

**ASSOCIAÇÃO EDUCATIVA EVANGÉLICA
FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA
CURSO DE GRADUAÇÃO ENGENHARIA MECÂNICA**

LEANDRO MOZART MIALICHI

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA CAMISA DE ALTA DRENAGEM DE CALDO NA
INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA**

**GOIANÉSIA
2021**

2021	ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA CAMISA DE ALTA DRENAGEM DE CALDO NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA.	FACEG
------	---	-------

LEANDRO MOZART MIALICHI

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA CAMISA DE ALTA DRENAGEM DE CALDO NA
INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA**

Trabalho de conclusão de curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia da Faculdade Evangélica de Goianésia – FACEG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Graduação em Engenharia Mecânica.

GOIANÉSIA
2021

ERRATA

FICHA CATALOGRÁFICA

M618e

Mialichi, Leandro Mozart.

Estudo da utilização da camisa de alta drenagem de caldo na indústria sucroalcooleira / Leandro Mozart Mialichi – Goianésia: Faculdade Evangélica de Goianésia, 2021 – Faceg, 2021.

44 p.; il.

Orientador: Prof. Dr Alessandro Rodrigues Faria.

Monografia de Graduação – Faculdade Evangélica de Goianésia: FACEG, 2021.

1. Extração de caldo de cana-de-açúcar. 2. Indústria sucroalcooleira.
3. Moagem de cana-de-açúcar. 4. Rolo lotus. 5. Viabilidade econômica.
I. Mialichi, Leandro Mozart. II. Estudo da utilização da camisa de alta drenagem de caldo na indústria sucroalcooleira

CDU 621

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MIALICHI, L. M. Estudo da utilização da camisa de alta drenagem de caldo na indústria sucroalcooleira. 2021. 43 p. TCC - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, 2021

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Leandro Mozart Mialichi

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Estudo da utilização da camisa de alta drenagem de caldo na indústria sucroalcooleira.

GRAU: Bacharel em Engenharia Mecânica

ANO: 2021

É concedida à Faculdade Evangélica de Goianésia permissão para reproduzir cópias desta Monografia de Graduação, única e exclusivamente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais de publicação. Nenhuma parte desta Monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada a fonte.



Nome: Leandro Mozart Mialichi

CPF: 521.554.631-20

Email: leandromialichi@gmail.com

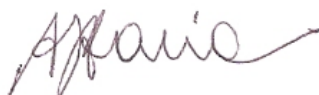
LEANDRO MOZART MIALICHI

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA CAMISA DE ALTA DRENAGEM DE CALDO NA
INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA**

Trabalho de conclusão de curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia da Faculdade Evangélica de Goianésia – FACEG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Graduação em Engenharia Mecânica.

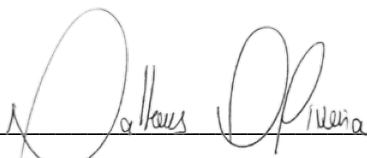
Goianésia, 08 de Julho de 2021.

BANCA EXAMINADORA



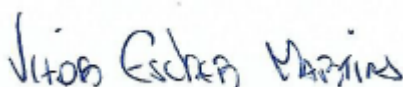
Prof. Dr. Alessandro Rodrigues Faria - Orientador

Faculdade Evangélica de Goianésia



Prof. Dr. Matheus Oliveira da Silva - Avaliador

Faculdade Evangélica de Goianésia



Prof. Me. Vitor Escher Martins - Avaliador

Faculdade Evangélica de Goianésia

Dedico este trabalho primeiramente a Deus que sempre me conduz, aos meus pais Luíz Mário e Izaura, à minha esposa Bianca e aos meus filhos Ana Beatriz e Felipe que me apoiaram incondicionalmente e emocionalmente colaborando para que eu chegasse até aqui com muita dedicação, esforço e perseverança.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, meus agradecimentos a todos os envolvidos na árdua tarefa de trazer o curso de Engenharia Mecânica para a cidade de Goianésia, onde foi possível realizar essa notável experiência em minha vida educacional e profissional.

