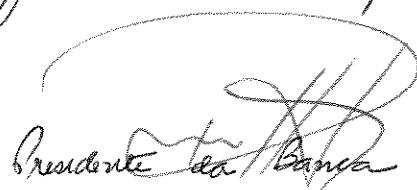


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

Parecer

Este exemplar corresponde a redação final da dissertação de Mestrado defendida por Natasha Biagi Pagnano e aprovada pela Comissão Julgadora em 20 de agosto de 1997. Campinas, 20 de janeiro de 1998.


Presidente da Banca

DESPALHADOR INERCIAL DE FACAS OSCILANTES PARA
CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum spp*)

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de Concentração: Máquinas Agrícolas

Autora: Natasha Biagi Pagnano

Orientador: Prof. Dr. Paulo S. G. Magalhães

Campinas, Agosto de 1997.

UNIDADE	78C
N.º ORÇAMENTO	
T.º	Unicamp
P148d	
V.º	
TOM.º DE	33 531
PRGO.	355/98
C	☐
D	☐
X	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	17/04/98
N.º CPD	

CM-00109415-5

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

P148d

Pagnano, Natasha Biagi

Despalhador inercial de facas oscilantes para cana-de-açúcar. / Natasha Biagi Pagnano.--Campinas, SP: [s.n.], 1997.

Orientador: Paulo S. G. Magalhães

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Cana-de-açúcar - Limpeza. 2. Colheita 3. Lagrange, Equações de. 4. Máquinas agrícolas. I. Magalhães, Paulo S. G. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**Título: DESPALHADOR INERCIAL DE FACAS OSCILANTES PARA
CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum ssp*)**

Autora: Natasha Biagi Pagnano

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Graziano Magalhães

Aprovado em 20 de agosto de 1997.

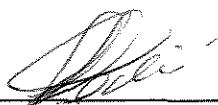
Prof. Dr. Paulo S. Graziano Magalhães

- **FEAGRI/UNICAMP**



Prof. Dr. Oscar Braunbeck

- **FEAGRI/UNICAMP**



Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

- **FEM/UNICAMP**

SUMÁRIO

I- INTRODUÇÃO	1
----------------------------	----------

II- OBJETIVOS	5
----------------------------	----------

III- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
--	----------

3.1. EFEITOS DA QUEIMADA DE CANA-DE-AÇÚCAR	6
--	---

3.1.1. <i>No solo</i>	6
-----------------------------	---

3.1.2. <i>Na cana-de-açúcar e seus derivados</i>	6
--	---

3.2. COLHEITA MECANIZADA X MANUAL	7
---	---

3.3. SISTEMA DE COLHEITA MECANIZADA DE CANA-DE-AÇÚCAR	8
---	---

3.3.1. <i>Colheita de cana-de-açúcar inteira</i>	8
--	---

3.3.2. <i>Colheita de cana-de-açúcar picada</i>	13
---	----

3.3.3 <i>Colheita de cana-de-açúcar crua x queimada.</i>	18
--	----

3.4. IMPUREZAS NA COLHEITA	22
----------------------------------	----

3.5. SISTEMAS DE LIMPEZA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	24
---	----

IV- MODELAGEM MATEMÁTICA	32
---------------------------------------	-----------

4.1- DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO.....	32
--------------------------------------	----

V - MATERIAL E MÉTODOS	47
-------------------------------------	-----------

5.1 MATERIAL	47
--------------------	----

5.1.1 - <i>Despalhador inercial de facas oscilantes</i>	49
---	----

5.2 - MÉTODOS	51
---------------------	----

5.2.1 - <i>Calibração do Anel Octogonal</i>	54
---	----

VI RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
---	-----------

6.1- RESULTADO DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	57
6.2- RESULTADO DAS EQUAÇÕES DE LAGRANGE RESOLVIDAS PELO PROGRAMA COMPUTACIONAL MATHEMATICA 2.2.3.....	66
VII CONCLUSÕES	72
VIII- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Testes comparativos entre colheita com cana queimada e crua (CAMPOS & MARCONATO, 1994).	20
Tabela 2 - Perdas visíveis durante a colheita de cana-de-açúcar picada, queimada e crua, realizada com a colhedora AMAZÓN, (FURLANI, 1985).	22
Tabela 3 - Resultado dos esforços de uma faca de 828 g sem mola com velocidade angular de 19,5 rad/s	58
Tabela 4 - Resultado dos esforços de uma faca de 828g sem mola com velocidade angular de 25,68 rad/s	59
Tabela 5 - Resultado dos esforços de uma faca de 411g com mola com 11,03 rad/s	61
Tabela 6 - Resultado dos esforços de uma faca de 411g com mola com 16,09 rad/s	62
Tabela 7 - Resultado dos esforços de uma faca de 411g com mola com 21,51 rad/s	63
Tabela 8 - Resultado dos esforços de uma faca de 411g com mola com 24,88 rad/s.	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes de limpeza da colhedora SASABY de cana-de-açúcar inteira.

(De BEER, 1986).

11

Figura 2 - Princípio de funcionamento da colhedora de cana-de-açúcar inteira

CENTURION, (SCOTT, 1986)

12

Figura 3 - Colhedora de cana-de-açúcar picada - mod. AMAZÓN (SANTAL).

16

Figura 4 - Colhedora de cana-de-açúcar picada - mod. E-16000 (BRASTOFT).

16

Figura 5- Colhedora de cana-de-açúcar picada (CAMECO).

17

Figura 6 - Esquema do despalhador inercial de facas oscilantes.

33

Figura 7 - Gráficos do comportamento da faca oscilante sem mola.

40

Figura 8- Esquema de montagem da mola no rotor

41

Figura 9 - Gráficos do comportamento da faca oscilante com molas.

44

Figura 10 - Situação de contato entre as facas e a cana-de-açúcar

45

Figura 11 - Situação em que a faca esta fora da região de contato com a cana-de- açúcar.

46

Figura 12 -Comportamento geral da faca oscilante fora região de contato do colmo.

46

Figura 13- Anel Octogonal

47

Figura 14- Unidade Hidrostática

48

Figura 15 - Detalhes construtivos do rotor de facas oscilantes.

50

Figura 16 - Montagem do sistema de facas oscilantes.

51

Figura 17 - Faca Oscilante de 828 g

52

Figura 18 - Faca Oscilante de 411 g	54
Figura 19 - Detalhe da faca oscilante em contato com a cana-de-açúcar.	54
Figura 20 - Sistema para medição das reações da faca sobre a cana-de-açúcar	55
Figura 21 - Acoplamento do Acionador Hidráulico ao Despilhador Inercial	56
Figura 22 - Resultados do ensaio de laboratório de forças atuantes na cana-de-açúcar.	57
Figura 23 - Simulação da posição de uma faca, mostrando o contato e a retração até o	
último contato com a cana-de-açúcar	68
Figura 24 - Seqüência de impactos faca de 828 g com velocidade de 25,68 rad/s	69
Figura 25 - Seqüência de impactos faca de 411 g com velocidade de 16,09 rad/s	69
Figura 26 - Força vertical calculada por Lagrange para faca de 411 g com velocidade de	
16,09 rad/s	70
Figura 27 - Força vertical calculada por Lagrange para faca de 828 g com velocidade de	
25,68 rad/s	71

RESUMO

A cana-de-açúcar ocupa um papel importante na economia brasileira, mas grande parte de sua colheita ainda é realizada manualmente. As colhedoras existentes no mercado são próprias para cana-de-açúcar picada, o que contradiz o método tradicional, até então empregado no país, que é o da cana inteira, obrigando a indústria a investir uma considerável soma para substituir o sistema. As vantagens do método de colheita de cana inteira e crua são muitas, mas para viabilizar a colheita por este método, uma das barreiras que deve ser vencida é a remoção da palha mecanicamente. Este trabalho, portanto, tem como objetivo conceber, equacionar e dimensionar um equipamento que realize esta tarefa. Dentre os possíveis métodos para retirar a palha optou-se pelo despalhador inercial de facas oscilantes e para o equacionamento do mecanismo utilizou-se o método de Lagrange. Foram feitos diversos ensaios com o despalhador instrumentado para possibilitar a aquisição dos esforços provocados pelas facas, tais como força vertical e força horizontal. A comparação dos resultados obtidos tanto pelos ensaios experimentais como pela resolução das equações de Lagrange restringe o peso da faca para que a cana não seja submetida a grandes esforços. Com os parâmetros utilizados, uma faca de 828g inviabiliza o projeto, pois a pressão provocada é maior que aquela suportada pela cana-de-açúcar (4,90 MPa), assim fez-se necessário a concepção de uma faca mais leve. A nova faca aparentemente não danifica a estrutura da cana e provoca uma raspagem na cana que facilita o despalhe por atrito. As forças verticais obtidas teoricamente, aumentam conforme aumenta a rotação do rotor. Para uma velocidade de aproximadamente 11,03

rad/s a força vertical teórica encontrada foi de 438,1 N, enquanto a experimental média foi de 380,7 N, sendo o valor teórico maior em 15,08%. Sob uma velocidade de rotação de 16,09 rad/s a força vertical teórica foi de 613,9 N contra 651,3 N experimental média, sendo a teórica 5,74% menor. Os ensaios realizados com velocidade de rotação de 21,51 rad/s e 24,88 rad/s mostraram uma diferença entre valores teóricos e práticos muito grande, onde percebe-se que os dados experimentais estão subestimados em 48,94% e 109,25% respectivamente, devido à taxa de aquisição utilizada na coleta dos dados (100 Hz), não sendo possível registrar todos os picos. O mesmo não ocorreu com as rotações mais baixas, uma vez que, a taxa de aquisição foi da ordem de 200Hz. Obteve-se um fator de atrito, que relaciona forças verticais com horizontais, para cada ensaio, que não foi utilizado devido às grandes diferenças encontradas. Desta forma, tendo-se em vista os resultados obtidos com rotações mais baixas, pode-se afirmar que o mecanismo atende, com a nova faca, aos esforços necessários ao despalhe.

ABSTRACT

Sugarcane holds an important position in Brazilian economy, but great part of its harvest are done manually yet. The available harvesters in the market are for chopping sugarcane, and that counteract the traditional method of sugarcane harvest still used in the country which is whole stalk, forcing the industry to invest a considerable amount to substitute the existing system of transportation and factory reception. There are many advantages to the whole stalk and green sugarcane harvest, but in order to make it feasible, one of the obstacles that must be overcome is to develop a method for leaf strip. This work had as a main objective the design of an equipment that realize this work. From the possible methods of leaf strip, the option was to use the inertial leaf strip of oscillating knives and to equation the mechanism, using the Lagrange's method. Many tests were conducted with the leaf strip mechanism instrumented in order to measure the knives reaction forces. The results obtained by the experimental tests and by the Lagrange's equations shows that the knife weight are very limited, to avoid large pressures over the sugarcane. With the used parameters the pressure caused by a 828 g knife was large than the admissible by the sugarcane stalk (4,90 MPa), thereby it was necessary to design a lighter knife. The new knife apparently do not cause damage to the cane structure and scratch the sugarcane surface facilitating the leaf strip by friction. The vertical forces obtained theoretically increase as the rotation increases, the same was verified in the experimental tests. For a rotation of 11,03 rad/s the theoretical vertical force calculated was 438,1 N, and the experimental result obtained was 380,7 N (15,08% smaller). At

16,09 rad/s the theoretical vertical force was 613,9 N and the experimental 651,3 N (5,74% larger). The tests realized with 21,51 rad/s and 24,88 rad/s show larger errors between theoretical and experimental values, where the experimental datas were undervalue in 48,94% and 109,25%, respectively, probably due the acquisition rate used (100 Hz). The same does not occur at lower rotations, where the acquisition rate was 200 Hz. A friction factor that relates vertical with horizontal force, was determine for each test. The results obtained prove that, at rotations of 200 rpm using knives with 400 g or less the sugarcane leaves can be removed using oscillating knives.

AGRADECIMENTOS

À Deus por toda saúde e bênção que nos dá diariamente;

Aos meus pais, Rubens e Neide, pelo amor, exemplo, suporte e incentivo à minha formação;

Aos meus irmãos, Rubinho, Giovanna e meu cunhado Marcelo pelo carinho, amizade e estímulo;

Aos meus avós Edith (*in memorian*), Edgard (*in memorian*), Alcinda e Domingos que muito contribuíram em meu crescimento como ser humano;

Ao Prof. Dr. João Domingos Biagi, por suas sugestões, conselhos e apoio à minha formação;

À Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (FEAGRI), por me receber e acolher para que eu pudesse aumentar meus conhecimentos técnicos científicos e sociais;

Aos Professores da FEAGRI, principalmente aos professores Paulo Magalhães e Oscar Braunbeck que muito me ajudaram pelo seus conhecimentos e dedicação;

Aos colegas e amigos, alunos e funcionários da FEAGRI, principalmente, Fábio Serpa, Paola, Elaine, Adelaide, Américo, Fábio Tanaka, Edgar, José Maria, Luis, Fubá, Chicão, Claudinho, Denis e Alfredo, pela ajuda e apoio sempre demonstrados;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela liberação de verba para construção do mecanismo para ensaio;

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro durante todo o andamento do trabalho.

Enfim à todos que direta ou indiretamente contribuíram nas diversas fases do trabalho.

I- INTRODUÇÃO

O Estado de São Paulo é responsável por 62% da cana-de-açúcar, 64% do álcool, e 56% do açúcar produzido no Brasil. A produção paulista de álcool foi de 8 bilhões de litros, na safra 1995/96, sendo 60% consumido no próprio estado e 40% exportado para outros Estados da Federação (VEIGA FILHO *et.al.*, 1996).

Recentemente, a colheita de cana-de-açúcar crua tem se expandido no Estado de São Paulo devido à legislação vigente. Atualmente, com a valorização do bagaço de cana-de-açúcar, através da política de compra do excedente de energia elétrica produzida pelas usinas de açúcar e álcool, e sua utilização para outros fins mais nobres (CORTEZ *et. al.*, 1992), as usinas estão atentas para a possibilidade de utilizar palha de cana-de-açúcar para complementar o bagaço nas caldeiras.

Segundo RIPOLI (1996), o Estado de São Paulo possui hoje 2.200.000 ha de cana-de-açúcar plantada, dos quais 55% (1.210.000 ha) são mecanizáveis. Considerando-se que 50% do palhicho (folha verde, seca e ponteiro), produzido nesta área mecanizada, fosse usado para produção de energia, resultaria, um total de aproximadamente 25% do que o Brasil importou de petróleo em 1994, em termos de BEP (equivalente barril de petróleo).

Uma frota de dez colhedoras substitui 1000 homens. Como elimina etapas, dispensa transporte e acelera o processo, além de oferecer vantagens ambientais e agrícolas, como o aproveitamento da palhada e a eliminação do fogo, o corte mecânico custa quase R\$ 1,5 a menos que o manual por tonelada, R\$ 4,47 contra R\$ 5,88

respectivamente. Uma diferença nada desprezível num negócio onde são milhões de toneladas por ano (CERRI, 1995).

Soma-se a isto a pressão de caráter político-social que o setor vem sofrendo por parte da sociedade. A exigência que a colheita seja realizada sem que haja agressão ao meio ambiente, tem crescido por parte dos ambientalistas e passa a encontrar respaldo do setor político (prefeitos, deputados e procuradores), a medida que a mão-de-obra disponível no campo que deseja continuar a exercer a profissão de cortador de cana-de-açúcar tem diminuído, e a demanda por investimento de capital de outros setores tecnológicos exige um melhor controle da qualidade do ar. Por exemplo, como cita AMORIM (1996), no jornal “O Estado de São Paulo”, a proibição das queimadas, no caso de Ribeirão Preto, sede do maior pólo sucroalcooleiro do mundo, não deve prejudicar a mão-de-obra, uma vez que no município, esta é composta por apenas 300 cortadores de cana-de-açúcar, que representa 0,01% da população economicamente ativa. Muitos municípios canavieiros do Estado de São Paulo já criaram leis municipais que proíbem a queimada dos canaviais, pois a queimada, por causa da fuligem, afugenta investimentos de indústrias que geram tecnologia.

No último decreto contra as queimadas do Governador do Estado de São Paulo, Mário Covas, altera a redação do 5º Artigo do Decreto nº 41.719 de 16 de abril de 1997, que dispõe sobre o uso, conservação e preservação do solo agrícola. Na nova redação, as queimadas deverão ser evitadas e só serão toleradas quando previamente autorizadas pela Secretária da Agricultura e Abastecimento, a redução das queimadas será feita de maneira gradativa de acordo com possibilidade de mecanização do terreno e da área plantada no caso de fornecedores. Ficam também estipuladas distâncias onde não poderá haver

queimadas, como perto de linhas de distribuição de energia elétrica, áreas de preservação, aeroportos, rodovias. Na hipótese da queima em áreas não autorizadas serão aplicadas penalidades em conformidade com o Decreto acima citado.

Como vantagens ecológicas, a colheita de cana-de-açúcar crua apresenta redução da emissão de CO₂ para a atmosfera, eliminação de fumaça e fuligem que prejudicam a saúde do homem, e da interrupção no fornecimento de energia elétrica causadas por queimadas próximas às linhas de transmissão.

Dentre os caminhos que justificam a não queima de canaviais, do ponto de vista agrônomo, pode-se citar as seguintes vantagens quando o palhço decorrente da colheita em cana-de-açúcar crua permanece no terreno: diminuição ou até eliminação do uso de herbicidas; aumento e manutenção do grau de umidade do solo; aumento da eficácia do controle de erosão, aumento da quantidade de matéria orgânica no solo; redução da população de nematóides nocivos e não destruição dos inimigos naturais da broca (RIPOLI & VILLANOVA, 1992).

MAGALHÃES (1993), citando Ripoli, aponta que um fator polêmico é o método que deve ser utilizado para a colheita na cana-de-açúcar verde, inteira ou picada. A tecnologia que o Brasil importou nos últimos anos, e que agora vem sendo adaptado às nossas condições de campo é a de colheita de cana-de-açúcar picada. Isto contradiz o método tradicional até então empregado no país que é o da cana-de-açúcar inteira, obrigando a indústria a investir uma soma elevada na substituição do sistema, tanto a nível de transporte como na recepção da matéria-prima na usina, uma vez que atualmente 95% das usinas do Brasil estão equipadas para operar com cana-de-açúcar inteira.

Hoje, são poucas as opções de colheita mecanizada de cana-de-açúcar inteira, apesar das claras vantagens deste tipo de colheita. A cana-de-açúcar inteira permite maior tempo de estocagem, menor deterioração e se no carregamento mecânico for utilizado rastelos rotativos, a porcentagem de matéria estranha presente é menor que na cana-de-açúcar picada. Apresenta ainda uma importante vantagem sobre a colheita de cana-de-açúcar picada, que é a total independência entre o sistema de colheita e transporte, permitindo uma eficiência maior de ambos sistemas, e como consequência uma redução de custo operacional e de capital (menor número de caminhões utilizados na colheita).

Entretanto, a colheita mecanizada de cana-de-açúcar inteira tem problemas operacionais que dificultam sua utilização em cana-de-açúcar não queimada. A retirada da palha é um destes problemas, pois esta é extremamente abrasiva e, no carregamento, não permite o deslizamento de uma cana-de-açúcar sobre a outra diminuindo sua densidade e assim diminuindo a quantidade de cana-de-açúcar carregada e portanto encarecendo o transporte, uma vez que o volume de cana torna-se maior. Além disso a presença de folhas e ponteiros na moenda apresenta vários problemas: as ponteiros têm baixo grau de sacarose e seu suco de baixa pureza e alto grau de não açúcares afetam o processo; as folhas absorvem a sacarose do suco, aumentam a quantidade de fibra e ajudam a promover o desgaste dos rolos da moenda.

Desta forma, assim como na colheita de cana-de-açúcar picada, também na colheita de cana inteira, as folhas e ponteiros devem ser separados do colmo para viabilizar o método.

II- OBJETIVOS

Face ao exposto observamos que:

Existe uma necessidade econômica e social de se eliminar em um curto espaço de tempo o método de queima de cana-de-açúcar viabilizando sua colheita mecânica;

A única tecnologia disponível atualmente para colheita de cana-de-açúcar crua, e portanto, a que está sendo adotada pelas usinas e destilarias, é a da cana-de-açúcar picada, que apresenta desvantagens agrônomicas e econômicas em relação à cana-de-açúcar inteira.

