as independentes.

6.1 Resultados esperados com a realização das modificações

Os resultados a serem obtidos no presente projeto buscarão contribuir, em médio prazo, para a redução de custos de produção da cana-de-açúcar. A utilização da máquina desenvolvida visa também incentivar, em médio prazo, a produção de cana-de-açúcar no Estado do Rio de Janeiro, mais especificamente, na região Norte Fluminense, com o objetivo de aumentar a produtividade, uma vez que a máquina se tornará acessível economicamente ao produtor, em especial ao pequeno e médio produtor, além de proporcionar uma economia na

produção e capaz de operar em áreas onde a topografia inviabiliza a utilização de máquinas convencionais de colheita mecânica.

O projeto também buscará minimizar, em longo prazo, os problemas sociais criados pelo desemprego através do investimento em novas áreas de plantio, e conseqüentemente no aumento da mão de obra utilizada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, D., MORAES, L.A., NASCIMENTO, E.N., OLIVEIRA, R.A. (2009) Impacto social da mecanização da colheita da cana de açúcar. Revista Brasileira de Medicina do Trabalho. São Paulo. Vols. 4, 5 e 6. Número Especial.
- ALMEIDA, B.R., RIPOLLI T.C.C., NEVES, E.M. (2009) Avaliação das perdas de cana-de-açúcar na colheita mecanizada em diferentes condições de sistematização de terreno. Disponível em: <http://www.usp.br/siicusp/Resumos/17Siicusp/resumos/2773.pdf>. Acesso em: março. 2013.
- ASAE. (1990) Agricultural machinery management data. ASAE Standard No. D497. St. Joseph, MI: ASAE. 37th. Edition. p. 285-291.
- BENEDINI M.S. & CONDE A. J. (2008) Espaçamento ideal de plantio para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar. Revista Coplana, 26-28.
- BERGE, O. I. (1951) Design and performance characteristics of the flywheel-type forage-harvester cutterhead. Agricultural Engineering, 32 (2), 85-91.

- BRAUNBECK, O.A., OLIVEIRA, J.T.A. (2006) Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, 26 (1), 300-308.
- CONAB (2013) Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, segundo levantamento – Brasília – agosto (2013).
- DELGADO, A. A. (1985) Os efeitos da queima dos canaviais. *STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos*, 3 (6), 42-55.
- EDAN, Y., HAGHIGHI, K., STROSHINE, R., CARDENAS-WEBER, M. (1992) Robot gripper analysis: finite element modeling and optimization. *Applied Engineering in Agriculture*, 8 (4), 563-570.
- FERNANDES, R. A. T., MILAN, M., PECHE FILHO, A. (2000) Gerenciamento da qualidade em operações mecanizadas de um sistema de produção de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*. Jaboticabal, 20 (3), 215-220.
- FERNANDEZ, R.N., ABDALLAH, P.R., MENEZES, G (2010). Custo das doenças respiratórias associadas à poluição atmosférica: Um estudo de caso para a cidade do Rio Grande – RS. Disponível em: http://ich.ufpel.edu.br/economia/professores/carraro/artigo_rodrigo.pdf
Acessado em: 25 de outubro 2013.
- FORCELLINI, F. A. (1989) *Desenvolvimento do protótipo de colhedora de forragens acoplável a tratores de rabiças*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, 119p.
- GARCIA, R. F. (1998) *Otimização de componentes de uma colhedora de forragens*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa.

- GARCIA, R.F., QUEIROZ, D. M., DIAS, G. P. (1998) Análise de tensões na face de corte de uma colhedora de forragem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2(2), 219-223.
- GUPTA, C. P., LWIN, L., KIATIWAT, T. (1996) Development of a self-propelled single-axle sugarcane harvester. *Applied Engineering in Agriculture*, 12 (4), 427-434.
- HAGHIGHI, K., SMITH, M. G., KRUTZ, G. W. (1990) On board testing and shape optimization of an engine mount bracket. *Applied Engineering in Agriculture*, 6(4), 382-389,.
- KROES, S. The cutting of sugarcane. 1997. 356 f. (Tese de Doutorado). University of Southern Queensland, Toowoomba.
- LAMEGO, A. R. *O homem e o brejo*. 2.ed. Rio de Janeiro: Lidador, 1974.
- LANGOWSKI E. (2007) Queima da cana – Uma prática usada e abusada – Cianorte. Disponível em: <http://homologa.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/saibaMais/artigos/impactosAmbientais/efeitosDaQueimaDeCana.pdf>, acesso: em 03 de maio 2011.
- MAGALHÃES, P. S. G., BRAUNBECK, O. A. (2007) Colheita da cana-de-açúcar com o auxílio mecânico. Disponível em: http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/artigos/Producao/Auxilio_Mecanico_Colheita_Cana.pdf >. Acesso em 02 mai. 2011.
- MANHÃES, C. M. C., GARCIA, R. F., CORREA JUNIOR, D., FRANCELINO, F. M. A., VASCONCELOS JUNIOR, J. F. S., FRANCELINO, H. O. (2013) Perdas quantitativas e danos às soqueiras na colheita de cana-de-açúcar no Norte Fluminense. *Vértices*, 15, 63-74.
- MAPA (2012) Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Projeções do agronegócio 2009/2010 a 2019/2020. Disponível em:

<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-açúcar>. acesso: em 03 de fevereiro 2014.