Agradecimento especial ao coordenador e professor Cléber Caetano Thomazi por compartilhar suas experiências profissionais. No âmbito educacional, sempre exigia o máximo dos alunos para um melhor aprendizado.

Ao coordenador de TCC e professor do curso de Engenharia Mecânica, Alessandro Rodrigues Faria. Orientador dedicado que com paciência e sabedoria soube dirigir-me os passos e os pensamentos para a realização deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos a todos acadêmicos do 10º período. Sem eles, essa jornada não teria sido a mesma. Agradeço a união de todos para vencer mais essa etapa na construção do nosso saber. Com imensa tristeza sinto a falta, nessa etapa final, do meu pai. Gostaria que ele vivenciasse esse momento comigo e minha família. Infelizmente nosso Senhor também solicitou a presença de nosso colega de sala, Luiz Gustavo, deixando um vazio, mas bons momentos sempre estarão presentes em nossos pensamentos e orações.

À minha esposa Bianca e aos meus filhos Ana Beatriz e Felipe, por todo apoio e por compreenderem minha ausência nos momentos de estudo.

A todos os professores do curso de Engenharia Mecânica da FACEG no desenvolvimento deste estudo.

“Para se ter sucesso, é necessário amar de verdade o que se faz. Caso contrário, levando em conta apenas o lado racional, você simplesmente desiste. É o que acontece com a maioria das pessoas”.

Steve Jobs

RESUMO

O setor sucroenergético, que compreende a produção de açúcar e etanol, é importante para o país, gera prosperidade e contribui para o equilíbrio da balança comercial com suas exportações. A matéria-prima utilizada por este setor é a cana-de-açúcar e seus subprodutos, como bagaço e palha de cana. Tanto a cana como a biomassa proveniente dela devem passar pela moagem. Dada a importância deste processo, vários métodos de moagem vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos, para aumentar a produtividade de etanol e açúcar. O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade econômica da implantação de rolos lotus no processo de moagem de cana-de-açúcar. Para isso, foi realizado um estudo de caso em uma usina sucroalcooleira do centro-norte goiano, onde se comparou antes e após a instalação dos rolos, a concentração de Açúcares Redutores Totais (ART) e a umidade no bagaço que é destinado à caldeira da usina, bem como a vazão mássica de cana na entrada das moendas. Encontrou-se, comparando os anos de 2014 e 2020, que houve uma redução de 37% no valor financeiro perdido por queima de açúcar não extraído do bagaço, redução de 20,1% na concentração de ART no bagaço residual e um aumento de 6,1% na vazão mássica de cana processada pela moenda, devido ao menor volume do bagaço mais seco. Desta forma, conclui-se que os objetivos gerais e específicos foram alcançados, a hipótese analisada no trabalho de que os rolos lotus possuem eficiência economicamente viável para a empresa foi confirmada, porém, a umidade no bagaço de cana a ser destinado para a caldeira não diminuiu.

Palavras-chave: Extração de caldo de cana de açúcar, Indústria Sucroalcooleira, Moagem de cana-de-açúcar, Rolo Lotus, Viabilidade Econômica.

ABSTRACT

The sugar-energy sector, which comprises the production of sugar and ethanol, is important for the country, generates prosperity and contributes to the balance of trade with its exports. The raw material used by this sector is sugarcane and its by-products, such as bagasse and sugarcane straw. Both the sugarcane and the biomass from it must undergo milling. Given the importance of this process, several milling methods have been developed over the years to increase ethanol and sugar productivity. The objective of this work is to analyze the economic feasibility of implementing lotus rolls in the sugarcane milling process. For this, a case study was carried out in a sugar and alcohol plant in the center-north of Goiás, where the concentration of Total Reducing Sugars (ART) and the moisture in the bagasse destined for the boilers were compared before and after the installation of the lotus rolls, as well as the mass flow of sugarcane entering the mills. It was found, comparing the years 2014 and 2020, that there was a 37% reduction in the financial value lost by burning sugar not extracted from the bagasse, a 20.1% reduction in the concentration of ART in the residual bagasse and an increase of 6.1% in the mass flow of sugarcane processed by the mill, due to the smaller volume of drier bagasse. In this way, it is concluded that the general and specific objectives were achieved, the hypothesis analyzed in the work that the lotus rolls have economically viable efficiency for the company was confirmed, however, the moisture in the sugarcane bagasse to be destined for the boiler did not decrease.