Portanto, esse trabalho teve como objetivos:

1. Conceber, um sistema mecânico para remoção da palha dos colmos inteiros da cana-de-açúcar, através de sistema de fricção por facas oscilantes.
2. Realizar um estudo analítico do sistema proposto visando o seu dimensionamento.
3. Construir o sistema proposto em escala 1:1, para verificação e validação do princípio de funcionamento e determinação dos esforços gerados.

III- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Efeitos da queimada de cana-de-açúcar

3.1.1. No solo

FOGLIATA, *et. al.* (1968), realizaram testes para avaliar o efeito da queimada da cana-de-açúcar no solo. O resultados destes experimentos, no primeiro horizonte de um solo arenoso, mostraram que a temperatura do solo a uma profundidade de 5,0 cm, variou muito pouco durante a queimada. Os valores da temperatura não foram suficientemente altos para afetar o balanço biológico da microflora do solo, por esta razão, a atividade da população bacteriana continuou normalmente. A umidade, o pH, e os nitratos (p.p.m.) também não foram afetados. A matéria orgânica, a quantidade total de nitrogênio e a porosidade sofreram pequenas diminuições onde a palha foi queimada, comparando-se com áreas onde adicionou-se palha ao solo. Com respeito à estabilidade estrutural do solo, houve uma deterioração em solos onde a queimada foi realizada, mas estes valores não foram tão altos como os autores esperavam.

3.1.2. Na cana-de-açúcar e seus derivados

Ensaio sobre a contaminação da cana-de-açúcar e derivados por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) foram realizados por SERRA, *et. al.* (1995). Amostras de cana-de-açúcar e produtos derivados foram analisados quanto a presença de HPAs. Os HPAs, determinados por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), foram o benzo(a)pireno (BaP), benzo(a)antraceno (BaA), fenantreno (Fe) e naftaleno (Na), sendo os dois primeiros comprovadamente cancerígenos. Na cana-de-açúcar crua não foram detectados HPAs, contudo nas amostras de cana-de-açúcar queimada, açúcares comerciais

(com exceção do refinado) e aguardentes apresentaram contaminação. Nos açúcares, o teor de HPAs totais variou entre 1,30 e 21,60 $\mu\text{g/kg}$ e o de BaP mais BaA variou entre 0,25 a 0,90 $\mu\text{g/kg}$, sendo que o limite máximo referencial de BaP usado para alimentos é de 1,00 $\mu\text{g/kg}$. Segundo os autores, o processo de refino parece ter um efeito positivo na eliminação desses compostos. Os resultados sugerem que a queima dos canaviais, normalmente realizada para eliminar a palha antes da colheita, pode ser um agente potencial de formação de HPAs.

3.2. Colheita mecanizada x manual

FERNANDES e IRVINE (1986), apresentam alguns resultados de um estudo comparativo entre a colhedora DEDINI-TOFT de cana-de-açúcar picada e a colheita manual com carregamento mecanizado, com relação à produtividade e à qualidade da matéria-prima colhida. Os autores realizaram 7 ensaios, totalizando 33 ha, em blocos ao acaso com dois tratamentos e 10 a 14 repetições cada. A produção de cana-de-açúcar foi determinada pela pesagem de pelo menos um caminhão carregado por parcela na balança da usina. A qualidade de matéria-prima foi determinada por amostragem direta nos veículos de transporte com a sonda horizontal e análise pelo método da prensa nos laboratórios das usinas. O teor de impurezas na carga foi determinado em três ensaios pela limpeza manual dos toletes e colmos. O potencial de produtividade pré-colheita foi obtido antes da queima por amostragem de pequenas parcelas nas áreas em estudo. Essas medidas indicaram que a produção de açúcar foi menor do que o potencial do talhão tanto no sistema semi-mecanizado (-17%) como no mecanizado (-21%). Estas perdas foram devidas às deficiências da colheita, perdas no transporte, deterioração pós-colheita e inclusão de

impurezas na carga. Os resultados de dois ensaios conduzidos em canavial tombado e clima úmido mostraram que a colheita mecanizada foi ineficiente para realizar o desponte aceitável dos colmos, incluindo o cartucho de folhas e as folhas úmidas, que aumentaram o peso do material colhido, mas reduziram sua qualidade. Quando os ensaios foram conduzidos em clima seco, canas eretas e bem queimadas, não ocorreram diferenças significativas entre os dois sistemas de colheita. Entretanto, a qualidade da cana picada entregue pelas colhedoras foi significativamente mais baixa, quando os dados dos sete ensaios foram submetidos à análise conjunta da variância. Em termos de toneladas de açúcar por hectare, a perda no sistema mecanizado foi significativa quando da análise conjunta. A perda média de 360 kg/ha representa um custo que deve ser adicionado à colheita mecanizada. Sob boas condições de colheita, o teor de impurezas na cana picada foi 2,5 vezes maior do que nos colmos inteiros contribuindo com mais de um fator a ser considerado na análise de custos dos sistemas.

3.3. Sistema de colheita mecanizada de cana-de-açúcar

3.3.1. Colheita de cana-de-açúcar inteira

Muito se tem pesquisado sobre o desempenho das colhedoras existentes. De BEER (1986), fazendo um histórico da evolução das colhedoras de cana-de-açúcar crua inteira, estima que o primeiro passo para uma cortadora de cana-de-açúcar verde foi a BSPA descrita por Hudson em 1974. Este projeto era uma máquina montada em um trator que realizava o desponte e corte basal, para posterior carregamento manual. O autor cita que mais tarde, foi introduzida pela McConnel, em Barbados, quando a mão-de-obra disponível se tornara escassa, um sistema de colheita baseado em múltiplas passadas. Primeiro um

carregador, depois uma colhedora (a BSPA incorporada dentro do que se chamou o Estágio 1 da máquina McConnel), e por último um pacote limpador-picador, o Estágio 2 da máquina. A cana-de-açúcar seria cortada pelo Estágio 1 e então colhida no Estágio 2, primeiro os topos, para limpeza e desponte. Os toletes eram acumulados em um depósito antes de serem deitados no campo. Os protótipos do Estágio 2 foram testados e desenvolvidos no Caribe e na África do Sul. Testes realizados em 1977 mostraram que a máquina era capaz de colher a uma taxa de 20 t/h e com um conteúdo de palha menor que 7%. O Estágio 1, conhecido como Carib foi utilizado pelos países do Caribe e do Leste da Ásia

Outra aproximação de uma colhedora para cana-de-açúcar crua inteira descrita por De BEER (1986), foi adotada pelas companhias japonesas tal como a Bunmei, que desenvolveu um cortador pequeno cujo operador acompanha caminhando atrás. Estas máquinas são limitadas porque elas operam somente em cana-de-açúcar ereta com produção menor que 90 t/ha. Uma vez cortadas, a cana-de-açúcar era despontada, despilhada e empacotada manualmente. Em 1973, 100 destas máquinas foram levadas para Okinawa, Japão, mas em 1976 somente 10 ainda continuavam operando.

Em 1976 foi descrita, por Hanshin, uma colhedora picadora auto propelida desenvolvida em Taiwan, (De BEER, 1986), que se obtivesse sucesso, uma versão para cana-de-açúcar inteira seria desenvolvida em seguida, mas o projeto foi abandonado.

De BEER (1986), comenta que no fim da safra de 1977-1978, foram encontrados problemas na colhedora McConnel, principalmente quando o corte era feito em áreas íngremes e evidenciava a necessidade de se projetar uma nova máquina. O Estágio 2 da

McConnel foi convertido em uma cama estacionária de teste onde investigações de despalhe e desponte da cana-de-açúcar verde foram feitas. Resultados encorajadores levaram, em outubro de 1978, a construção da uma colhedora auto propelida, conhecida como SASABY. Nesta colhedora, a cana-de-açúcar cortada em sua base é conduzida por rolos levantadores e alimentada através de rolos com taliscas, passando sobre o despontador e entre os rolos puxadores, para então ser lançada em um compartimento. A velocidade periférica dos rolos com talisca é quatro vezes superior que a dos outros rolos. Isto faz com que as folhas se soltem do colmo, por fricção. O ângulo ao qual a cana-de-açúcar sai dos rolos com taliscas é tal que as ponteiros entram em contato com as lâminas do despontador onde são cortadas, em seguida, um jato de ar produzido por um ventilador centrífugo, que ajuda a forçar as ponteiros de encontro as lâminas do despontador retira as impurezas. Um segundo protótipo da SASABY de duas linhas foi construído em 1980, e depois de muitas modificações, em dezembro de 1981 esta colhedora teve um desempenho muito aproximado ao desejado para uma colhedora comercial. Nos protótipos seguintes o princípio de funcionamento não foi alterado, mas sim a forma da máquina. O ventilador mudou de centrífugo para fluxo axial, provocando menores força e pressão; a altura do cortador de base da nova máquina podia ser ajustada levantando ou abaixando a frente da máquina; o rolo com talisca inferior foi trocado por um cilindro com 20 taliscas para reduzir o impacto da cana-de-açúcar antes do despontador. A Figura 1 mostra a posição relativa dos componentes da colhedora SASABY como eram em 1981.

Os níveis de matéria estranha colhido com esta colhedora foram menores que 5%. Contudo ela apresentava problemas, a agressividade do sistema de limpeza resultou em um dano muito alto aos colmos e conseqüente perda do material colhido. Outro problema era o

baixo rendimento, 20t/h de operação, sendo que o seu principal fator limitante era o tempo necessário para descarga do material colhido, e a potência do motor, um Deutz V8 de apenas 130 kW.

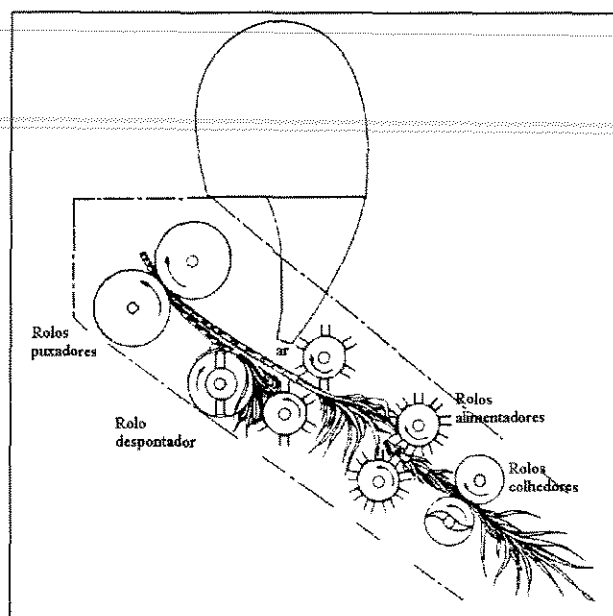


Figura 1 - Componentes de limpeza da colhedora SASABY de cana-de-açúcar inteira. (De BEER, 1986).

SCOTT (1986), descreve o desenvolvimento da colhedora para cana-de-açúcar inteira CENTURION, em Barbados. A principal parte da máquina é a seção de limpeza, que pode ser dividida em seis elementos separados: um rolo de despálhe na base da esteira, para retirar as folhas livres e a sujeira que vem pela esteira; um par de rolos que puxa a cana-de-açúcar da esteira lançando-a em um compartimento a uma velocidade de 10 m/s, separando as folhas mortas da cana-de-açúcar, aproveitando a queda livre; um pente de cerdas de borracha por onde as canas-de-açúcar passam, mas detendo algumas folhas e matéria estranha; um eixo com facas oscilantes girando a alta velocidade ejeta tanto a palha que ficou presa pelo pente como outros materiais que são separados da cana-de-açúcar; um

ventilador com jato de ar direto contra o fluxo de cana-de-açúcar, e, par de rolos com dentes afiados que prende as canas-de-açúcar possibilitando a retirada das ponteiros, a Figura 2 mostra as principais partes da colhedora.

O desempenho desta colhedora ficou abaixo das expectativas do autor, com uma capacidade de colheita de apenas 30 t/h e com a presença de 9,77% de matéria estranha. Futuras melhorias ainda deveriam ser introduzidas na colhedora antes que ela atingisse um estágio comercial.

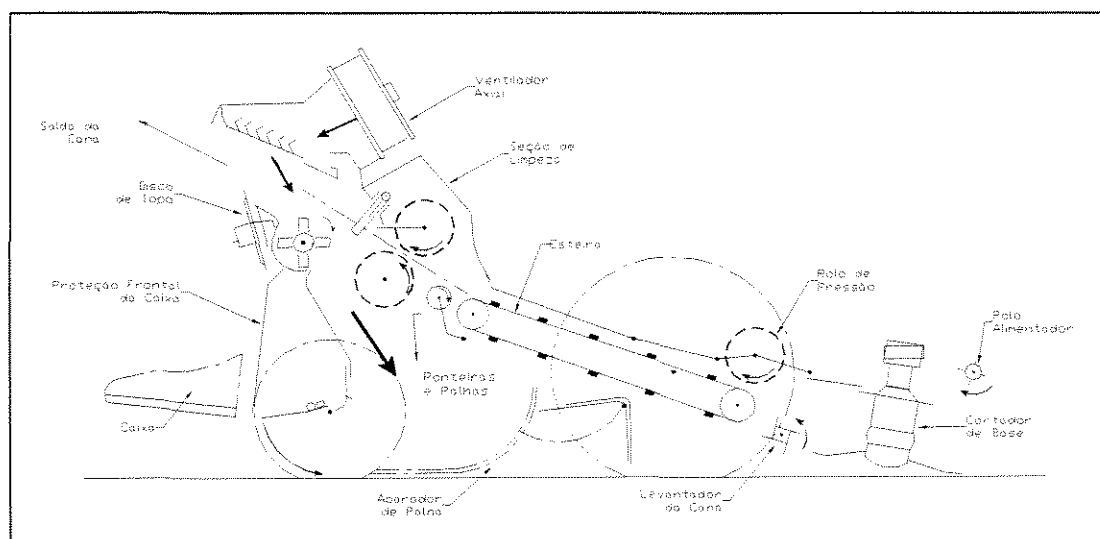


Figura 2 - Princípio de funcionamento da colhedora de cana-de-açúcar inteira CENTURION, (SCOTT, 1986)

Referências mais atuais das colhedoras SASABY e CENTURION não foram encontradas, e não se sabe se continuam em operação no Caribe.

Em Louisiana, Estados Unidos existem as colhedoras cortadoras de cana-de-açúcar crua e inteira. Discos com facas periféricas cortam a base do colmo e transportadores de correntes os conduzem para a parte posterior da máquina, depositando-os no solo no sentido transversal. Destina-se exclusivamente a cana-de-açúcar ereta, e não apresenta

nenhum sistema de remoção de palha, obrigando a queima da cana-de-açúcar nas leiras já deitadas ao solo (TANAKA, 1996).

No Brasil foram produzidas algumas cortadoras como a ARTIOLI, MCC-300 e SANTAL adaptadas apenas para colheita de cana ereta, e colhedoras para a cana-de-açúcar como por exemplo a Motocana CM-500i, a Engeagro E-7000 e E-14000 que se utiliza de um sistema de corte de base e remoção de ponteiros semelhante ao sistema de cana-de-açúcar picada desenvolvidas na Austrália e em Cuba. Um depósito na parte posterior permite acumular aproximadamente 600 kg de colmos inteiros que são descarregados ao solo no sentido do deslocamento, entretanto estes modelos não possibilitam a colheita de cana-de-açúcar crua, pois não apresentam sistema de limpeza, como citam BRAUNBECK & MAGALHÃES (1992).

3.3.2. Colheita de cana-de-açúcar picada

A maioria das colhedoras existentes de cana-de-açúcar picada são derivadas de modelos Australianos, e apresentam as seguintes características:

- são autopropelidas, com transmissão hidrostática, acionados por motores de combustão interna de 220 hp ou maiores;
- apresentam um sistema para levantar as canas deitadas transversalmente, costumeiramente denominados de “pirulitos”;
- sistema de corte basal composto por discos de aproximadamente 900 mm de diâmetro, cuja altura de corte é controlada pelo operador;
- picador de colmos, com capacidade para cortar colmos entre 220 a 350 mm;

- sistema de limpeza composto de extrator primário e secundário, para remover a matéria estranha por diferença de velocidade terminal;
- esteiras para transporte do material colhido para o veículo de transporte;
- cortador de ponteiros instalado na parte frontal superior da colhedora, eficaz apenas em cana ereta.

Além do sistema australiano de colheita, no Brasil existem também as colhedoras SANTAL ROTOR, que substituíram as esteiras transportadoras por rotores lançadores de rebolos de cana-de-açúcar e os sistemas de limpeza, que constam somente de um estágio de extratores.

UENO & IZUMI (1986) descrevem o desenvolvimento de uma pequena colhedora de cana-de-açúcar crua picada, em Okinawa, Japão, similar às combinadas australianas, utilizando sete motores hidráulicos. A característica mais distinta desta colhedora é o mecanismo para expulsão dos toletes que pode girar 360°. Esta colhedora tem diversos controles, necessitando de automação para ajudar o operador. Em particular, no controle do cortador de base que é muito importante do ponto de vista de perda de cana-de-açúcar, impurezas, produção e brotação das soqueiras. Foram feitas tentativas de efetivar o controle automático usando a resistência de deformação do solo, com um par de rodas preso próximo ao cortador de base, suportando a parte da frente da máquina, de modo que a posição da lâmina do cortador segue as mudanças do perfil da superfície do solo. A velocidade de movimento na operação foi de 1,2 km/h em média, menos de 50 % da velocidade das colhedoras de cana-de-açúcar queimada de Okinawa. O desempenho desta colhedora, em produções acima de 100 t/ha, foi comprometido com problemas

principalmente no divisor, havendo encontro das folhas com os toletes, na entrada do sistema de rolos e na câmara do ventilador primário. O teor de impurezas durante três safras foi de 14,40%, valor este aceitável se comparado com as colhedoras de cana-de-açúcar queimada usadas em Okinawa, onde o teor de impurezas era de 17,05% em 1983. No fim do mês de março, o teor de impurezas aumenta, devido ao aumento de ponteiros imaturos.

Estudos mostraram que as ponteiros podem significar mais de 70% do peso de impurezas em condições secas, enquanto que o solo significa mais de 67% em condições úmidas. A retirada das ponteiros, então, resulta em decréscimo da taxa de impurezas, pois estas possuem densidade específica muito similar aos toletes de cana-de-açúcar, dificultando a separação. Portanto, o desempenho da limpeza, depende não somente das condições do vento na câmara do ventilador, do padrão do fluxo, velocidade e volume, mas também do tempo que os toletes ficam no ar dentro da câmara e da dispersão dos toletes e das impurezas. Esta colhedora não apresentou problemas de mobilidade, mesmo quando era usada depois de chuvas.

As Figuras 3 a 5 apresentam algumas das colhedoras disponíveis no mercado nacional.



Figura 3 - Colhedora de cana-de-açúcar picada - mod. AMAZÓN (SANTAL).



Figura 4 - Colhedora de cana-de-açúcar picada - mod. E-16000 (BRASTOFT).

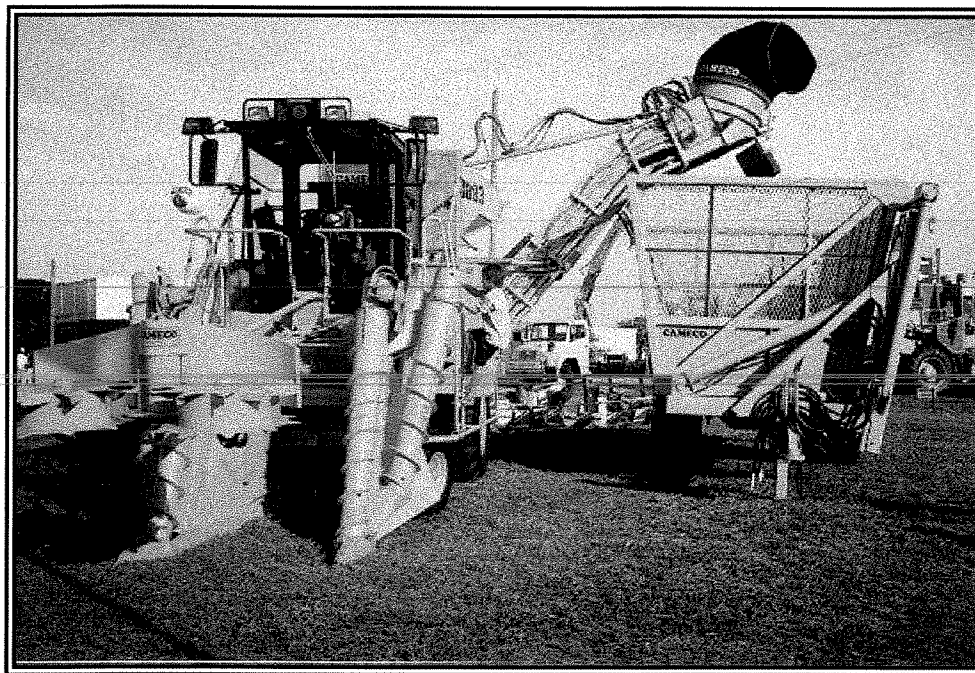


Figura 5- Colhedora de cana-de-açúcar picada (CAMECO).