- MELLO, R. C. (2005) Influência do formato e velocidade da lâmina nas forças de corte para cana-de-açúcar. *Acta Scientiarum Agronomy*, 27(4), 661-665.
- MELLO, R. C., HARRIS, H. (2003) Desempenho de cortadores de base para colhedoras de cana-de-açúcar com lâminas serrilhadas e inclinadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 7(2), 355-358.
- MOREIRA, F.L. (2006) Análise da viabilidade econômica da mecanização da colheita de cana-de-açúcar na região centro sul do Brasil. 2006 77p. Monografia (Engenharia de produção) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
- MONTEIRO, A. C. G. (2011) *Avaliação dos impactos ambientais e socioeconômicos da queima da cana-de-açúcar no município de Campos dos Goytacazes – RJ*. Dissertação De Mestrado - Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
- NASH, W. A. (1972) Theory and problem of strength of materials. Segunda Edição. New York, EUA: Schaum's Outline Series. Editora McGraw Hill, 396p.
- OSCAR, J. (1985) *Escravidão & engenhos*. Rio de Janeiro: Achiamé.
- PARANHOS P. (2006) O Açúcar no Norte Fluminense. *Revista Histórica on line do arquivo publico do Estado de São Paulo*. Disponível em: <http://www.historica.arquivoestado.sp.gov.br/materias/anteriores/edicao08/materia02/>. Acesso em 20 de outubro 2013.
- PINTO, J. R. P. (1995) O ciclo do açúcar em Campos. Campos dos Goytacazes: Edição do Autor.

- QUEIROZ, D. M., SADEGHI, F., HAGHIGHI, K., GIBSON, H. G. (1994a) Finite element analysis and optimizations of a thresher design. ASAE Paper No. 941541. Atlanta, GA.
- QUEIROZ, D. M., HAGHIGHI, K., GIBSON, H. G. (1994b) Finite element analysis and optimizations of tillage disks. ASAE Paper No. 943540. Atlanta, GA.
- RIBEIRO R. R. (2010) Queimadas em Campos, RJ: Usinas ficam proibidas de fazer uso do fogo na monocultura da cana-de-açúcar. Disponível em: <http://www.ecodebate.com.br/2010/03/18/queimadas-em-campos-rj-usinas-ficam-proibidas-de-fazer-uso-do-fogo-na-monocultura-da-cana-de-acucar/> > Acesso em 22 dez. 2013.
- RIPOLI, T. C. C., RIPOLLI, M. L. C. (2005) Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente. 2. ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 302p.
- RIPOLI, T. C., NERY, M. S., De LEÓN, M. J., PIEDADE, S. M. S. (1999) Desempenho operacional de uma colhedora em cana crua em função da velocidade de avanço. Engenharia Agrícola. Jaboticabal, v.19, n.2, p.199-207.
- ROSA E. J., JOSÉ J. V., SALVESTRO A. C., GAVA R. (2009) Perdas visíveis de cana-de-açúcar em colheita mecanizada. V EPCC Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar.
- Salvi, J.V., OLIVEIRA, M.P.; FIORAVENTE FILHO, S.; R.; SANTOS, J.A. (2010) Análise do desempenho operacional e econômico da colheita mecanizada em um sistema de produção de cana-de-açúcar. In 48 congresso da sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural Campo Grande.
- SHIGLEY, J. E., MISCHKE, C. R. (1989) Mechanical engineering design. New York, NY: McGraw-Hill, 779p.

- SMIDERLE, D. A. V. O (2009) *Multiforme Desafio do Setor Sucroalcooleiro De Campos Dos Goytacazes (RJ)*. Tese de Doutorado Universidade Estadual do Rio de Janeiro Darcy Ribeiro - Uenf.
- SMITH, M. G., HAGHIGHI, K., KRUTZ, G. W., BENNETT, L., BUCHANAN, J. (1989) Finite element modeling and design of a diesel engine chassis mount. *Applied Engineering in Agriculture*, 5(4), 527-531.
- Solano C.S. (2011) *Avaliação técnica e econômica dos sistemas de colheita da cana-de-açúcar no município de Campos dos Goytacazes*. Tese (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 109p.
- VEIGA FILHO, A.A. (2006) Comentários sobre aspectos técnicos e políticos das queimadas de cana. Disponível em: <http://www.infobibos.com/artigos/queimadas_cana/index.htm>. Acesso em: 22/07/2013
- ZHU, J., HAGHIGHI, K., KRUTZ, G. W., SMITH, M. G. (1989) Harmonic and modal analysis of a diesel engine chassis mount bracket - a finite element approach. *Applied Engineering in Agriculture*, 5(4), 467-474.