Keywords: Juice extraction. Sugar and Alcohol Industry. Sugar cane grinding. Lotus Roll. Economic Viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa da moagem de tonelada de cana-de-açúcar e produção de açúcar.....	17
Figura 2 – Comparativo entre as matrizes energéticas no Brasil.	18
Figura 3 - Composição da cana-de-açúcar.	19
Figura 4 - Esquemática de terno de moenda.	20
Figura 5 - Momento da moagem do bagaço onde ocorre a reabsorção.....	21
Figura 6 - Reabsorção do bagaço na moagem em camisa convencional.....	22
Figura 7 – Processo de moagem utilizando rolo lotus.....	22
Figura 8 – Sistema de moenda de cana com 2 conjuntos de ternos.....	24
Figura 9 – a) Condição de drenagem em moenda convencional; b) Condição de drenagem com rolo lotus.	26
Figura 10 - Rolo Lotus em corte parcial.....	27
Figura 11 - Cálculo de fator de reabsorção.....	28
Figura 12 - Diferença de reabsorção entre o rolo convencional e o rolo lotus.....	29
Figura 13 - Variáveis de dimensionamento do rolo lotus.....	30
Figura 14 - Aplicação do método dos elementos finitos em um rolo de moenda.....	31
Figura 15 - Análise através de elementos finitos.....	31
Figura 16 - Boquilha.....	32
Figura 17 – Modelos de Boquilha: a) Boquilha convencional; b) Boquilha filtrante.	33
Figura 18 - Modificações necessárias nos flanges.....	34
Figura 19 - Falhas por baixa espessura de parede.	34
Figura 20 - Parafusos especiais com cabeça rebaixada.	35
Figura 21 - Porcentagem de ART no bagaço destinado à caldeira entre 2014 e 2020.....	38
Figura 22 - Porcentagem de umidade presente no bagaço ao final do processo de moagem...	38
Figura 23 - Vazão mássica de entrada de cana nas moendas.....	39
Figura A.1 - Rolo lotus ao lado de um operador.....	43
Figura A.2 - Frisos do rolo lotus.....	43
Figura B.1 - Instalação das boquilhas no rolo lotus.....	44
Figura B.2 - Boquilhas já instaladas no rolo lotus.....	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Cálculo para perda de produto.	37
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ART: Açúcares Redutores Totais

TWh: Terawatt hora

Vb: Volume de bagaço

Vd: Volume descrito

Vm: Velocidade periférica média entre os dois rolos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo geral.....	14
1.2	Objetivos específicos	14
1.3	Justificativa	14
1.4	Problema de Pesquisa	15
1.5	Hipótese	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Indústria Sucroalcooleira	16
2.2	Processo de moagem da cana.....	18
2.3	Tipos de moenda	23
2.4	Processo de fabricação	30
2.4.1	Material.....	30
2.4.2	Boquilhas	32
2.4.3	Furos axiais.....	33
3	METODOLOGIA.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5	CONCLUSÃO.....	40
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
	APÊNDICE A – Fotos do Rolo Lotus	43
	APÊNDICE B – Fotos da Montagem do Rolo Lotus.....	44

1 INTRODUÇÃO

O etanol pode ser utilizado como biocombustível líquido com potencial para substituir parcialmente a gasolina necessária para o transporte em todo o mundo. Atualmente, o etanol é produzido principalmente a partir do caldo de cana (sacarose) no Brasil e do milho (amido) nos EUA. No entanto, está bem estabelecido que o uso generalizado do etanol exigirá novas fontes de matérias-primas, como madeira e resíduos agrícolas, que têm a vantagem de estarem amplamente disponíveis. Ainda assim, o custo da produção do etanol a partir da biomassa com as tecnologias atuais é muito alto (HIRA; DE OLIVEIRA, 2009).