SOARES, *et. al.* (1994), mostram que a eficiência da colheita mecânica, hoje, não depende só dos fabricantes de máquinas, mas também é importante que se tenha talhões devidamente preparados, variedades de cana-de-açúcar adequadas, sistema operacional definido, manutenção adequada, planejamento de colheita e análise do custo e benefício do sistema. Os autores consideram a colheita de cana-de-açúcar picada como solução definitiva, pois na colheita de cana-de-açúcar inteira, apesar de não haver alteração na recepção na usina e no transporte, esse sistema apresenta desvantagens que inviabilizam o sistema como o alto custo da colhedora (aproximadamente 80% do preço de uma colhedora para cana-de-açúcar picada), exigindo variedades de cana-de-açúcar mais eretas, para minimizar os problemas quanto à qualidade da matéria-prima colhida, além de não processar o carregamento. Esta comparação é baseada no desempenho de colhedoras de cana-de-açúcar picada existentes no mercado em confronto com o desempenho de cortadoras de cana-de-

açúcar inteira, que operavam anteriormente no Brasil, predominantemente colhedoras de correntes denominadas “soldair harvesters”.

3.3.3 Colheita de cana-de-açúcar crua x queimada.

Em 1991, antecipando às discussões polêmicas sobre a queimada da cana-de-açúcar como prática pré-colheita, a possibilidade da colheita mecânica de cana-de-açúcar para mudas, a viabilidade da colheita mecanizada em áreas mais declivosas para, bem como a flexibilidade da colheita a espaçamentos de plantio reduzidos, a Usina Bonfim, em Guariba Estado de SP, importou e avaliou o desempenho de duas colhedoras CLAAS 2000, (CAMPOS & MARCONATO,1994). Foram avaliados parâmetros técnicos e sua influência nos custos de produção em oito áreas distintas, com as variedades SP71-1406, RB79-5148, SP71-6163, RB72-454 e SP70-1143. Nestes locais parte da área foi colhida com queima prévia e parte sem queima prévia, todas as áreas colhidas referem-se ao primeiro corte. Os autores observaram quase sempre uma produtividade menor para a cana-de-açúcar crua, na média, aproximadamente 2,78 toneladas a menos, com exceção para a variedade RB78-5148 e SP71-6163. Queda de densidade de carga da cana-de-açúcar colhida crua em relação à queimada, destacando a variedade SP79-1011 com densidade praticamente igual quando colhida crua ou queimada. Quanto ao rendimento da máquina em horas disponíveis, a variedade SP79-1011 foi a que apresentou a menor diferença entre crua e queimada, devido ao porte ereto da mesma. O rendimento por hora horímetro foi em média 35,5% menor para cana-de-açúcar crua. O rendimento por hora de esteira girando, que reflete

aproximadamente o tempo efetivo de colheita, houve uma queda média de 35% de produtividade na cana-de-açúcar crua em relação à queimada.

O consumo horário de óleo diesel (l/h) foi 6,9% menor durante a colheita de cana-de-açúcar crua, o qual foi atribuído às desacelerações da máquina por “embuchamento”, fato este evidenciado quando analisado o consumo específico (l/t), onde foram encontrados valores médios 44,2% maiores para cana-de-açúcar crua, este fator é de influência decisiva da produtividade da máquina.

Como fatores negativos da colheita sem queima, os autores observaram: perda de 5 kg de caldo por tonelada de cana queimada; maior porcentagem de terra na cana, provavelmente devido a aderência de solo à exudação do colmo; em termos médios a cana crua apresentou 17% menos impurezas minerais. A porcentagem de impurezas vegetais depende muito da variedade, mas de um modo geral a fibra apresentou valores médios de 1,5% maiores para a cana-de-açúcar crua, tendo portanto, influência decisiva no ágio. As perdas de toletes foram atribuídas à falta de sincronismo entre o caminhão e a colhedora, à ventilação e à queda da esteira secundária, mas de um modo geral os autores afirmam que as perdas na colheita crua foram maiores que na queimada. A Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados obtidos pelos autores.

Tabela 1 - Testes comparativos entre colheita com cana queimada e crua (CAMPOS & MARCONATO, 1994).

Variável	Colheita com queima	Colheita crua	%
Produtividade t/ha	113,48	110,70	-2,5
Impurezas Minerais %	0,3004	0,2495	-16,9
Impurezas Vegetais %	2,9595	5,2244	76,5
Palha no Campo t/ha	3,159	19,94	531,2
Perdas Visíveis t/ha	8,861	10,785	21,71

FURLANI (1995), avalia a colhedora de cana-de-açúcar SANTAL AMAZÓN em canaviais com e sem queima prévia, para as variedades SP71-1406 e SP71-6163. O autor observa que a quantidade de massa da variedade SP71-1406 foi inferior à da SP71-6163 e as quantidades colhidas por hectare no sistema mecânico de cana-de-açúcar crua apresentou uma quantidade de massa maior que o sistema de cana-de-açúcar queimada. Tanto a velocidade efetiva quanto a capacidade efetiva da colhedora foram maiores na variedade SP71-1406 com queima prévia do canavial. Na capacidade efetiva da colhedora, a queima prévia do canavial obteve acréscimo médio de 15,60 % (57,78 t/h em cana-de-açúcar crua para 66,79 t/h em cana-de-açúcar queimada).

Avaliando quantitativamente os componentes da massa colhida, o autor mostra que não houve diferenças significativas na porcentagem de colmos contidos na matéria-prima, quando se compara a cana-de-açúcar crua com a queimada, o mesmo não acontece com a variedade SP71-6163, onde a porcentagem de colmos colhidos na cana-de-açúcar crua foi

bem menor que na cana-de-açúcar queimada, devido ao excesso de palhiço presente no material colhido sem a queima prévia do canavial e à massa excessiva de ponteiros, elevando a quantidade de matéria estranha vegetal, acréscimo este de 165,08 % se comparado à cana-de-açúcar queimada. A variedade SP71-6163 também apresentou acréscimo de matéria estranha vegetal, provavelmente devido a maior quantidade de folhas e palhas encontradas nesta variedade, o que pode ter dificultado a visualização do corte de base, provocando uma maior penetração dos discos de corte no solo, resultando num excesso de terra nas cargas. A matéria estranha mineral na colheita da cana-de-açúcar crua foi significativamente reduzida. Com relação à matéria estranha total para a variedade SP71-1406, com ou sem queima prévia do canavial, não houve diferenças significativas, mas na variedade SP71-6163 o acréscimo médio foi de 129,68 % na cana-de-açúcar crua.

O mesmo autor também fez análises tecnológicas das massas colhidas mecanicamente. Houve um acréscimo significativo do componente Brix%, na cana-de-açúcar crua; a variedade SP71-6163 apresentou o melhor índice de Pol% caldo, sendo que a de cana-de-açúcar crua proporcionou índices médios maiores que a cana-de-açúcar queimada; os açúcares totais contidos nos sólidos solúveis do caldo não apresentaram diferenças significativas entre as canas com e sem queima prévia. O teor de fibra da matéria-prima não teve efeito significativo de variedade, mas sim foi significativamente superior na cana-de-açúcar crua. O Pol% cana-de-açúcar corrigido, um dos parâmetros tecnológicos mais importantes, que engloba indiretamente todos os outros, mostra que a variedade SP71-1406 apresenta melhor comportamento na colheita de cana crua em relação à qualidade industrial da matéria prima. Variedades, com excesso de folhas e palhas, como é a SP71-6163, apresentam melhor qualidade industrial com queima prévia.

Quanto à perda de material industrializável na colheita, FURLANI (1995), afirma que o desponte pela colhedora na variedade SP71-1406 em cana-de-açúcar crua, foi mais alto que nos demais tratamentos; a perda de frações de colmo não apresentou diferenças, independente da variedade ou do tipo de colheita, crua ou queimada; a perda de rebolos, pedaços de colmo picados pela colhedora, mas caídos no campo, na variedade crua SP71-1406 foi bem maior que na queimada, chegando ao índice de 236% de acréscimo. Por outro lado, a variedade SP71-6163 não apresentou diferenças significativas de perdas de rebolo quando comparou cana-de-açúcar crua e queimada

A Tabela 2 apresenta os valores de perdas totais para cada uma das quatro situações testadas por FURLANI, 1985.

Tabela 2 - Perdas visíveis durante a colheita de cana-de-açúcar picada, queimada e crua, realizada com a colhedora AMAZÓN, (FURLANI, 1985).

Variedade	Condição	Perdas Totais
SP71-1406	Crua	5,72%
	Queimada	2,53%
SP71-6163	Crua	3,70%
	Queimada	3,56%

3.4. Impurezas na colheita

De acordo com FERNANDES *et.al.* (1977), trabalhando com cana queimada, a média de 512 carregamentos com aproximadamente 5.000 toneladas de canas cortadas manualmente e com carregamento mecânico apresentaram 6,2% de impurezas totais,

enquanto que de 173 toneladas de cana colhidas mecanicamente, apresentaram 16,7 % de impurezas totais, sendo 15,9 % de componentes vegetais e 0,8 % de componentes minerais, isto representa, em comparação ao sistema manual semi-mecanizados, um aumento de 4,5 vezes no teor de impurezas vegetais, e uma diminuição de 3,1 vezes nas impurezas minerais.

Os resultados evidenciam as sérias deficiências de limpeza das colhedoras, na década de 70, com relação às impurezas vegetais.

Comparando o conteúdo de impurezas na colheita mecânica e manual da cana-de-açúcar - queimada, TAMBOSCO, *et al.* (1977) mostraram que o total de impurezas na colheita mecanizada variam de 8,40 a 12,74 % para solos argilosos e de 9,42 a 14,05 % para solos arenosos. As ponteiros imaturas compõe a maior parte do total de impurezas, num total de 6,35 a 10,86 % em ambos tipos de solo, em base peso. A contribuição das folhas é de 1,56 a 4,05 %, enquanto a do solo é de 0,14 a 0,26 % e a contribuição de outras impurezas é de 0,12 a 0,44 %. Na colheita manual, o conteúdo total de impurezas foi 3,2 % menor, devido principalmente às pequenas quantidades de solo que vão com os colmos de cana-de-açúcar. O autor cita ainda, que a cana-de-açúcar queimada, colhida manualmente, apresenta uma maior porcentagem de impurezas que cana-de-açúcar crua, como consequência da inclusão de uma maior quantidade de folhas e ponteiros imaturas. Este fato pode ser atribuído ao sistema de trabalho, onde os cortadores de cana-de-açúcar recebem menos para cortar cana-de-açúcar queimada, desta forma ele corta apenas a base e as ponteira, as folhas devem ser eliminadas pela queimada, mas esta nem sempre é eficiente. Na cana-de-açúcar crua, a baixa porcentagem de ponteiros imaturas deve-se ao fato de geralmente os trabalhadores eliminarem bem as ponteiros para facilitar a retirada das folhas que é requerida neste tipo de colheita.

CLAYTON & WHITEMORE (1971), afirmam que as impurezas contidas na cana-de-açúcar, na Flórida, é de 33 % antes da queimada. Esta prática, feita antes da colheita, reduz o conteúdo de palha em apenas 5,2%. O conteúdo de impurezas é muito variável na Flórida, dependendo da época do ano, da uniformidade do canavial, da quantidade de chuva, da fertilização e de outros fatores.

MAGALHÃES (1994), citando diversos autores, destaca que cada 1% de palha, presente na moenda, acarreta uma perda de 1,5 a 2,0 % no valor do açúcar produzido, e ainda, que a quantidade de matéria estranha presente na cana-de-açúcar colhida mecanicamente varia entre 6 e 17 % comparando com o corte manual que apresenta valores entre 3 e 7 %.

3.5. Sistemas de limpeza da cana-de-açúcar

Desde 1968 o Brasil demonstra uma preocupação em colher cana-de-açúcar inteira crua com mostra a patente 203.875 (1968) em - despalhar sem queimar. O equipamento é constituído basicamente de uma estrutura, de um motor hidráulico, serra circular, cilindro hidráulico e rotores; aos quais são acoplados bastões ou chicotes de material flexível. O princípio não atingiu estágio experimental significativo que permita avaliação de desempenho.

CLAYTON, (1971) menciona a prática de limpeza de cana-de-açúcar não queimada, separando os toletes das pontas e folhas, na Flórida, EUA. O autor se refere a mecanismos denominados "snappers", os quais consistem em cilindros justapostos destinados a destacar as palhas e pontas pela aplicação de forças de tração. O dimensionamento dos diâmetros desses cilindros não permite que os toletes de cana-de-açúcar sejam esmagados e sim

permaneçam na superfície. Na realidade o sistema consiste numa "mesa" de cilindros justapostos. O autor apresenta diversos tipos de superfícies estudadas para os cilindros, as quais muitas vezes apresentam-se em forma de garras. O trabalho em questão discute também o fluxo de cana-de-açúcar que alimenta o mecanismo, a qualidade de limpeza, bem como o desgaste dos cilindros. Estes mecanismos não conduzem bem os colmos inteiros principalmente quando estes se apresentam curvados. Os toletes de menor diâmetro ocasionaram perdas ao se incorporarem às impurezas.

MIYABE & ABE, (1976) realizaram determinações experimentais das forças necessárias para remover as folhas da cana-de-açúcar, utilizando uma Máquina de Ensaio Universal; observaram que a força de tração para remover a folha varia de acordo com sua posição no caule e da direção que é tracionada; a força média na oitava folha foi de 6,33 kg/folha com ângulo de tração de 45 graus e 3,60 kg/folha com ângulo de 135 graus. Para remover as folhas da cana-de-açúcar, o mecanismo deve promover o aparecimento de mais de uma força, não apenas de tração.

Para verificar a resistência do caule à penetração, flexão, corte e esmagamento MIYABE *et.al.*, (1979, a) fizeram testes e concluíram que a resistência à penetração varia ao longo da localização do nó e da época da colheita, tendendo a ser mais resistente ao longo dos internódios basais e nas colheitas mais tardias, a resistência à flexão aumenta e a deflexão diminui do topo para a raiz e também com o atraso da colheita da cana-de-açúcar; e a resistência ao esmagamento aumenta nas colheitas tardias da cana-de-açúcar e diminui do topo para a raiz.

MIYABE *et. al.*, (1979, b) realizaram também testes de impacto verificando que a energia de impacto varia de acordo com a localização dos nós, aumentando do topo para a raiz. Os resultados mostram que o tecido interno do colmo é mais macio e apresenta rigidez menor nos segmentos superiores da cana-de-açúcar.

FERRAZ, (1987) desenvolveu uma metodologia para obtenção do módulo elástico da parte mediana do internódio da cana-de-açúcar. Por ser um material composto, considerado simplificada de casca e parênquima, o autor investigou a participação de cada um desses componentes na estrutura. A casca, em forma de lâminas delgadas foi submetida a ensaios de tração. Corpos de prova cilíndricos, extraídos da parte mediana central do parênquima, foram submetidos a ensaios de compressão uniaxial e diametral, paralelos às fibras. Os resultados obtidos evidenciam o anisotropismo do material, a grande contribuição que a casca fornece à resistência total do internódio e a adequabilidade da metodologia sugerida na confecção dos corpos de prova

Com base nos dados de MIYABE *et. al.*, (1979), ABE *et. al.* (1979) desenvolveram um sistema para remover as folhas da cana-de-açúcar. Testaram três tipos de mecanismos diferentes:

1. Um sistema de corte com fricção (lâminas cilíndricas). Neste sistema as folhas são cortadas e arrancadas do colmo pela ação de lâminas cilíndricas. O desempenho deste equipamento foi de 77,30 ~ 90,10 % de remoção das folhas com 0 % de danos à cana-de-açúcar e com rendimento de 150 ~ 313 kg/homem-hora.

2. Um sistema de fricção forçada. O sistema consiste de rolos feitos com arame de aço, corda piano e correias em V que removiam as folhas. O desempenho foi de 76,60 ~ 89,80 % com 1,10% de dano à cana-de-açúcar e 156 ~ 190 kg/homem-hora de rendimento. Este sistema apresentou algumas deficiências, embora um dano visível não fosse observado, as marcas de abrasão eram bem visíveis, sendo 1 ~ 2 mm do material da casca removido após a ação dos rolos.
3. Um sistema de impacto - fricção. Neste sistema cordas flexíveis presas a rolos rotativos que proporcionam uma grande força de impacto através da força centrífuga na cana-de-açúcar promovem a remoção das folhas. O desempenho ficou na faixa de 90,30 a 91,30 % com 0,60 ~ 1,40 % de danos e uma eficiência de 162 ~ 178 kg/homem-hora. Embora neste sistema exista um pequeno dano à cana-de-açúcar, a porcentagem de limpeza foi mais alta e a potência requerida menor que nos anteriores.

Os vários parâmetros envolvidos na retirada da palha da cana-de-açúcar foram analisados por SRIVASTAVA, (1987) utilizando análise dimensional. Uma equação geral para avaliar a força requerida para retirar a palha ou a folha foi desenvolvida.

$$D_f = K \left(\frac{A_c^2}{H_l D_n N_d} \right), \text{ onde}$$

D_f = Força requerida para despalhar a cana;

K = constante = 268,6 kgf/cm;

A_c = Área da cana onde está a folha, cm^2 ;

D_n = Diâmetro do nó da cana, cm;

N_d = Distância entre os nós, cm;

H_i = Altura da folha desde o topo da cana, cm.

SRIVASTAVA & SINGH, (1990) discutem os esforços para estabilizar o mecanismo apropriado para retirar a palha da cana-de-açúcar inteira. Um protótipo foi desenvolvido consistindo de uma unidade transportadora de cana-de-açúcar, conjunto de rolos alimentadores, mecanismos de despalhe e fornecimento da força requerida. Este sistema foi inicialmente desenvolvido para baixas velocidades, menores que 1,50 m/s. Vários mecanismos de despalhe de cana-de-açúcar foram testados com diversos graus de sucesso. Após várias tentativas com resultados insatisfatórios, um par de rolo com escovas de aço em sua periferia foi construído e testado com resultados satisfatórios. O problema apresentado pelo sistema foi a disposição da palha retirada, então os rolos foram colocados horizontalmente, diferente da forma angular anterior. Como a superfície para agarrar as folhas era muito áspera, a cana-de-açúcar apresentou rachaduras e os nós foram significativamente danificados, a ação deveria ser mais rápida que 2,0 m/s, um novo conjunto de rolos com velocidade periférica maior, 4,0 m/s, foi desenvolvido para fazer a operação de despalhe sem produzir rachaduras na superfície das canas-de-açúcar e sem danificar os nós (gemas). Testes de campo confirmaram que este mecanismo com combinação própria entre o diâmetro dos rolos e suas velocidades periféricas, pode ser capaz de produzir os resultados desejados. Apesar da capacidade de retirar a palha ser maior que 1 t/h, o peso da máquina era de aproximadamente 350 kg.

Para limpar a cana-de-açúcar SHUKLA et. al., (1991) desenvolveram e testaram um sistema de rolos. Este equipamento separa o topo da cana-de-açúcar madura, quebrando-o e

removendo as folhas secas e verdes. O sistema de limpeza consiste de um tubo de alimentação, um cilindro, um rolo inferior, rolo lateral, um rolo cortador e um ventilador, montados sobre uma plataforma estacionária. Era operado por um motor diesel de 5,90 kW. O equipamento foi testado para diferentes variedades de cana-de-açúcar e para diferentes velocidades de rotação dos rolos. O melhor resultado apresentou 0,87 ~ 6,38 %, de palha deixados na cana-de-açúcar após a passagem pelo equipamento. Esses resultados correspondem a uma velocidade de 300 rpm com um ângulo de 25 graus entre o cilindro e o tubo de alimentação.

Estudos referentes a resistência à compressão e remoção de folhas da cana-de-açúcar foram realizados por PAGNANO et al. (1995). Os ensaios de compressão foram feitos utilizando-se uma máquina universal de ensaios, aplicando carga diametralmente, a uma taxa de deformação constante, sobre a cana-de-açúcar apoiada em prato plano, através de uma talisca com espessura de ¼ polegada. Observou-se que a cana-de-açúcar resiste a uma pressão na faixa de 4,9 MPa. Os ensaios para avaliar as forças necessárias à remoção das folhas foram realizados com uma talisca orientada perpendicularmente ao eixo longitudinal da cana, submetida à duas forças: uma radial à mesma e outra no sentido longitudinal na forma de uma força de tração. Constatou-se que é possível retirar as folhas com uma pressão média de 0,80 MPa, que corresponde a uma força de fricção de 315,0 N. Foram feito ensaios em colmos com diferentes posições, isto é mais perto da raiz ou mais perto do topo, e com 5 variedades de cana-de-açúcar, RB76-5418, RB72-454, SP71-1406, SP79-1011 e SP 70-1143 sendo que os resultados obtidos não apresentaram diferenças estatísticas devido a estas variações.

TANAKA (1996), estudou um sistema para despalhe mecânico de cana-de-açúcar inteira através de pares de rolos oscilantes que geram forças tangenciais pelo diferencial de velocidades no ponto de contato com os colmos. Para um diferencial de velocidades entre os rolos superiores e inferiores de 43% e entre pares de rolos adjacentes de 29%, a eficiência de remoção de folhas foi de 82,5%, embora a quantidade de gemas danificadas mecanicamente tenha sido relativamente alta, 29%, inviabilizando a utilização deste sistema na colheita de mudas para plantio. Os danos mecânicos observados pelo autor, ao longo dos colmos, foram na forma de fissuras de 5 a 10 mm de comprimento, sem perdas na qualidade ou quantidade da matéria-prima. Sem diferencial de velocidades entre rolos superiores e inferiores e com diferencial de 19% entre pares de rolos adjacentes, a eficiência de remoção de folhas foi de 45,6%, com 6,6% de gemas visivelmente danificadas e não apresentou danos mecânicos aos colmos, embora o diâmetro médio dos colmos neste caso tenha-se apresentado inferior aos demais. O autor simulou a ação mecânica dos rolos através de suas equações de movimento; o modelo desenvolvido superestima as forças geradas pelo mecanismo em 7,72% com coeficiente de atrito de 0,61 e 26,4% para um coeficiente de atrito de 0,35. Essa variação na determinação das forças geradas pelo modelo ocorreu devido à presença nós e internódios irregulares que causam oscilações dos rolos superiores, fazendo com que surjam efeitos dinâmicos não contemplados pelo modelo.

A estimativa dos investimentos mínimos necessários para implementar a colheita da cana-de-açúcar crua picada em 50% (área mecanizável) das áreas ocupadas com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, apresentada por VEIGA FILHO *et. al.* (1996) - incluindo recepção na indústria, preparo e moagem, sistematização de terrenos, melhoramento de

variedades, pesquisa e desenvolvimento, equipamento de colheita e, preparo, plantio e tratos - chega a aproximadamente 1,8 bilhões de dólares.

A colheita da cana-de-açúcar crua não visa apenas atender uma exigência legal, mas sim apresenta vantagens que contribuem para sua sustentabilidade tais como melhor qualidade da matéria-prima colhida, menor índice de impurezas minerais, conservação do solo e da qualidade do ar, diminuição do custo de produção da cana-de-açúcar, diminuição do custo industrial, redução no uso de agroquímicos e aumento da longevidade da cultura. Viabilizá-la tecnicamente e economicamente é uma necessidade e uma incumbência da pesquisa tecnológica.

IV- Modelagem Matemática

4.1- Desenvolvimento Matemático

Entre os vários métodos para se retirar a palha da cana-de-açúcar mecanicamente, descritos no capítulo anterior como: ventiladores, extratores, rolos com taliscas, rolos oscilantes com velocidade diferencial, escovas, correntes, facas rotativas e facas oscilantes, observa-se que o método menos explorado é o de facas oscilantes. Vislumbrando um potencial para este método optamos neste trabalho por equacioná-lo e testá-lo.

O princípio de funcionamento do mecanismo é bastante simples. Consiste de facas oscilantes, presas a um rotor central. No momento que a faca entra em contato com a massa de cana-de-açúcar, esta altera sua trajetória e por fricção remove as folhas dos colmos, uma vez que estes tem sua velocidade de deslocamento controlada por outro sistema. O impacto desta faca deve ser tal que não danifique o colmo, devendo raspar a maior superfície possível durante o curto espaço de tempo em que estiver em contato com a superfície do colmo.

A velocidade de alimentação dos colmos assim como o número de facas do rotor, e a distância “z” do rotor indicada na Figura 6 foram dimensionadas para se obter uma varredura total da superfície dos colmos com superposição variável em função da relação $V_{t \text{ faca}} / V_{t \text{ alimentação}}$.

O rotor de facas oscilantes permite montar até 48 facas com largura de 10 mm para atingir uma largura de trabalho de 300 mm.

Para o equacionamento das forças de interação do mecanismo, usou-se as equações de movimento da faca derivadas pelo método de LAGRANGE, e para a resolução de equações e obtenção de gráficos durante as simulações, utilizou-se o programa computacional MATHEMATICA 2.2.3.

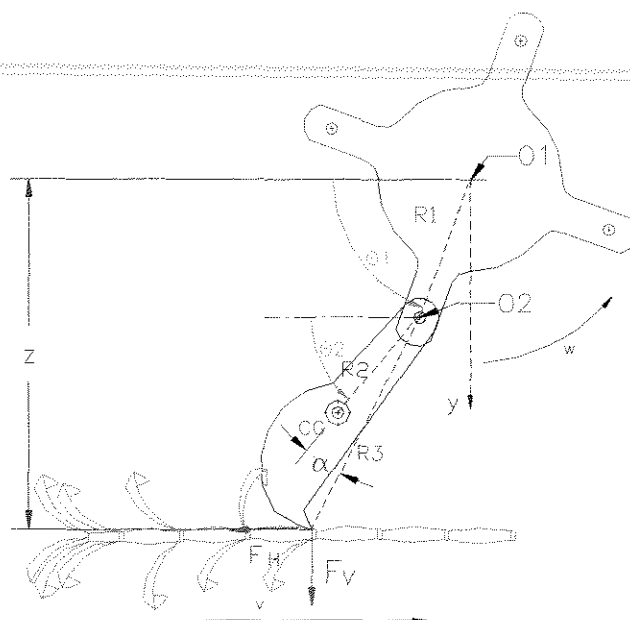


Figura 6 - Esquema do despalhador inercial de facas oscilantes.

O mecanismo, mostrado na Figura 6, girando com velocidade angular ω , fará com que a faca (massa oscilante) entre em contato com a cana, produzindo as forças necessárias ao despalhe, ou seja uma força normal e uma força de fricção. O valor das forças necessárias para remover a palha por fricção foram determinadas por PAGNANO, *et. al.* (1995), sendo os valores médio obtidos de pressão, de 0,8 MPa e uma força de fricção de 315 N, sendo que a cana-de-açúcar resiste à uma pressão de até 4,8 MPa. No mecanismo proposto, estas forças são produzidas em função da massa, velocidade de rotação das facas, altura da camada de cana-de-açúcar, raio da massa central e raio da massa oscilante.

As equações de movimento do mecanismo são determinadas pelas Equações de LAGRANGE da seguinte forma:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_r} = F_{qr} \dots\dots\dots(1)$$

onde:

$\mathcal{L}$ = Operador Lagrangeano

F_{qr} = Força generalizada

q_r = Coordenada generalizada

$$\mathcal{L} = T - U \dots\dots\dots(2)$$

Com,

T = Energia Cinética

U = Energia Potencial

As coordenadas generalizadas, q_r no equacionamento são representadas por θ_1 e θ_2 .

Considerando-se $\theta_1 = \omega t$ e $\dot{\theta}_1 = \omega = \text{constante}$. Onde:

θ_1 = posição angular do rotor;

θ_2 = posição angular das facas oscilantes;

ω = velocidade angular do rotor;

t = tempo.

Assim,

$$T = \frac{1}{2}(I_{p1}\dot{\theta}_1^2 + I_{p2}\dot{\theta}_2^2) + \frac{1}{2}m_2(\dot{x}_{cg2}^2 + \dot{y}_{cg2}^2) \dots\dots\dots(3)$$

x_{cg2} , y_{cg2} são as coordenadas do centro de gravidade da faca oscilante e, $\dot{x}_{cg2}$ e

$\dot{y}_{cg2}$ são suas velocidades, I_{p1} e I_{p2} são os momentos polares de inércia com relação ao

centro de gravidade do rotor e da faca respectivamente e m_2 a massa da faca oscilante

$$x_{cg2} = R_1 \cos \theta_1 + R_2 \cos \theta_2$$

$$y_{cg2} = R_1 \sin \theta_1 + R_2 \sin \theta_2$$

$$\dot{x}_{cg2} = -R_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - R_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2$$

$$(\dot{x}_{cg2})^2 = R_1^2 \dot{\theta}_1^2 \sin^2 \theta_1 + 2R_1 R_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 + R_2^2 \dot{\theta}_2^2 \sin^2 \theta_2$$

$$\dot{y}_{cg2} = R_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + R_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2$$

$$(\dot{y}_{cg2})^2 = R_1^2 \dot{\theta}_1^2 \cos^2 \theta_1 + 2R_1 R_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + R_2^2 \dot{\theta}_2^2 \cos^2 \theta_2$$

Onde, como são mostrados na Figura 6:

R_1 é a distância do centro do rotor ao centro de articulação da faca (O_2),

R_2 é a distância do centro de articulação da faca até o centro de massa desta,

R_3 é a distância do centro de articulação à ponta da faca,

Desta forma, a Energia Cinética do mecanismo é dada pela equação, mostrada abaixo:

$$T = \frac{1}{2} \{ I_{p1} \dot{\theta}_1^2 + I_{p2} \dot{\theta}_2^2 + m_2 [(R_1^2 \dot{\theta}_1^2) (\sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1) + 2R_1 R_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 (\sin \theta_1 \sin \theta_2 + \cos \theta_1 \cos \theta_2)] \}$$

$$(R_2^2 \dot{\theta}_2^2)(\sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_2)]\}$$

$$T = \frac{1}{2} \left\{ I_{p1} \dot{\theta}_1^2 + I_{p2} \dot{\theta}_2^2 + m_2 \left[R_1^2 \dot{\theta}_1^2 + 2R_1 R_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + (R_2^2 \dot{\theta}_2^2) \right] \right\} \dots\dots\dots(4)$$

Enquanto a Energia Potencial do Mecanismo é dada por:

$$U = U_0 - m_2 g y_{cg2} \dots\dots\dots(5)$$

Então

$$U = U_0 - m_2 g [R_1 \sin \theta_1 + R_2 \sin \theta_2] \dots\dots\dots(6)$$

Portanto, substituindo as equações (4) e (6) na equação (1) tem-se:

$$L = \frac{1}{2} \left\{ I_{p1} \dot{\theta}_1^2 + I_{p2} \dot{\theta}_2^2 + m_2 \left[R_1^2 \dot{\theta}_1^2 + 2R_1 R_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + (R_2^2 \dot{\theta}_2^2) \right] \right\} - U_0 + \\ m_2 g [R_1 \sin \theta_1 + R_2 \sin \theta_2] \dots\dots\dots(7)$$

Substituindo a equação (7) na equação (1), pode-se escrever:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_1} = I_{p1} \dot{\theta}_1 + m_2 R_1^2 \dot{\theta}_1 + R_1 R_2 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_1} \right) = I_{p1} \ddot{\theta}_1 + m_2 R_1^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 R_1 R_2 \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - m_2 R_1 R_2 \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_1} = -m_2 R_1 R_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + m_2 g R_1 \cos \theta_1 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_1} = m_2 \left\{ R_1 R_2 \left[\ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \right] \right\} - \\ m_2 g R_1 \cos \theta_1 = F_{\theta 1} \dots\dots\dots(8)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_2} = I p_2 \dot{\theta}_2 + m_2 [R_1 R_2 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) + R_2^2 \dot{\theta}_2]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_2} \right) = I p_2 \ddot{\theta}_2 + m_2 [-R_1 R_2 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + R_1 R_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + R_2^2 \ddot{\theta}_2]$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_2} = m_2 R_1 R_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + m_2 g R_2 \cos \theta_2$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_2} = (I p_2 + m_2 R_2^2) \ddot{\theta}_2 - m_2 R_1 R_2 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) -$$

$$m_2 g R_2 \cos \theta_2 = F_{\theta_2} \dots \dots \dots (9)$$

O trabalho virtual das forças aplicadas na ponta da faca é dado por:

$$\delta W = F_H \delta X + F_V \delta Y + M \delta \theta_1,$$

Sabendo-se que F_H é a força horizontal provocada pelo mecanismo, F_V a força vertical e M o torque aplicado.

$$\delta W = F_H \left(\frac{\partial X}{\partial \theta_1} \delta \theta_1 + \frac{\partial X}{\partial \theta_2} \delta \theta_2 \right) + F_V \left(\frac{\partial Y}{\partial \theta_1} \delta \theta_1 + \frac{\partial Y}{\partial \theta_2} \delta \theta_2 \right) + M \delta \theta_1$$

$$\delta W = \left(F_H \frac{\partial X}{\partial \theta_1} + F_V \frac{\partial Y}{\partial \theta_1} + M \right) \delta \theta_1 + \left(F_H \frac{\partial X}{\partial \theta_2} + F_V \frac{\partial Y}{\partial \theta_2} \right) \delta \theta_2$$

onde:

$X(\theta_1, \theta_2)$ corresponde ao deslocamento da força F_H ,

$Y(\theta_1, \theta_2)$ corresponde ao deslocamento da força F_V

$$X = R_1 \cos \theta_1 + R_3 \cos(\theta_2 + \alpha)$$

$$Y = R_1 \sin \theta_1 + R_3 \sin(\theta_2 + \alpha)$$

$$F_{\theta_1} = F_H \frac{\partial X}{\partial \theta_1} + F_V \frac{\partial Y}{\partial \theta_1} + M$$

$$F_{\theta_2} = F_H \frac{\partial X}{\partial \theta_2} + F_V \frac{\partial Y}{\partial \theta_2}$$

Onde as equações acima representam a forças generalizadas correspondentes com as coordenadas generalizadas θ_1 e θ_2 respectivamente.

Destas equações tem-se:

$$\frac{\partial X}{\partial \theta_1} = -R_1 \sin \theta_1$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \theta_1} = R_1 \cos \theta_1$$

$$F_{\theta_1} = -F_H R_1 \sin \theta_1 + F_V R_1 \cos \theta_1 + M \dots \dots \dots (10)$$

$$\frac{\partial X}{\partial \theta_2} = -R_3 \sin(\theta_2 + \alpha)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \theta_2} = R_3 \cos(\theta_2 + \alpha)$$

$$F_{\theta_2} = F_V R_3 \cos(\theta_2 + \alpha) - F_H R_3 \sin(\theta_2 + \alpha) \dots \dots \dots (11)$$

Temos assim:

Primeira Equação de LAGRANGE

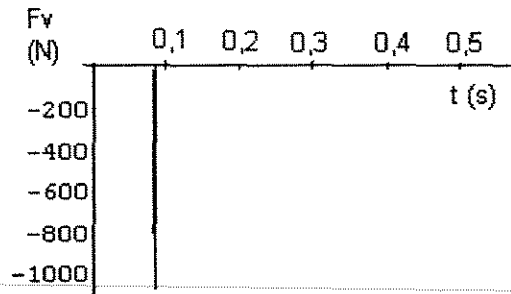
$$m_2 \left\{ R_1 R_2 \left[\ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \right] \right\} - m_2 g R_1 \cos \theta_1 =$$

$$-F_H R_1 \sin \theta_1 + F_V R_1 \cos \theta_1 + M \dots \dots \dots (12)$$

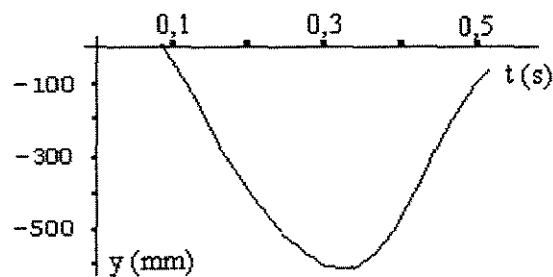
Segunda Equação de LAGRANGE

$$\begin{aligned} (I_{p_2} + m_2 R_2^2) \ddot{\theta}_2 - m_2 R_1 R_2 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - m_2 g R_2 \cos \theta_2 = \\ F_V R_3 \cos(\theta_2 + \alpha) - F_H R_3 \sin(\theta_2 + \alpha) \dots \dots \dots (13) \end{aligned}$$

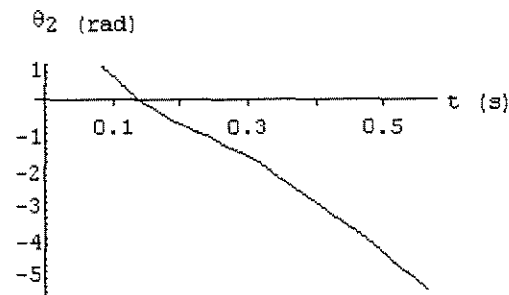
Durante a resolução do modelo acima descrito, foi possível detectar um sério problema no sistema proposto. A faca ao entrar em contato com o colmo de cana, com o impacto retrai, não permanecendo em contato com a mesma e somente voltando a atingir a superfície do colmo mais uma vez, não realizando desta forma a raspagem necessária ao despalhe. Isto pode ser observado na Figura 7a, onde a força vertical aplicada à cana-de-açúcar, mostra um único pico, o de impacto. Após permanecer por um tempo muito curto em contato com a cana-de-açúcar a faca deixa de tocá-la e então a força vertical torna-se nula. Na Figura 7b, observa-se que durante o impacto a faca está sobre a cana-de-açúcar, portanto, y_y é zero e logo após é sempre negativo, o que significa que a faca está sempre fora da cana-de-açúcar sem conseguir mais tocá-la. A Figura 7c mostra o ângulo θ_2 , que indica o posicionamento da faca oscilante, desta forma, quando esta curva se mostra decrescente, a faca está se movimentando no sentido anti-horário, que explica a saída da cana após o impacto. Este comportamento é independente da massa da faca ou de sua velocidade angular.



7a - Força Vertical aplicada na faca pela cana



7b - Distância entre a faca e a camada de cana

7c - Ângulo θ_2 simulado**Figura 7** - Gráficos do comportamento da faca oscilante sem mola.

Faz-se, desta forma, necessário, o uso de uma mola para manter a faca em contato com a superfície do colmo sem as oscilações que ocorriam no modelo anterior, fazendo com que esta permaneça mais tempo em contato com a cana-de-açúcar, conseguindo assim, um despalhe mais eficiente.

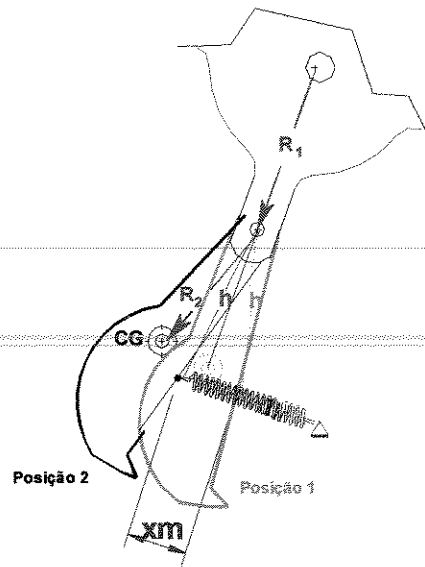


Figura 8- Esquema de montagem da mola no rotor

Quando usa-se mola, para deformações pequenas, a modelagem segue os mesmos passos descritos pelas equações anteriores, mudando-se apenas a Energia Potencial do Mecanismo onde acrescenta-se o termo $\frac{1}{2}kx_m^2$, que representa a energia potencial devido à mola, para pequenas deformações, tornando:

$$U = \frac{1}{2}kx_m^2 - m_2gy_{cg2} \dots\dots\dots(14)$$

onde k = constante da mola e $x_m = h \sin(\theta_1 - \theta_2)$, que é o deslocamento da mola e h a distância entre a fixação da mola e a articulação, conforme mostrado na Figura 8.

Então

$$U = \frac{1}{2}kh^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_2) - m_2g[R_1 \sin\theta_1 + R_2 \sin\theta_2] \dots\dots\dots(15)$$

Portanto, substituindo a equação(4) e a equação (15) na equação (1) tem-se:

$$L = \frac{1}{2} \left\{ I_{p1} \dot{\theta}_1^2 + I_{p2} \dot{\theta}_2^2 + m_2 \left[R_1^2 \dot{\theta}_1^2 + 2R_1 R_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + (R_2^2 \dot{\theta}_2^2) \right] \right\} -$$

$$\frac{1}{2} k h^2 \sin^2(\theta_1 - \theta_2) + m_2 g [R_1 \sin \theta_1 + R_2 \sin \theta_2] \dots \dots \dots (16)$$

Substituindo a equação (16) na equação (1), pode-se escrever:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = I_{p1} \dot{\theta}_1 + m_2 R_1^2 \dot{\theta}_1 + R_1 R_2 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) = I_{p1} \ddot{\theta}_1 + m_2 R_1^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 R_1 R_2 \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - m_2 R_1 R_2 \dot{\theta}_2 (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 - \theta_2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -m_2 R_1 R_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - k h^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \cos(\theta_1 - \theta_2) + m_2 g R_1 \cos \theta_1$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = m_2 \left\{ R_1 R_2 \left[\ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \right] \right\} + k h^2 \sin(\theta_1 - \theta_2)$$

$$\cos(\theta_1 - \theta_2) - m_2 g R_1 \cos \theta_1 = F_{\theta_1} \dots \dots \dots (17)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = I_{p2} \dot{\theta}_2 + m_2 \left[R_1 R_2 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) + R_2^2 \dot{\theta}_2 \right]$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) = I_{p2} \ddot{\theta}_2 + m_2 \left[-R_1 R_2 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + R_1 R_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + R_2^2 \ddot{\theta}_2 \right]$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2} = m_2 R_1 R_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + k h^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \cos(\theta_1 - \theta_2) + m_2 g R_2 \cos \theta_2$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = (I_{p2} + m_2 R_2^2) \ddot{\theta}_2 - m_2 R_1 R_2 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - k h^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \times$$

$$\cos(\theta_1 - \theta_2) - m_2 g R_2 \cos \theta_2 = F_{\theta_2} \dots \dots \dots (18)$$

Assim tem-se as equações de Lagrange utilizando-se mola

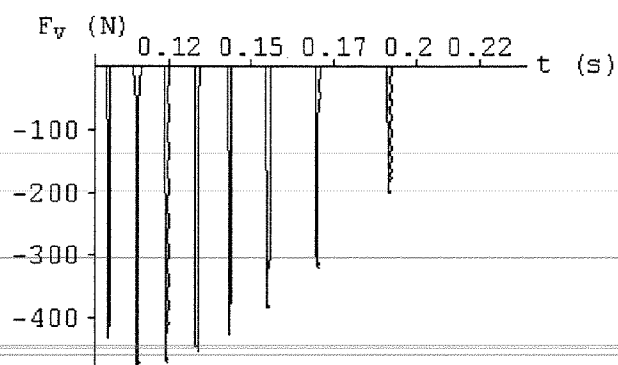
Primeira Equação de LAGRANGE com mola

$$m_2 \left\{ R_1 R_2 \left[\ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \right] \right\} + kh^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \cos(\theta_1 - \theta_2) - \\ \cos(\theta_1 - \theta_2) - m_2 g R_1 \cos \theta_1 = -F_H R_1 \sin \theta_1 + F_V R_1 \cos \theta_1 + M \dots \dots \dots (19)$$

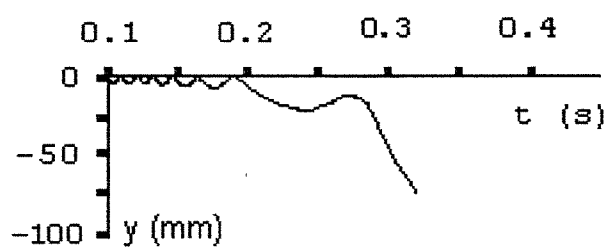
Segunda Equação de LAGRANGE com mola

$$(I_{p_2} + m_2 R_2^2) \ddot{\theta}_2 - m_2 R_1 R_2 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - kh^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \cos(\theta_1 - \theta_2) - \\ m_2 g R_2 \cos \theta_2 = F_V R_3 \cos(\theta_2 + \alpha) - F_H R_3 \sin(\theta_2 + \alpha) \dots \dots \dots (20)$$

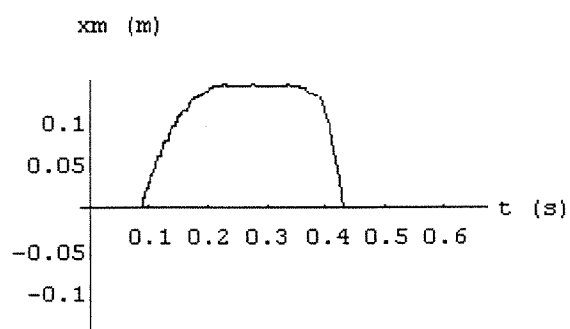
As figuras 9a, 9b, 9c, 9d mostram o comportamento deste modelo. Observa-se que mesmo mantendo uma pequena oscilação o tempo de permanência entre a faca e o colmo da cana-de-açúcar é bem maior, não ocorrendo mais a possibilidade de fuga da faca em rotações muito altas. A Figura 9a mostra os picos de força vertical, que ocorrem devido aos vários impactos da faca sobre a cana-de-açúcar. A mola faz com que a faca não se afaste muito, como mostra a Figura 9b, desta forma, a faca fica fora da cana por um intervalo curto de tempo e retorna em seguida a atingi-la. Na Figura 9c observa-se a tração da mola no intervalo de tempo onde ocorrem estes vários impactos, ou seja, quanto a mola estica durante a raspagem. A Figura 9d indica o posicionamento da faca oscilante, quando a curva de θ_2 é decrescente a faca gira em sentido anti-horário, enquanto que quando a curva é crescente a faca gira em sentido horário.



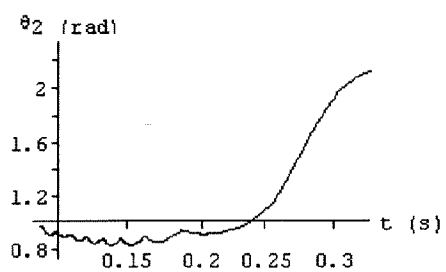
9a - Força vertical provocada pela faca



9b - Distância da faca à camada de cana



9c - Deslocamento da mola



9d - Ângulo θ_2 simulado

Figura 9 - Gráficos do comportamento da faca oscilante com molas.

Nos dois casos, sem e com mola, existem duas condições do contorno bastante distintas para o modelo, na primeira o posicionamento da faca está limitado pela cana-de-açúcar, ou seja a faca esta realizando trabalho. Na segunda a faca esta livre, sem delimitações. O equacionamento foi feito para as duas situações.

No primeiro caso, quando a faca está em contato com a cana-de-açúcar, assume-se que:

$$y = R_1 \sin(\omega t) + R_3 \sin(\theta_2 + \alpha);$$

$$F_2 = -k (y - z);$$

$$F_1 = -\mu F_2;$$

$$yy = y - z$$

Onde y é a distância vertical do centro da articulação até a ponta da faca oscilante, yy a distância vertical da ponta da faca até a camada de cana-de-açúcar e z a altura da camada de cana-de-açúcar, Figuras 10 e 11.

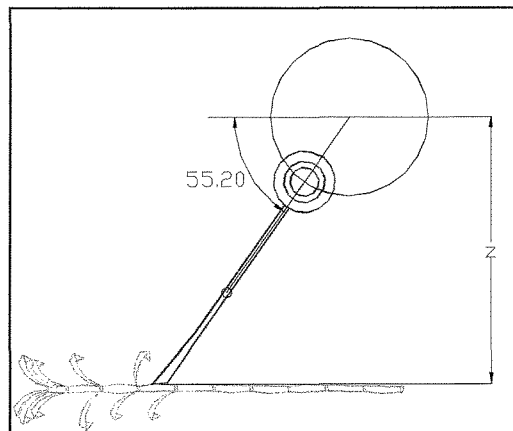


Figura 10 - Situação de contato entre as facas e a cana-de-açúcar

Para o segundo caso, quando a faca está livre, isto é, quando não há contato com a cana-de-açúcar, assume-se que:

$$y = R_1 \sin(\omega t) + R_3 \sin(\theta_2 + \alpha);$$

$$F_2 = 0;$$

$$F_1 = 0;$$

$$y_{yy} = y - z.$$

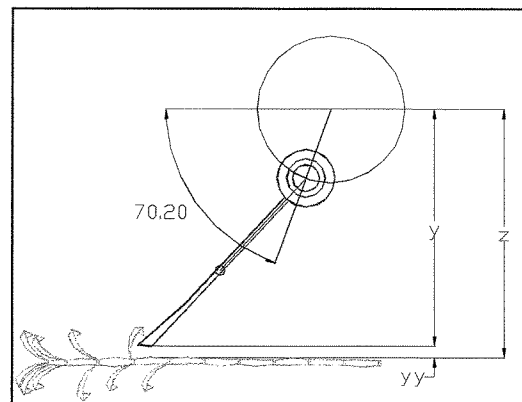


Figura 11 - Situação em que a faca está fora da região de contato com a cana-de-açúcar.

O gráfico do comportamento geral da faca fora da região de contato com os colmos da cana-de-açúcar.

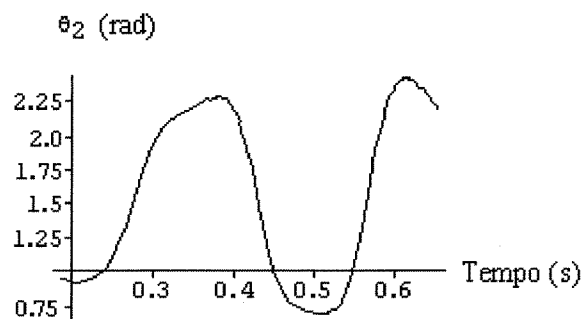


Figura 12 -Comportamento geral da faca oscilante fora região de contato do colmo.

V - Material e Métodos

5.1 Material

Os materiais utilizados na realização dos ensaios de despalhe da cana-de-açúcar foram:

- Despalhador Inercial de Facas Oscilantes, descrito separadamente no item 5.1.1
- Transdutor de forças do tipo Anel Octagonal;

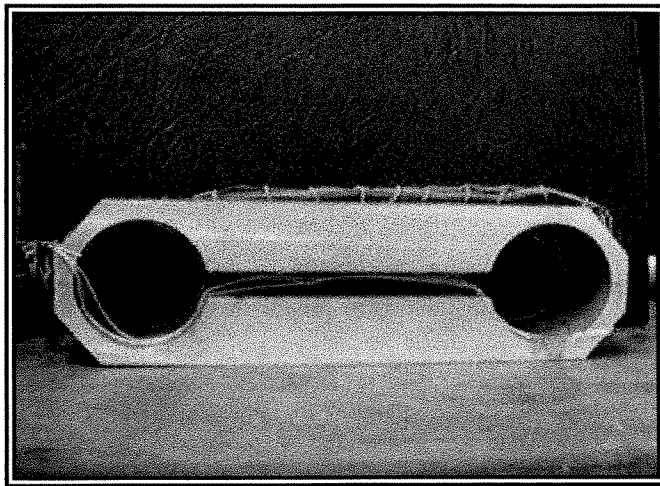


Figura 13- Anel Octogonal

- Cartão PCMCIA de aquisição de dados, modelo DAQCard 700, com 16 canais analógicos, frequência máxima de amostragem de 100 mil pontos por segundo, com resolução de 12 bits;
- Cana-de-Açúcar, não foi usada nenhuma variedade específica;

- Tacômetro eletrônico digital, marca Tako, modelo TD 303 com cinco dígitos e faixa de medição de 1 a 19999, rpm 0,1 a 1999,9 metros por minuto;
- Condicionador de Sinais Extensométrico com 6 canais, tensão de alimentação da ponte de $\pm 2,0$ V, com saída analógica de +2 a -2 V;
- Condicionador de Sinais, marca Kyowa com 6 canais, 5 níveis de ajuste de sensibilidade e tensão de alimentação da ponte de $\pm 2,0$ V. Modelo DPM-6G;
- Micro Computador Portátil, marca Digimac, modelo TS 30;
- Programa Computacional MATHEMATICA 2.2.3 desenvolvido por Wolfram Research, Inc. que pode ser utilizado para todos os tipos de resoluções matemáticas, incluindo a resolução de equações diferenciais de ordem superior;
- Unidade hidrostática de velocidade variável.

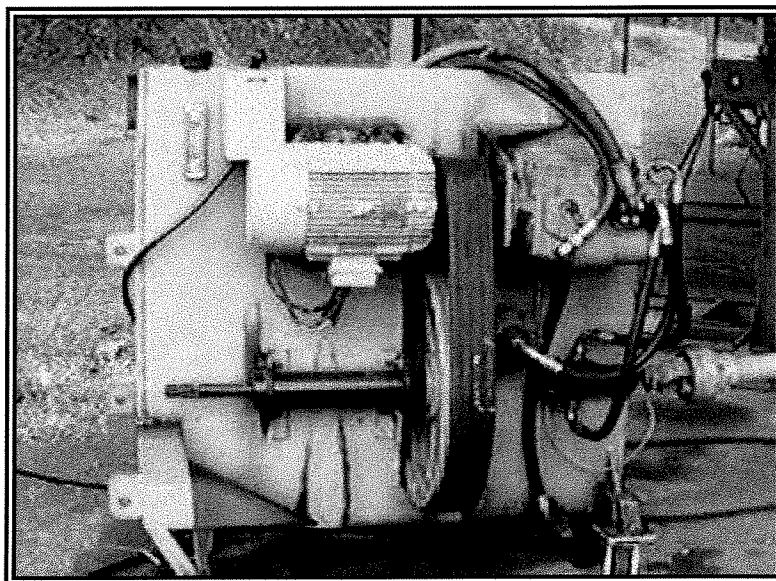


Figura 14- Unidade Hidrostática

A unidade hidrostática pode ter acionamento elétrico ou mecânico. O acionamento elétrico pode atingir até 15 Hp enquanto que o mecânico até 80 Hp, o equipamento possui uma bomba de pistão hidrostática de acionamento variável com deslocamento volumétrico de 89 cm^3 por rotação. Esta bomba alimenta o motor hidráulico fixo de pistões axiais também com 89 cm^3 por rotação. O acionador possui uma capacidade de torque de 540 Nm.

5.1.1 - Despalhador inercial de facas oscilantes

Projetado especialmente para este fim; O despalhador consiste dois rotores de facas oscilantes e um rotor de talisca fixas. Cada rotor de facas oscilantes é composto um eixo central e seis eixos instalados a uma distância de 76 mm do centro. Por razões construtivas está dividido em quatro seções, delimitadas por flanges. Portanto em cada seção encontram-se seis articulações (segmentos de um eixo), onde, em cada uma delas estão acopladas duas facas independentes, presas a uma bucha. A montagem das facas nas buchas é tal que ao passarem três seções consecutivas, seria coberto toda extensão do colmo, a Figura 15 apresenta detalhes construtivos do rotor e da montagem das facas e buchas. Em cada articulação foram colocadas 2 facas, portanto 12 facas em cada seção, como o rotor é composto por 4 seções, cada rotor possui 48 facas.

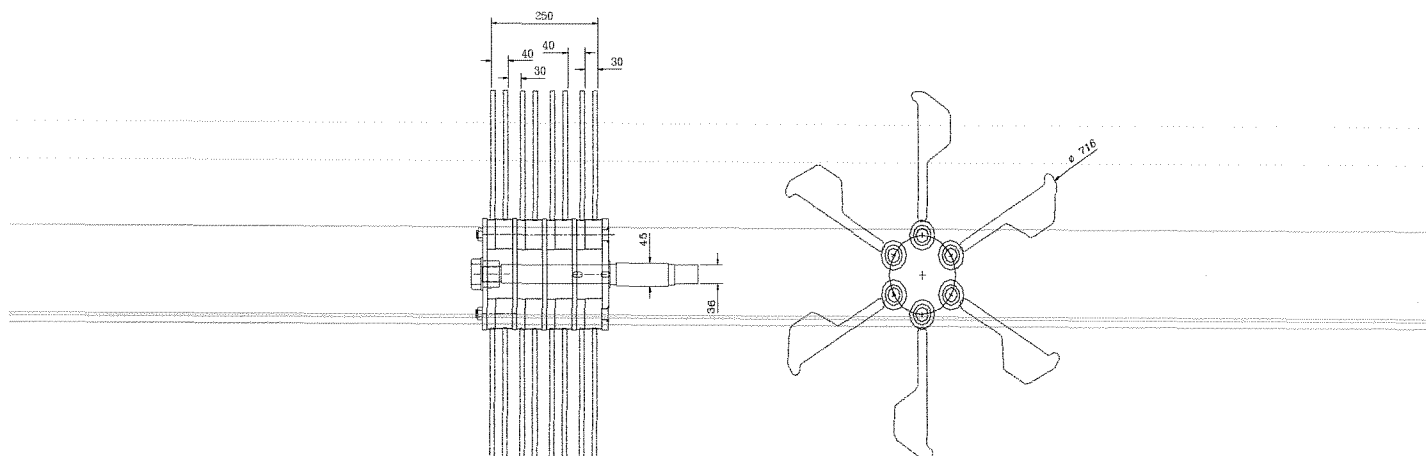


Figura 15 - Detalhes construtivos do rotor de facas oscilantes.

Com isso, considerando-se os dois rotores, tem-se um total de noventa e seis facas. Um dos rotores é instalado na parte superior da cana-de-açúcar, enquanto o outro é instalado na parte inferior, como mostra a Figura 16. Cada rotor tem um sentido de rotação diferente. Assim, o rotor instalado na parte superior gira em sentido anti-horário, e o rotor instalado na parte inferior, gira no sentido horário, com isso, os rotores, produzindo forças na direção de saída das cana-de-açúcar, estão realizando a limpeza nas partes superiores e inferiores delas. Um terceiro rotor instalado antes do rotor superior controla a velocidade de deslocamento da cana-de-açúcar, este rotor possui 0,25 m de diâmetro dotado de 16 taliscas onduladas de 0,025 m de altura, totalizando o diâmetro deste rotor em 0,3 m.

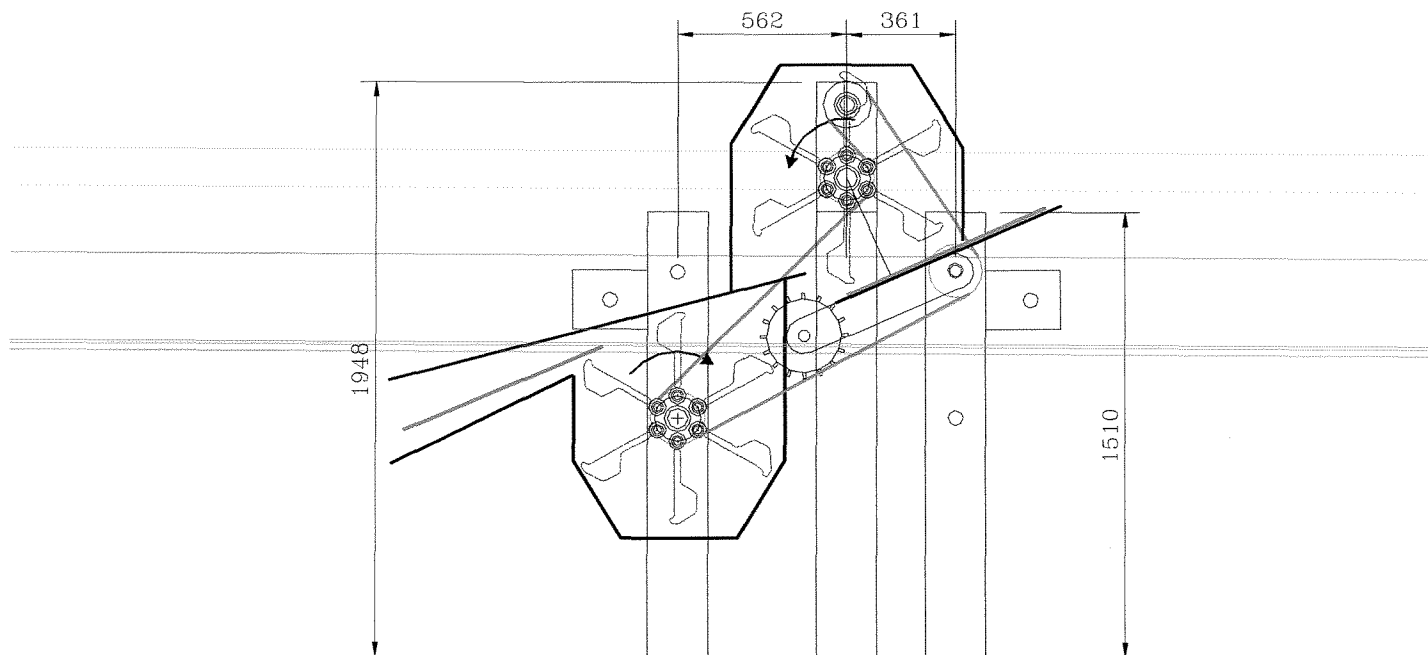


Figura 16 - Montagem do sistema de facas oscilantes.

Nas articulações foram usadas buchas de aço e de nylon (IGUS-GSM 252830 e IGUS-GSM 404440) para que as facas presas na mesma articulação possam ter movimentação independente umas das outras.

O acionador hidrostático, por meio de um eixo cardan, aciona os rotores através de um sistema de corrente e engrenagens.

5.2 - Métodos

Os ensaios foram realizados utilizando-se apenas uma faca para que pudesse ser avaliado os esforços produzidos para cada faca. O mecanismo foi instrumentado utilizando-se um transdutor tipo anel octogonal com fundo de escala de 20 kN, taxa de aquisição de dados de 1000 Hz, condicionador de sinais, placa de conversão analógico

digital, micro-computador portátil e voltímetro. A faca girando numa determinada rotação, entra em contato com a cana-de-açúcar que foi fixada no equipamento.

Nos primeiros ensaios utilizou-se uma faca como mostra a Figura 17, com os seguintes parâmetros:

$$m_2 = \text{massa da faca oscilante} = 828 \text{ g};$$

$$R_1 = \text{raio do rotor} = 0,076 \text{ m};$$

$$R_2 = \text{distância entre a articulação e o centro de massa da faca} = 0,184 \text{ m};$$

$$R_3 = \text{distância entre a articulação e a ponta da faca} = 0,286 \text{ m};$$

$$k = \text{coeficiente de rigidez da cana-de-açúcar} = 456079 \text{ N/m (FERRAZ, 1987);}$$

$$\alpha = \text{ângulo formado por } R_2 \text{ e } R_3 = 0,1482 \text{ rad};$$

$$I_{p2} = \text{momento polar de massa da faca oscilante} = 0,038 \text{ N m}^2$$

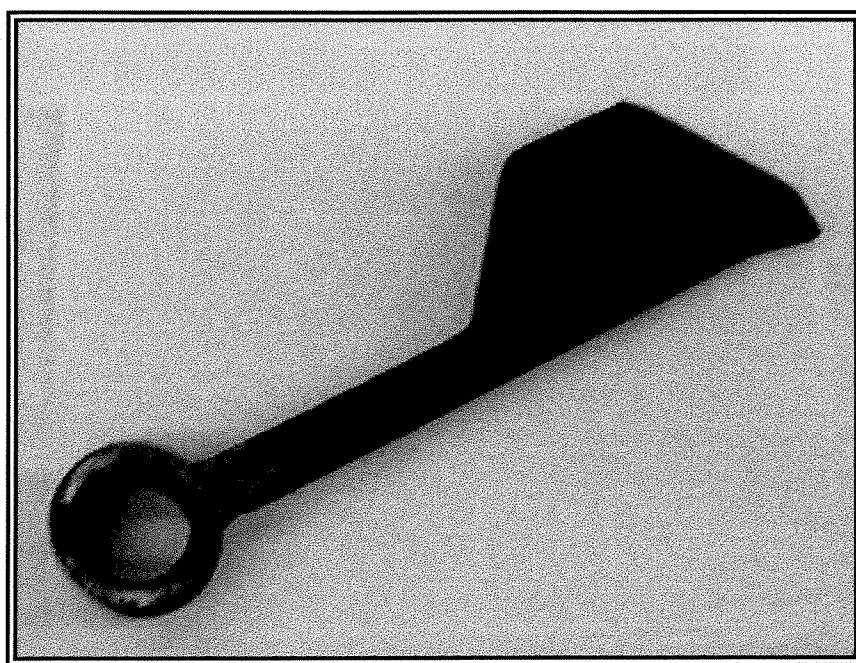


Figura 17 - Faca Oscilante de 828 g

Nos ensaios seguintes, foram construídas novas facas, desta vez, mais leves com 411 g cada, e a montagem do sistema de despalhe mudou. Sendo agora colocado três

facas em cada articulação, num total de 144 facas e molas. Com isso pode-se obter uma maior área de raspagem, facilitando desta forma o despalhe.

Durante os ensaios, foi utilizada uma única faca para que pudesse obter os esforços causados por cada faca individualmente. O mecanismo foi instrumentado, para avaliar as forças produzidas no despalhe. Sendo instalado, nos ensaios com a faca mais leve, um outro anel octogonal com fundo de escala de 2 kN para força vertical e de 1 kN para força horizontal, para obtenção dos sinais analógicos que passaram por um conversor de sinais digitais na taxa de 100 Hz ou 200 Hz. Estes sinais obtidos foram convertidos em sinais digitais através de uma placa de conversão analógica digital e então estes sinais foram armazenados na memória do computador. Os dados dos arquivos de saída foram, depois, analisados.

Os parâmetros utilizados para a segunda faca, mostrada na Figura 18, foram:

m_2 = massa da faca oscilante = 411 g;

R_1 = raio do rotor = 0,076 m;

R_2 = distância entre a articulação e o centro de massa da faca = 0,071 m;

R_3 = distância entre a articulação e a ponta da faca = 0,239 m;

k = coeficiente de rigidez da cana-de-açúcar = 456079 N/m (FERRAZ, 1987);

α = ângulo formado por R_2 e R_3 = 0,0041 rad;

k_m = constante da mola = 296,771 N/m;

I_{p2} = momento polar de massa da faca oscilante = 0,026 N m².

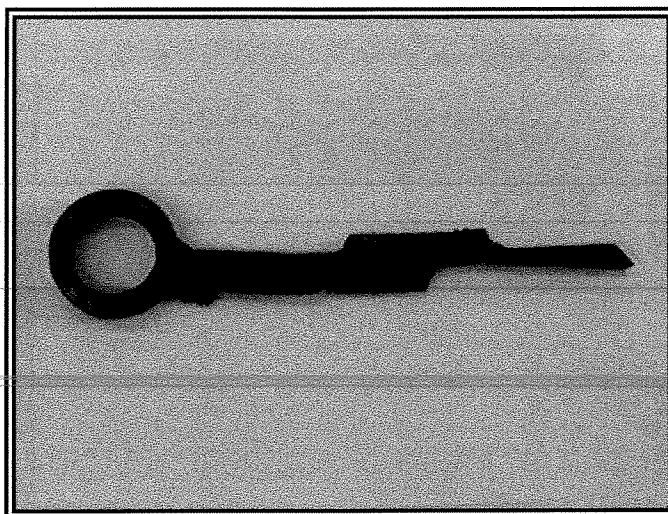


Figura 18 - Faca Oscilante de 411 g

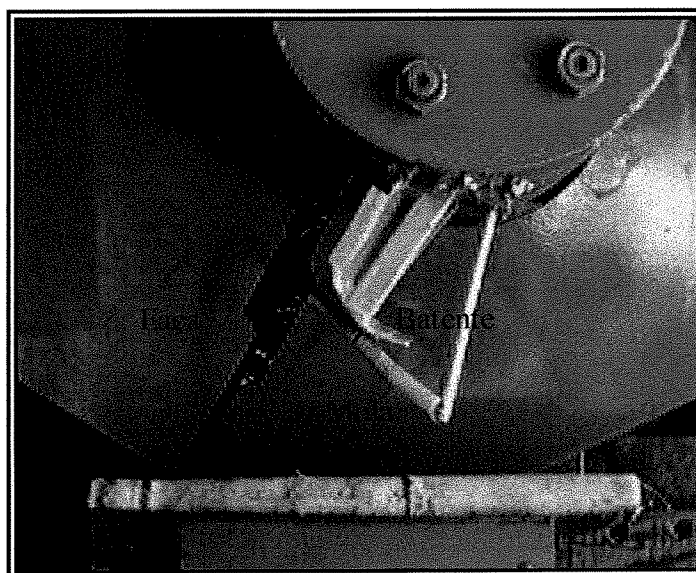


Figura 19 - Detalhe da faca oscilante em contato com a cana-de-açúcar.

5.2.1 - Calibração do Anel Octogonal

Os dados foram obtidos em mV necessitando de uma curva de calibração para transformá-los em N.

Para o anel octogonal com fundo de escala de 20 kN, a curva de calibração para a força vertical é dada pela equação:

$$y[\text{mV}] = -99,562 \times [\text{kN}] - 0,076$$

Enquanto a curva de calibração par a força horizontal é dada por:

$$y[\text{mV}] = -248,528 \times [\text{kN}] - 5,630$$

Para o anel octogonal com fundo de escala de 2 kN para força vertical e 1 kN para força horizontal, a curva de calibração para a força vertical é dada pela equação:

$$y[\text{mV}] = -119,56 \times [\text{N}] - 48,811$$

com correlação R^2 de 0,9992 que mostra uma boa representatividade dos dados obtidos para achar o equacionamento da curva. Enquanto a equação da curva de calibração que representa a força horizontal; é

$$y[\text{mV}] = -74,387 \times [\text{N}] + 65,517$$

com correlação R^2 de 0,9995.

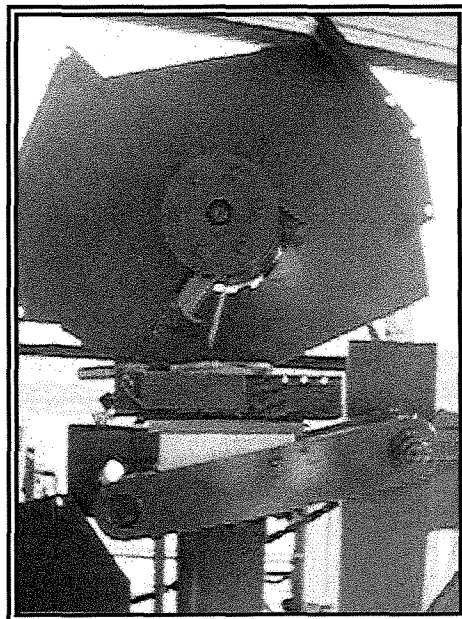


Figura 20 - Sistema para medição das reações da faca sobre a cana-de-açúcar

Durante os ensaios a cana-de-açúcar foi presa ao despalhador, para que se pudesse medir as forças provocadas por este. A velocidade de rotação do mecanismo foi

controlada através de um acionador hidráulico da velocidade variável e medida por um tacômetro, podendo-se desta forma analisar o despalhe sob diversas rotações.

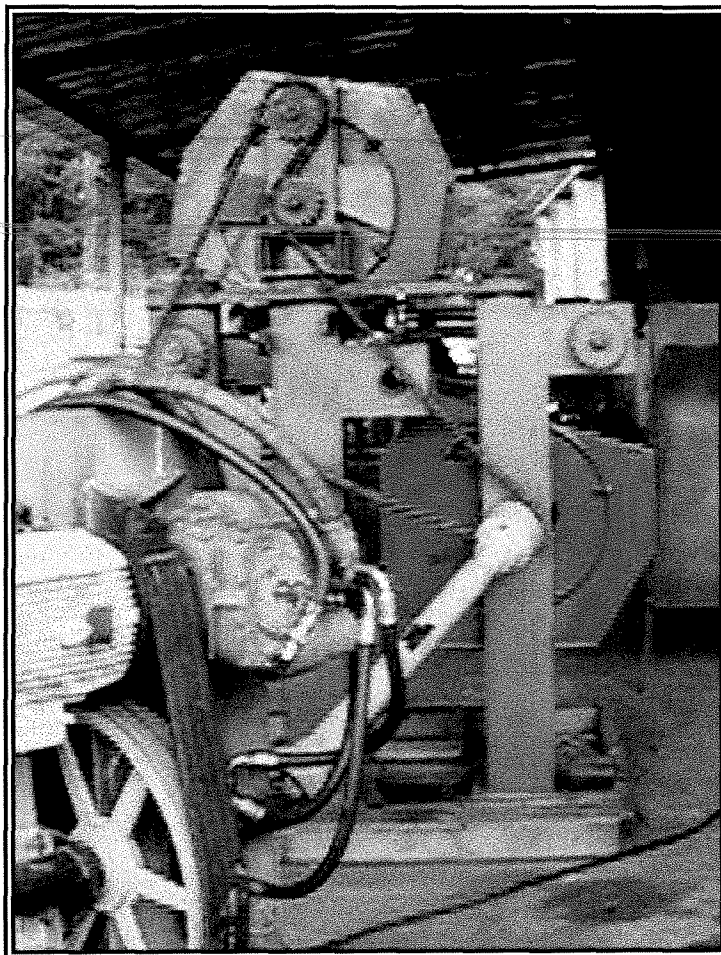


Figura 21 - Acoplamento do Acionador Hidráulico ao Despalhador Inercial

Os ensaios foram realizados no pátio do laboratório de protótipos do Departamento de Máquinas Agrícolas da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP.

De posse dos valores de força obtidos nos ensaios e nas equações pode-se comparar e avaliar a validade do modelo.

VI RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1- Resultado dos ensaios de laboratório

Primeiramente foi ensaiada a faca com 828 g, representada na figura 17, sem a mola. O gráfico da figura 22, apresenta um exemplo do tipo de resultado obtido dos valores de força horizontal e vertical em função do tempo.

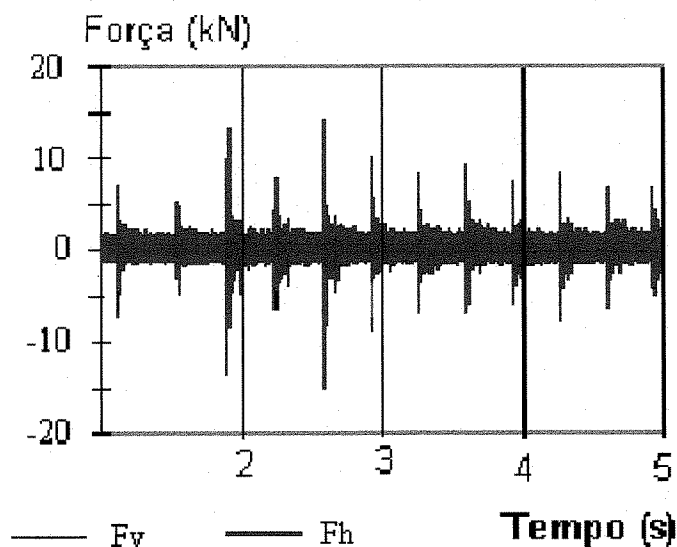


Figura 22 - Resultados do ensaio de laboratório de forças atuantes na cana-de-açúcar.

Pode-se observar por este gráfico que os picos de força horizontal e vertical coincidem. Estes picos são os impactos provocados pela faca quando esta atinge a cana-de-açúcar. A oscilação de força em torno destes picos ocorrem devido à oscilação da faca que depois do impacto sai do contato com a cana-de-açúcar e volta a atingi-la mais tarde. Os dados negativos mostrados no gráfico acontecem devido a oscilação da estrutura que após os impactos busca o seu equilíbrio.

A seguir são apresentadas as Tabelas 3 a 8 dos resultados da força vertical (F_v), em N, referente ao impacto da faca sobre a cana-de-açúcar, a força horizontal (F_h) no impacto, em N, o tempo (t), em segundo e o intervalo de tempo entre picos em segundo.

Em cada caso são apresentados também média das forças, o desvio padrão, o coeficiente de variação, o fator de atrito que é a relação entre a média das forças horizontais e a média das forças verticais e a pressão média que representa a força aplicada na área de contato entre a faca e a cana-de-açúcar.

Tabela 3- Resultado dos esforços de uma faca de 828 g sem mola com velocidade angular de 19,5 rad/s

F_v (N)	F_h (N)	t (s)	Intervalo de t (s)
2537,20797	375,197	0,1	0,100
4241,45055	406,670	0,316	0,216
9084,43985	846,724	0,679	0,363
4118,84353	556,931	1,000	0,321
9683,66003	782,871	1,343	0,343
6190,90717	517,637	1,669	0,326
6877,50849	483,255	2,005	0,336
6852,98608	497,99	2,327	0,322
7662,19542	586,402	2,674	0,347
6264,47138	266,755	3,075	0,401
10347,2911	463,608	3,322	0,247
11610,1525	846,724	3,661	0,339
4327,27547	483,255	3,966	0,305

Média da força vertical de impacto = 6907,568 N;

Média da força horizontal de impacto = 547,232 N;

Desvio padrão da força vertical = 2716,234 N;

Desvio padrão da força horizontal = 178,663 N;

Coeficiente de variação da força vertical = 0,3932;

Coeficiente de variação da força horizontal = 0,3265;

Média do intervalo de tempo para cada impacto = 0,3222 s;

Fator de atrito calculado = 0,0792;

Pressão Média = 10,75 MPa.

Tabela 4 - Resultado dos esforços de uma faca de 828g sem mola com velocidade angular de 25,68 rad/s

Fv (N)	Fh (N)	t (s)	Intervalo de t (s)
9600,282	1147,5282	1,262	1,262
7528,219	940,3219	1,598	0,336
9256,978	1113,1978	1,927	0,329
8128,996	1000,3996	2,255	0,328
11181,919	1305,3919	2,553	0,298
11696,865	1357,1865	2,805	0,252
4892,161	6767,161	3,043	0,238
9624,809	11499,809	3,260	0,217
8754,296	10629,296	3,4969	0,2369
9747,416	11622,416	3,676	0,1791
8962,729	10837,729	3,879	0,203
887,903	10751,903	4,085	0,206
11414,87	13289,87	4,289	0,204
9710,625	11585,625	4,496	0,207
11414,87	13289,87	4,703	0,207
7506,398	9378,698	4,931	0,228

Média da força vertical de impacto = 9268,646 N;

Média da força horizontal de impacto = 11143,290 N;

Desvio padrão da força vertical = 1761,242 N;

Desvio padrão da força horizontal = 1761,205 N;

Coeficiente de variação da força vertical = 0,1900;

Coeficiente de variação da força horizontal = 0,1581;

Média do intervalo de tempo = 0,2446 s;

Fator de atrito calculado = 1,2023;

Pressão Média = 14,43 MPa.

Observamos por estes resultados que a pressão exercida por esta faca na superfície da cana-de-açúcar é muito alta, 10,75 MPa e 14,43 MPa com velocidade de 19,50 rad/s e 25,68 rad/s respectivamente, que segundo PAGNANO *et.al.* está acima do suportado pela cana (4,90 MPa), provocando danos à estrutura da cana-de-açúcar e não realizando a raspagem sobre a superfície inviabilizando o conceito de retirar as folhas por atrito.

Com base nos resultados acima, reduzimos a massa da faca e introduzimos a mola, com o objetivo de evitar que a faca oscilasse demasiadamente e gerasse forças de impacto muito altas. O desenho desta faca está mostrado na Figura 18. E foi projetada com o mesmo princípio de atuação que a faca anterior, agora um número de 3 facas deve ser responsável pela raspagem da largura da cana-de-açúcar, conforme descrito na item 5.1.1.

Tabela 5 - Resultado dos esforços de uma faca de 411g com mola com 11,03 rad/s

Fv (N)	Fh (N)	t (s)	Intervalo de t (s)
742,299	409,129	0,290	0,290
178,565	392,243	0,905	0,615
380,974	309,649	1,61	0,705
456,25	222,268	2,150	0,540
490,543	392,997	2,645	0,495
331,627	484,411	3,265	0,620
252,169	120,100	3,980	0,715
202,821	349,979	4,520	0,540
396,866	680,682	5,025	0,505
242,132	382,243	5,580	0,555
401,048	379,554	6,315	0,735
263,878	293,517	6,895	0,580
762,73	395,686	7,330	0,435
415,267	263,942	8,050	0,720
278,097	251,843	8,595	0,545
256,351	181,939	9,170	0,575
421,122	527,429	9,680	0,510

Média da força vertical de impacto = 380,728 N;

Média da força horizontal de impacto = 355,154 N;

Desvio padrão da força vertical = 167,327 N;

Desvio padrão da força horizontal = 134,362 N;

Coefficiente de variação da força vertical = 0,4395;

Coefficiente de variação da força horizontal = 0,4395;

Média do intervalo de tempo = 0,5694 s;

Fator de atrito calculado = 0,9328;

Pressão Média = 1,915 MPa.

Tabela 6 - Resultado dos esforços de uma faca de 411g com mola com 16,09 rad/s

Fv (N)	Fh (N)	t (s)	Intervalo de t (s)
322,482	199,83	0,185	0,185
1227,466	764,445	0,535	0,350
447,105	357,116	0,975	0,440
401,940	1170,43	1,340	0,365
1408,965	600,438	1,740	0,400
540,782	514,401	2,180	0,440
234,660	304,687	2,590	0,410
350,919	373,248	3,045	0,455
318,300	1056,163	3,340	0,295
329,173	504,991	3,775	0,435
802,575	550,698	4,135	0,360
380,193	849,137	4,530	0,395
604,348	350,394	4,970	0,440
435,396	288,555	5,385	0,415
269,788	363,837	5,800	0,415
504,817	589,683	6,235	0,435
1470,022	1062,884	6,545	0,310
478,052	1112,624	6,980	0,435
544,964	603,126	7,400	0,420
806757	912,320	7,75	0,35
367,647	429,709	8,21	0,46
534,927	1167,741	8,555	0,345
1315,288	892,155	8,96	0,405
1374,673	1072,294	9,36	0,4
810,939	1105,902	9,765	0,405

Média da força vertical de impacto = 651,287 N;

Média da força horizontal de impacto = 687,872 N;

Desvio padrão da força vertical = 394,776 N;

Desvio padrão da força horizontal = 323,493 N;

Coeficiente de variação da força vertical = 0,6061;

Coeficiente de variação da força horizontal = 0,4703;

Média do intervalo de tempo = 0,3920 s;

Fator de atrito calculado = 1,0562;

Pressão Média = 3,275 MPa.

Tabela 7 - Resultado dos esforços de uma faca de 411g com mola com 21,51 rad/s

Fv (N)	Fh (N)	t(s)	Intervalo de t (s)
139,08	160,864	0,02	0,02
394,182	685,149	0,27	0,25
1503,248	483,501	0,57	0,30
129,043	971,489	0,94	0,37
1489,866	315,46	1,17	0,23
507,096	297,984	1,48	0,31
1553,433	417,629	1,77	0,29
486,186	558,783	2,08	0,31
402,546	804,793	2,39	0,31
1004,754	146,076	2,71	0,32
549,752	472,746	2,98	0,27
287,123	217,325	3,33	0,35
1049,92	136,666	3,58	0,25
252,83	248,244	3,95	0,37
250,321	956,702	4,18	0,23
1287,457	293,951	4,48	0,30
494,55	541,306	4,78	0,3
464,44	763,119	5,15	0,37
822,419	187,75	5,42	0,27
400,873	1331,767	5,70	0,28
231,92	741,61	6,00	0,30
436,002	638,097	6,36	0,36
355,708	421,662	6,61	0,25
655,975	893,518	6,89	0,28
341,489	678,427	7,21	0,32
936,169	248,244	7,55	0,34
195,955	556,094	7,82	0,27
144,098	642,13	8,11	0,29
1437,173	221,358	8,40	0,29
139,916	417,629	8,77	0,37

Continuação da Tabela 7			
Fv (N)	Fh (N)	t(s)	Intervalo de t (s)
255,339	539,962	9,07	0,30
513,784	1027,951	9,34	0,27
334,798	595,079	9,64	0,30
157,481	182,373	9,93	0,29

Média da força vertical de impacto = 576,615 N;

Média da força horizontal de impacto = 523,395 N;

Desvio padrão da força vertical = 440,972 N;

Desvio padrão da força horizontal = 295,192 N;

Coefficiente de variação da força vertical = 0,7648;

Coefficiente de variação da força horizontal = 0,5640;

Média do intervalo de tempo = 0,2921 s;

Fator de atrito calculado = 0,9077;

Pressão média = 2,90 MPa.

Tabela 8 - Resultado dos esforços de uma faca de 411g com mola com 24,88 rad/s.

Fv (N)	Fh (N)	t (s)	Intervalo de t (s)
68,795	26,953	0,05	0,05
198,437	134,499	0,24	0,19
375,754	880,597	0,56	0,32
313,86	174,829	0,84	0,28
179,199	177,517	1,14	0,30
757,152	648,03	1,40	0,26
394,991	282,374	1,63	0,23
497,868	138,532	1,94	0,31
596,563	235,323	2,19	0,25
94,723	189,616	2,47	0,28
314,696	735,41	2,67	0,20

Continuação da Tabela 8			
Fv (N)	Fh (N)	t(s)	Intervalo de t (s)
239,42	146,598	2,97	0,30
124,833	294,473	3,22	0,25
613,291	1021,751	3,44	0,22
292,95	1250,285	3,73	0,29
81,341	650,718	4,03	0,30
233,565	192,305	4,22	0,19
614,964	177,517	4,50	0,28
628,346	810,692	4,72	0,22
528,815	540,484	5,01	0,29
756,316	615,766	5,23	0,22
290,441	557,96	5,50	0,27
1110,113	102,235	5,74	0,24
240,257	1093,00	6,01	0,27
271,203	506,876	6,25	0,24
122,324	177,517	6,58	0,33
807,336	51,6,286	6,76	0,18
430,12	44,3,693	7,05	0,29
278,731	119,7,857	7,32	0,27
420,919	356,312	7,56	0,24
1609,444	536,451	7,78	0,22
240,257	340,18	8,08	0,30
344,807	424,872	8,29	0,21
400,009	799,938	8,58	0,29
425,101	920,927	8,8	0,22
230,22	404,707	9,09	0,29
1465,583	204,404	9,31	0,22
157,453	412,773	9,62	0,31
586,526	1235,498	9,85	0,23

Média da força vertical de impacto = 444,531 N;

Média da força horizontal de impacto = 501,430 N;

Desvio padrão da força vertical = 344,236 N;

Desvio padrão da força horizontal = 345,722 N;

Coefficiente de variação da força vertical = 0,7744;

Coeficiente de variação da força horizontal = 0,6895;

Média do intervalo de tempo = 0,2526 s;

Fator de atrito calculado = 2,235;

Pressão Média = 2,24 MPa.

Pode-se observar nos ensaios realizados com a faca de 411g que a pressão média foi menor que 4,90 MPa. Desta forma a cana-de-açúcar pode suportar estes esforços sem que haja rompimento da sua estrutura. A média do intervalo de tempo em cada caso refere-se ao intervalo entre picos de impacto, ou seja, representa o intervalo entre uma rotação e outra. O coeficiente de variação tanto das forças verticais como das forças horizontais mostrou-se alto, isto acontece devido às mudanças das condições iniciais após a primeira rotação, as oscilações da faca após o primeiro impacto faz com que a nova velocidade de rotação de entrada seja diferente e assim sucessivamente, o que causa variação nos valores dos picos de impacto.

6.2- Resultado das Equações de LAGRANGE resolvidas pelo programa computacional MATHEMATICA 2.2.3

A seguir são apresentados os resultados obtidos da simulação utilizando-se o equacionamento desenvolvido e apresentado no Capítulo 4, numericamente, utilizando-se para isto os recursos computacionais disponíveis no programa Mathematica. Para obter uma solução numérica do problema proposto, utilizamos como dado de entrada os valores

utilizados no teste de laboratório para massa, velocidade angular, dimensões, e o valor do coeficiente de raspagem obtido experimentalmente

- Faca de 828g sem mola com 19,50 rad/s

Força vertical de impacto = 4275,48 N;

Força horizontal de impacto = 338,62 N;

Pressão Média = 6,65 MPa.

- Faca de 828g sem mola com 25,68 rad/s

Força vertical de impacto = 3218,78 N;

Força horizontal de impacto = 3869,94 N;

Pressão Média = 5,01 MPa.

- Faca de 411g com mola com 11,03 rad/s

Força vertical de impacto = 438,1 N;

Força horizontal de impacto = 408,7 N;

Pressão Média = 2,20 MPa.

- Faca de 411g com mola com 16,09 rad/s

Força vertical de impacto = 613,9 N;

Força horizontal de impacto = 648,4 N;

Pressão Média = 3,09 MPa.

- Faca de 411g com mola com 21,51 rad/s

Força vertical de impacto = 858,8 N;

Força horizontal de impacto = 925,0 N;

Pressão Média = 4,32 MPa.

- Faca de 411g com mola com 24,88 rad/s

Força vertical de impacto = 930,1 N;

Força horizontal de impacto = 1049,1 N;

Pressão Média = 4,68 MPa.

Durante a resolução das equações de Lagrange observou-se que a faca com mola entra em contato com a cana e depois se retrai para atingi-la instantes depois e assim sucessivamente até que saia definitivamente (Figura 23). Durante os ensaios isto não pôde ser observado, dando a impressão que a cana permanece o tempo todo sobre a cana realizando a raspagem. Isto talvez se dê devido ao tipo de instrumentação utilizada, onde devido a ruídos foi impossível detectar pequenas oscilações na força normal, como mostra a Figura 25.

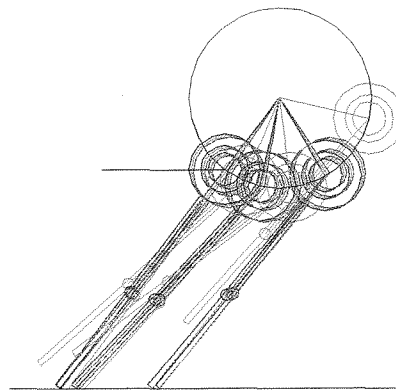


Figura 23 - Simulação da posição de uma faca, mostrando o contato e a retração até o último contato com a cana-de-açúcar

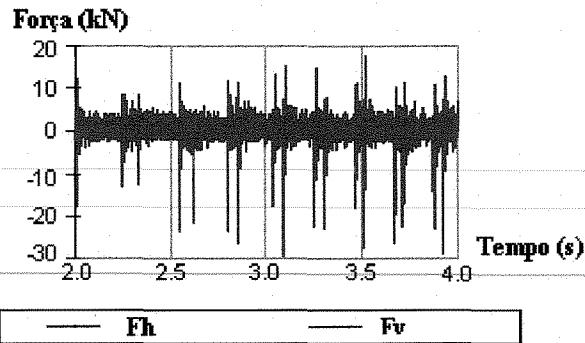


Figura 24 - Sequência de impactos faca de 828 g com velocidade de 25,68 rad/s

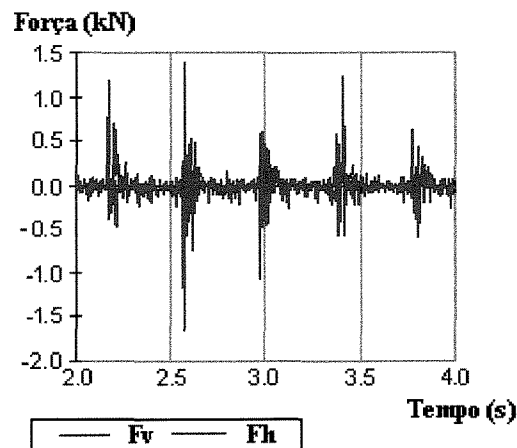


Figura 25 - Sequência de impactos faca de 411 g com velocidade de 16,09 rad/s

Portanto para comparar os resultados obtidos nos ensaios práticos com a teoria, considerou-se apenas o primeiro impacto obtido pelas equações, que é o mais alto e está mostrado na Figura 26.

A pressão média produzidas pela primeira faca que pesava 828 g, obtidas pelo método de Lagrange, foi de 10,75 MPa e 14,43 MPa, maior do que o necessário para despalhar a cana-de-açúcar, nas velocidades de rotação de 6,65 rad/s e 5,01 rad/s, sendo que a força suportada pela cana é de 4,90 MPa, segundo PAGNANO, *et.al.* (1995).

Os valores obtidos com as facas mais leves (411 g) nas velocidades de 11,03 rad/s e 16,08 rad/s, com taxa de aquisição nos ensaios práticos de 200 Hz, foi de 1,915 MPa e 3,275 MPa, enquanto que através do método de Lagrange, estes valores foram de 2,20 MPa e 3,09 MPa. Estes resultados mostram uma grande proximidade entre os valores teóricos e práticos obtidos.

Os resultados dos ensaios, com as facas mais e leve com mola, obtidos com rotações mais altas mostram erro se comparado com os dados obtidos pelas equações de Lagrange, uma vez que a taxa de aquisição nos ensaios de 21,51 rad/s e 24,88 rad/s foi muito baixa, 100 Hz. Desta forma, nem todos os picos puderam ser registrados.

A diferença dos resultados, teóricos e práticos, apresentados para a faca de 828 g deve-se ao grande nível de ruídos durante os experimentos, que mascarava os resultados obtidos, mesmo com uma alta taxa de aquisição (1000 Hz), sendo, desta forma, impossível a comparação dos resultados práticos e teóricos.

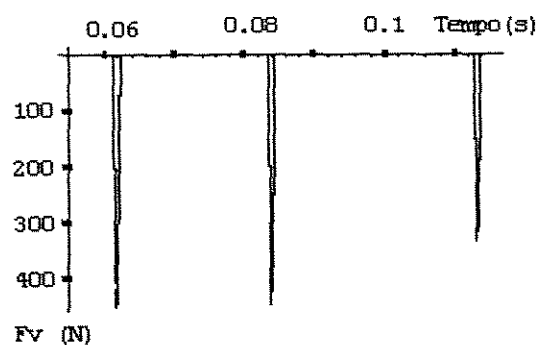


Figura 26 - Força vertical calculada por Lagrange para faca de 411 g com velocidade de 16,09 rad/s

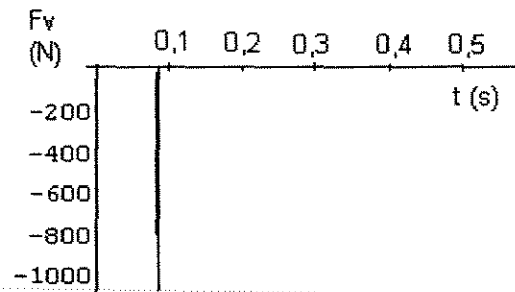


Figura 27 - Força vertical calculada por Lagrange para faca de 828 g com velocidade de 25,68 rad/s

VII CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos durante os ensaios e na resolução das equações de Lagrange, nos permite concluir que:

- ⇒ a faca de 828 g provoca uma pressão sobre a cana-de-açúcar superior a suportada, 4,9 MPa, fazendo com que haja danos a sua estrutura, perda de açúcar e comprometimento das gemas;
- ⇒ o alto nível de ruídos apresentados nos ensaios práticos da faca de 828 g, fez com que não fosse possível a comparação com os dados teóricos, que como apresentado, são muito mais baixos, mas ainda assim superiores a 4,90 MPa.
- ⇒ a passagem da faca mais leve sobre a cana-de-açúcar provocou uma raspagem aparentemente adequada ao despalhe, sem que provocasse danos visíveis a mesma;
- ⇒ a força vertical teórica de despalhe é dependente da rotação utilizada, sendo maior conforme aumenta a rotação, para rotações de 11,03, 16,09 21,51 e 24,88 rad/s os valores das forças verticais foram 380,7, 613,9, 858,8 e 931,0 N respectivamente, o mesmo não foi verificado na força vertical experimental;
- ⇒ nos ensaios com baixa rotação, 11,03 e 16,09 rad/s, os valores de força vertical e horizontal obtidos pelo método de Lagrange foram bastante representativos, apresentando erro de 15,08% no primeiro caso e 5,74% no segundo caso. Em 11,03 rad/s a força foi superestimada, enquanto que em 16,09 rad/s a mesma foi subestimada;

- ⇒ nos ensaios com alta rotação, 21,51 e 24,88 rad/s, a taxa de aquisição foi de 100 Hz e os valores provenientes do método de LAGRANGE superestimam as forças em 48,94% em 21,51 rad/s e 109,25% em 24,88 rad/s.
- ⇒ o item anterior aconteceu devido à baixa taxa de aquisição de dados nestes ensaios, que impossibilitou a coleta correta dos picos de impacto ocorridos;
- ⇒ através dos dados obtidos, a variação do fator de atrito, que relaciona a força horizontal com a vertical, não depende da rotação estabelecida;
- ⇒ O mecanismo para despalhar a cana-de-açúcar tal como foi projetado e construído primeiramente não se mostrou adequado para remoção da palha da cana-de-açúcar. O princípio de facas oscilantes parece ser válido, mas o dimensionamento do mecanismo necessita de alterações.
- ⇒ Para trabalhos futuros, sugere-se a otimização do mecanismo, alterando suas dimensões de forma a aumentar o tempo de contato da faca com o colmo de cana-de-açúcar, mantendo as forças aplicadas sobre o mesmo dentro dos valores recomendados.

VIII- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABE, M., KOJIMA, S., MIYABE, Y. Studies on the Development of a Leaf-Stripping System for a Sugarcane. Bulletin of the Faculty of Agriculture, Kagoshima University. Kagoshima, Japan. No. 29, p. 217-224, 1979

AMORIM, G., Polêmica na Colheita da Cana é Fogo. O Estado de São Paulo. Suplemento Agrícola, p12,13. São Paulo, Brasil, 14 de Fevereiro, 1996.

BRAUNBECK, O.A., MAGALHÃES, P.S.G. Proposta para uma Colhedora de Cana-de Açúcar Crua e Inteira. Proposta apresentada à Secretária de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo. Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP. Campinas, São Paulo. 1992.

BEER, A.G., PILCHER, J.R., BOAST, M.M., MEYER, E., Mechanical Green Cane Harvesting. In Proceedings of the XIX Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists. Vol 1. Jakarta, Indonesia. 21-31 August, 1986.

CAMPOS, M.S., MARCONATO, A., Sistema CanaCrua x Sistema Cana Queimada CLAAS 2000. STAB, Vol. 12, Nº 3, p.10-16. Janeiro-Fevereiro, 1994.

CERRI, C., Gafanhotos de Aço. Globo Rural, Nº 120, p. 75-79. Outubro, 1995.

CLAYTON, J.E. Florida - Progresos en el Cosechamiento y Limpeza en Seco de la Caña de Azúcar. Sugar y Azúcar, agosto, 1971.

CLAYTON, J.E., WHITTEMORE, H.D., Systems for Cleaning Immature Tops and Other Trash from Sugarcane. In Proceedings of the XIV Congress of the International

Society of Sugar Cane Technologists. New Orleans, Louisiana, USA. October 22-November 5, 1971.

CORTEZ, L.A., MAGALHÃES, P.S.G., HAPP, J. Principais Subprodutos da Agroindústria Canavieira e sua Valorização. Revista Brasileira de Energia, v. 2, n. 2, p. 111-146, 1992.

FERNANDES, A.C., OLIVEIRA, E.R., QUEIROZ, L. Sugar Cane Trash Measurements in Brazil. In Proceedings of the XVI Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists. São Paulo, SP, Brazil. 9-20 September, 1977.

FERNANDES, A.C., IRVINE, J.E., Comparação da Produtividade da Cana-de-Açúcar por Colheita Mecanizada e por Corte Manual. STAB, Vol. 4, Nº 6. Julho-Agosto, 1986.

FERRAZ, A.C.O., Propriedades Mecânicas do Internódio da Cana-de-Açúcar: uma Contribuição Metodológica. (Tese de Mestrado, FEAGRI, UNICAMP), Campinas, SP, 1987

FOGLIATA, F.A., LEIDERMAN, J., MATIUSSI, R.E. Effects of Trash Burning on the Temperature and Microbial Population of the Soil. In Proceedings of the Thirteenth Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists. Taiwan, 1968.

FURLANI NETO, V.L., Colhedora de Cana de Açúcar (*Saccharum spp*) Avaliação em Canaviais com e sem Queima Prévia. (Tese de Doutorado, ESALQ, USP), Piracicaba, SP, 1995.

MAGALHÃES, P.S.G., Colheita de Cana-de-açúcar - Atualidade e Perspectiva. Notas internas não publicadas, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, 1993.

_____ Dispositivo para Permitir a Colheita de Cana-de-Açúcar Verde e Inteira. Notas internas não publicadas, Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, 1994.

MIYABE, Y., ABE, M. Fundamental Studies on Developing a Leaf-Stripping Machine for Sugarcane. I. The Pulling Force Needed for Leaf Detachment. Bulletin of the Faculty of Agriculture, Kagoshima University. Kagoshima, Japan. No. 26, p. 271-276, 1976.

MIYABE, Y., ABE, M., KOJIMA, S. (a) Fundamental Studies on Development of a Leaf-Stripping Machine for Sugarcane. II. The Penetratin, Bending, Cutting and Crushing Resistance of a Sugarcane Stalk. Bulletin of the Faculty of Agriculture, Kagoshima University. Kagoshima, Japan. No. 29, p. 231-243. 1979.

_____ (b) Fundamental Studies on the Development of a Leaf-Stripping Machine for Sugarcane. III. The Impact Resistance of a Sugarcane Stalk. Bulletin of the Faculty of Agriculture, Kagoshima University. Kagoshima, Japan. No. 29, p. 245-248, 1979.

PAGNANO, N.B., MAGALHÃES, P.S.G., BRAUNBECK, O. Estudo de Algumas Propriedades Mecânicas da Cana-de-Açúcar: Resistência à Compressão e Remoção de Folhas. Separata do XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Viçosa, MG, 1995.

PATENTE : Brasil PI 203.875 de 11 de nov. de 1968 "Despalhador de Cana-de-açúcar com Bastões e ou Chicotes de Material Flexível", Código de Recuperação: PMA/BR 004

RIPOLI, T.C., VILLANOVA, N.A. Colheita Mecanizada da Cana-de-Açúcar: Novos Desafios. STAB, Vol 11, Nº1, p.28-31. Setembro-Outubro, 1992.

RIPOLI, T.C., Relatório Técnico sobre Temperatura e Exudação do Canavial. não publicado. DER, ESALQ. 1996.

SERRA, G.E., PUPIN, A.M, TOLEDO,M.C.F., Ensaio Preliminares sobre a Contaminação da Cana-de-Açúcar e Derivados por Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos. Boletim da SBCTA. Vol 29, Nº2, p.134-137. Julho-Dezembro, 1995.

SCOTT, D.A., Development of the Centurion Whole-Stalk Cane Harvester. In Proceedings of the XVIII Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists. Ciudad de la Habana, Cuba. 21-26 February, 1986.

SHUKLA, L.N., SINGH, I., SANDHAR, N.S. Design Development and Testing of Sugarcane Cleaner. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. Ludhiana, India. v. 22, n. 3, p. 55-58., 1991.

SOARES, G.C., BALBO, L., PINTO, A.R., Colheita Mecânica de “Cana-Picada”, STAB, Vol. 12, Nº 3, p. 10-20. Janeiro-Fevereiro, 1994.

SRIVASTAVA, A.C. An Investigation of Sugarcane Detrashing. Indian Institute of Sugarcane Research. Lucknow, India: American Society of Agricultural Engineers, 1987. 16 p. Paper No. 87-5054.

SRIVASTAVA, A.C., SINGH, S.K. Development of a Power-Driven Sugarcane Detrasher. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. India. v. 21, n. 2, p. 49-52, 1990.

TAMBOSCO, N., TEIXEIRA, J.P.B., GERALDI FILHO, L., USTULIN, E.J., HENRIQUE, J.L.de P., ALONSO, O., CORREA, W.J., FRANCESCHI, L.R., GERALDI, R.N., SALATA, J.C., SERRA, G.E., Trash in Mechanical and Manual Harvesting of Sugarcane. In Proceedings of the XVI Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists. São Paulo, SP, Brazil. 9-20 September, 1977.

TANAKA, F.O., Dispositivo para Despalhe de Cana-de-Açúcar (*Sacharum ssp*) Crua por Rolos Oscilantes com Diferencial de Velocidades. (Tese de Mestrado, FEAGRI, UNICAMP), Campinas, SP, 1996.

UENO, M., IZUMI, H., Development of the Top-Turning Type Green Cane Harvester. In Proceedings of the XVIII Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists, Ciudad de la Habana, Cuba. 21-26 February, 1983.

VEIGA FILHO, A.A, RODRIGUES, A.P., ZIMBACK, L., LANDELL, M., ROSSETO, R., YOSHII, R.J., Cadeia Agroindustrial do Açúcar, Alcool e Sub-Produtos, Repensando a Agricultura Paulista, Versão Preliminar para Discussão, Secretaria de Agricultura e Abastecimento, São Paulo, 1996.

APÊNDICE

Modelagem Matemática sem mola pelo Método de Lagrange

Parâmetros de Entrada

ip2=0.0038;

r1=0.076;

r2=0.18;

r3=0.29;

w=11.03;

mi=0.93;

k=456079;

km=296.77;

alfa=0.148;

m2=0.83;

g=9.81;

Primeira Parte

Dentro da Cana

y=r1 Sin[w t]+r3 Sin[t2[t]+alfa];

f2=-k (y-0.31102607)/N;

f1=-mi f2;

yy=y-0.31102607;

Equação de Lagrange com suas condições iniciais

eq1={ (ip2 +m2 r2^2) t2'[t]- m2 r1 r2 w^2 Sin[w t-t2[t]]-m2 g r2 Cos[t2[t]]-f2 r3
Cos[t2[t]+alfa]+f1 r3 Sin[t2[t]+alfa]==0, t2[0.08342278]==0.92053028,
t2'[0.08342278]==11.0345197};

Resolução da equação no intervalo citado

soln=NDSolve[eq1, t2, {t,0.08342278, 0.1}];

solnum=t2/.soln[[1]];

y=r1 Sin[w t]+r3 Sin[solnum[t]+alfa];

f2=-k (y-0.31102607)/N;

yy=y-0.31102607/N;

Tabela dos parâmetros variáveis no intervalo

dados1=Table[{t,w t,solnum[t],yy,f2},{t,0.08342278,0.09,0.0001}]

Gráficos

graf1=Plot[Evaluate[f2],{t,0.08342278,0.09},

AxesLabel->{"tempo","f2"}]

graf2=Plot[Evaluate[solnum[t]],{t,0.08342278,0.09},

AxesLabel->{"tempo","t2"}]

graf3=Plot[Evaluate[yy],{t,0.08342278,0.09},

AxesLabel->{"tempo","yy"}]

Primeira raiz da equação

```
FindRoot[-k (r1 Sin[w t]+r3 Sin[solnum[t]+alfa]-0.31102607)==0,
{t,0.0871228}]
```

Valor da raiz encontrada

```
{t -> 0.0870852}
```

```
t=t/.%[[1]];
```

```
t01=0.08342278;
```

```
t0=t;
```

Cálculo de teta 2 (ci10) e w (ci11) no novo tempo inicial usado na próxima etapa

```
ci10=solnum[t]
```

```
ci11=(solnum[t]-solnum[t-0.0001])/0.0001
```

```
t=.
```

Gráficos da primeira parte

```
grf21=Plot[Evaluate[f2],{t,t01,t0},
AxesLabel->{"tempo","f2"}]
```

```
gryy1=Plot[Evaluate[yy],{t,t01,t0},
AxesLabel->{"tempo","yy"}]
```

```
grteta21=Plot[solnum[t],{t,t01,t0},
AxesLabel->{"tempo","t2"}]
```

Segunda Parte

Fora da Cana

```
y=r1 Sin[w t]+r3 Sin[t2[t]+alfa];
```

```
f2=0;
```

```
f1=0;
```

```
yy=y-0.31102607;
```

Equação de Lagrange com suas condições iniciais

```
eq1={ (ip2 +m2 r2^2) t2'[t]- m2 r1 r2 w^2 Sin[w t-t2[t]]-m2 g r2 Cos[t2[t]]-f2 r3
Cos[t2[t]+alfa]+f1 r3 Sin[t2[t]+alfa]==0, t2[t0]==ci10, t2'[t0]==ci11};
```

Resolução da equação no intervalo citado

```
soln=NDSolve[eq1, t2, {t,t0, 0.6}];
```

```
solnum=t2/.soln[[1]];
```

```
y=r1 Sin[w t]+r3 Sin[solnum[t]+alfa];
```

```
yy=y-0.31102607//N;
```

Tabela dos parâmetros variáveis no intervalo

```
dados1=Table[{t,solnum[t],w t,yy},{t,t0,0.6,0.0001}]
```

Gráficos

```
graf1=Plot[Evaluate[yy],{t,t0,0.6},
  AxesLabel->{"tempo","yy"}]
graf2=Plot[Evaluate[solnum[t]],{t,t0,0.6},
  AxesLabel->{"tempo","t2"}]
```

Gráficos da segunda parte

```
grf22=Plot[Evaluate[f2],{t,t0,0.5694},
  AxesLabel->{"tempo","f2"}]
gryy2=Plot[Evaluate[yy],{t,t0,0.5694},
  AxesLabel->{"tempo","yy"}]
grteta22=Plot[solnum[t],{t,t0,0.5694},
  AxesLabel->{"tempo","t2"}]
```

Apresentação dos gráficos no intervalo de uma rotação

```
Show[grf21,grf22]
Show[gryy1,gryy2]
Show[grteta21,grteta22]
```

Modelagem Matemática com mola pelo Método de Lagrange

Parâmetros de entrada

```
SetOptions[NDSolve,MaxSteps->10000000];
ip2=0.0026;
r1=0.076;
r2=0.072;
r3=0.24;
w=11.03;
mi=0.934;
k=456079;
km=296.774;
alfa=0.004;
m2=0.41;
g=9.81;
```

Primeira Parte **Dentro da Cana**

```
y=r1 Sin[w t]+r3 Sin[t2[t]+alfa];
f2=-k (y-0.25966064)/N;
f1=-mi f2;
xm=0.140 (Sin[w t-t2[t]]);
yy=y-0.25966064;
```

Equação de Lagrange com suas condições iniciais

```
eq1={{(ip2 +m2 r2^2) t2'[t]- m2 r1 r2 w^2 Sin[w t-t2[t]]-km r3 ^2 Sin[w t-
t2[t]] Cos[w t-t2[t]]-m2 g r2 Cos[t2[t]]-f2 r3 Cos[t2[t]+alfa]+f1 r3 Sin[t2[t]
+alfa]}==0, t2[0.0873098]==0.96342175, t2'[0.0873098]==11.0345197};
```

Resolução da Equação no intervalo citado

```
soln=NDSolve[eq1, t2, {t,0.0873098, 0.2}];
solnum=t2/.soln[[1]];
xm=0.140 (Sin[w t-solnum[t]]);
y=r1 Sin[w t]+r3 Sin[solnum[t]+alfa];
f2=-k (y-0.25966064)/N;
yy=y-0.25966064/N;
```

Tabela dos parâmetros variáveis no intervalo citado

```
dados1=Table[{t,w t,solnum[t],yy,xm,f2},{t,0.0873098,0.09,0.0001}]
```

Gráficos

```
graf1=Plot[Evaluate[f2],{t,0.0873098,0.09},
AxesLabel->{"tempo","f2"}]
graf2=Plot[Evaluate[solnum[t]],{t,0.0873098,0.09},
```

```

AxesLabel->{"tempo", "t2"}]
graf3=Plot[Evaluate[yy], {t, 0.0873098, 0.09},
  AxesLabel->{"tempo", "yy"}]
graf4=Plot[Evaluate[xm], {t, 0.0873098, 0.09},
  AxesLabel->{"tempo", "xm"}]

```

Primeira raiz da equação

```

FindRoot[-k (r1 Sin[w t]+r3 Sin[solnum[t]+alfa]-0.25966064)==0,
  {t, 0.0888098}]

```

Valor da raiz encontrada

```

{t -> 0.0888413}
t=t./%[[1]];
t01=0.0873098;
t0=t;

```

Cálculo de teta 2 (ci10) e w (ci11) no novo tempo inicial usado na próxima etapa

```

ci10=solnum[t]
ci11=(solnum[t]-solnum[t-0.0001])/0.0001
t=.
ci10 = 0.958114
ci11 = -17.8754

```

Gráficos da primeira parte

```

grf21=Plot[Evaluate[f2], {t, t01, t0},
  AxesLabel->{"tempo", "f2"}]
gryy1=Plot[Evaluate[yy], {t, t01, t0},
  AxesLabel->{"tempo", "yy"}]
grxm1=Plot[Evaluate[xm], {t, t01, t0},
  AxesLabel->{"tempo", "xm"}]
grteta21=Plot[Evaluate[solnum[t]], {t, t01, t0},
  AxesLabel->{"tempo", "t2"}]

```

Segunda Parte

Fora da Cana

```

y=r1 Sin[w t]+r3 Sin[t2[t]+alfa];
f2=0;
f1=0;
xm=0.140 (Sin[w t-t2[t]]);
yy=y-0.25966064;
eq1={ (ip2 +m2 r2^2) t2''[t]- m2 r1 r2 w^2 Sin[w t-t2[t]]- km r3 ^2 Sin[w t-
  -t2[t]] Cos[w t-t2[t]]-m2 g r2 Cos[t2[t]]-f2 r3 Cos[t2[t]+alfa]+f1 r3
  Sin[t2[t]+alfa]==0, t2[t0]==ci10, t2'[t0]==ci11};
soln=NDSolve[eq1, t2, {t, t0, 0.4}];

```

```

solnum=t2/.soln[[1]];
y=r1 Sin[w t]+r3 Sin[solnum[t]+alfa];
yy=y-0.25966064/N;
xm=0.140 (Sin[w t-solnum[t]]);
dados1=Table[{t,solnum[t],w t,yy,xm},{t,t0,0.1,0.0001}]
graf1=Plot[Evaluate[yy],{t, t0, 0.1},
  AxesLabel->{"tempo","yy"}]
graf2=Plot[Evaluate[solnum[t]],{t,t0, 0.1},
  AxesLabel->{"tempo","t2"}]
FindRoot[r1 Sin[w t]+r3 Sin[solnum[t]+alfa]-0.25966064==0,
  {t,0.0974413}]
{t -> 0.0975342}
t=t/.%[[1]];
t01=t0;
t0=t;
ci10=solnum[t]
ci11=(solnum[t]-solnum[t-0.0001])/0.0001
t=.
0.931158
11.3273
grf22=Plot[Evaluate[f2],{t,t01,t0},
  AxesLabel->{"tempo","f2"}]
gryy2=Plot[Evaluate[yy],{t,t01,t0},
  AxesLabel->{"tempo","yy"}]
grxm2=Plot[Evaluate[xm],{t,t01,t0},
  AxesLabel->{"tempo","xm"}]
grteta22=Plot[Evaluate[solnum[t]],{t,t01,t0},
  AxesLabel->{"tempo","t2"}]

```

Terceira Parte Dentro da Cana

```

y=r1 Sin[w t]+r3 Sin[t2[t]+alfa];
f2=-k (y-0.25966064)/N;
f1=-mi f2;
xm=0.140 (Sin[w t-t2[t]]);
yy=y-0.25966064;
eq1={ (ip2 +m2 r2^2) t2''[t]- m2 r1 r2 w^2 Sin[w t-t2[t]]- km r3 ^2 Sin[w t-
  -t2[t]] Cos[w t-t2[t]]-m2 g r2 Cos[t2[t]]-f2 r3 Cos[t2[t]+alfa]+f1 r3
  Sin[t2[t]+alfa]==0, t2[t0]==ci10, t2'[t0]==ci11};
soln=NDSolve[eq1, t2, {t,t0, 0.4}];
solnum=t2/.soln[[1]];
xm=0.140 (Sin[w t-solnum[t]]);
y=r1 Sin[w t]+r3 Sin[solnum[t]+alfa];
f2=-k (y-0.25966064)/N;

```

```

yy=y-0.25966064;
dados1=Table[{t,solnum[t],f2,xm},{t,t0,0.13,0.0001}]
graf1=Plot[Evaluate[f2],{t,t0,0.13},
  AxesLabel->{"tempo","f2"}]
graf2=Plot[Evaluate[solnum[t]],{t,t0,0.13},
  AxesLabel->{"tempo","t2"}]
FindRoot[-k (r1 Sin[w t]+r3 Sin[solnum[t]+alfa]-0.25966064)==0,
  {t,0.09915}]
{t->0.0991296}
t=t/1000;
t01=t0;
t0=t;
ci10=solnum[t]
ci11=(solnum[t]-solnum[t-0.0001])/0.0001
t=
0.926778
-16.9147
grf23=Plot[Evaluate[f2],{t,t01,t0},
  AxesLabel->{"tempo","f2"}]
gryy3=Plot[Evaluate[yy],{t,t01,t0},
  AxesLabel->{"tempo","yy"}]
grxm3=Plot[Evaluate[xm],{t,t01,t0},
  AxesLabel->{"tempo","xm"}]
grteta23=Plot[Evaluate[solnum[t]],{t,t01,t0},
  AxesLabel->{"tempo","t2"}]

```

Quarta Parte Fora da Cana

```

y=r1 Sin[w t]+r3 Sin[t2[t]+alfa];
f2=0;
f1=0;
xm=0.140 (Sin[w t-t2[t]]);
yy=y-0.25966064;
eq1={ (ip2+m2 r2^2) t2''[t]-m2 r1 r2 w^2 Sin[w t-t2[t]]-km r3^2 Sin[w t-
  -t2[t]] Cos[w t-t2[t]]-m2 g r2 Cos[t2[t]]-f2 r3 Cos[t2[t]+alfa]+f1 r3
  Sin[t2[t]+alfa]==0, t2[t0]==ci10, t2'[t0]==ci11};
soln=NDSolve[eq1, t2, {t,t0,0.4}];
solnum=t2/.soln[[1]];
y=r1 Sin[w t]+r3 Sin[solnum[t]+alfa];
yy=y-0.25966064/N;
xm=0.140 (Sin[w t-solnum[t]]);
dados1=Table[{t,solnum[t],w t,yy,xm},{t,t0,0.13,0.0001}]
graf1=Plot[Evaluate[yy],{t,t0,0.11},
  AxesLabel->{"tempo","yy"}]

```

```
graf2=Plot[Evaluate[solnum[t]],{t,t0, 0.11},
  AxesLabel->{"tempo","t2"}]
```

Apresentação dos gráficos no intervalo de uma rotação

```
Show[grf21,grf22,grf23,grf24,grf25,grf26,grf27,grf28,grf29,grf2x,grf2xi,grf2xii,grf2xiii,
  grf2xiv,grf2xv,grf2xvi]
```

```
Show[{gryy1,gryy2,gryy3,gryy4,gryy5,gryy6,gryy7,gryy8,gryy9,gryyx,gryyxi,gryyxii,
  gryyxiii,gryyxiv,gryyxv,graf1},PlotRange->{0,-0.20}]
```

```
Show[grxm1,grxm2,grxm3,grxm4,grxm5,grxm6,grxm7,grxm8,grxm9,grmxmx,grmxmi,
  grmxmxi,grmxmxi,grmxmxi,grmxmxi,grmxmxi]
```

```
Show[{grteta21,grteta22,grteta23,grteta24,grteta25,grteta26,grteta27,grteta28,grteta29,
  grteta2x,grteta2xi,grteta2xii,grteta2xiii,grteta2xiv,grteta2xv,grteta2xvi},
  PlotRange->{0.8,2.35}]
```