O bagaço e a palha da cana-de-açúcar são materiais que têm despertado o interesse de cientistas no Brasil como fontes potenciais para a produção de etanol a partir de biomassa. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com uma produção total em 2020 de 654 milhões de toneladas (CONAB, 2020). O segundo maior produtor é a Índia, com 360 milhões de toneladas, seguido pela China, com 108 milhões de toneladas de cana-de-açúcar produzidas.

Essa produção considerável leva ao acúmulo de subprodutos, principalmente a palha da cana-de-açúcar, que consiste na parte aérea da planta, nas folhas frescas e secas da cana e no bagaço da cana, resíduo fibroso remanescente da cana após o caldo ser extraído (DEEPCHAND, 1986).

Segundo Margeot *et al.* (2009), a produção de etanol a partir da biomassa envolve quatro etapas: pré-tratamento, sacarificação (ácida ou enzimática), fermentação e destilação. O bagaço e a palha têm três componentes principais: celulose, hemicelulose e lignina. Esses componentes são organizados de forma complexa para impedir o ataque eficiente de enzimas degradantes. Assim, pré-tratamentos são essenciais para superar essa “defesa” da biomassa, permitindo a produção de bioetanol (MARGEOT *et al.*, 2009).

Ao longo dos anos, vários métodos de pré-tratamento foram desenvolvidos, incluindo métodos físicos, que podem ser mecânicos ou térmicos, químicos ou uma combinação desses métodos. Caracterizado como um pré-tratamento físico, a moagem da biomassa produz partículas finas, o que melhora a produtividade do processamento da cana (INOUE *et al.*, 2008).

O presente trabalho fez ponderações relacionadas ao conjunto de quatro rolos de moagem do tipo lotus, instalados em uma empresa localizada no centro norte goiano. Fez-se uma análise da viabilidade econômica e da produtividade do uso dos rolos lotus, que, embora

tenham um custo elevado de aquisição, instalação e uma vida útil menor em relação à moenda tradicional, podem demonstrar ganhos de produtividade que justifiquem seu investimento.

Portanto, pretende-se comprovar, através de coletas de diversos dados, sejam eles gráficos analíticos, dados numéricos, laboratoriais e comparativos, se a implantação dos rolos lotus teve o retorno esperado e almejado desde sua instalação.

1.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo foi analisar a viabilidade econômica da implantação dos rolos lotus no processo de moagem de cana em uma usina sucroalcooleira do centro-norte goiano.

1.2 Objetivos específicos

- Conhecer os benefícios gerados por um processo de extração em usina sucroalcooleira na atualidade;
- Estudar a implantação dos rolos lotus na usina sucroalcooleira do centro-norte goiano;
- Avaliar se a troca da moenda convencional pelo rolo lotus é economicamente viável;
- Avaliar se houve redução de umidade no bagaço.

1.3 Justificativa

A moenda é uma parte do processo de produção da indústria sucroalcooleira, e como qualquer equipamento, é requerido o máximo de eficiência e performance, pois seu custo de instalação e manutenção é bastante oneroso. O monitoramento de sua capacidade de trabalho é uma exigência necessária para não haver perdas da matéria prima e garantir a performance de trabalho.

Esse trabalho tem relevância pois pretende constatar se há benefícios no investimento necessário para a instalação dos rolos lotus no processo de moagem. Este estudo ajudará a equipe do setor de moendas a identificar ganhos proporcionais a cada safra.

Destaca-se que desde 2016, na empresa sucroalcooleira estudada, não foram realizadas coletas de dados semanais, e sim, mensais e anuais. Essa falta de acompanhamento pode distorcer informações pertinentes ao equipamento.

1.4 Problema de Pesquisa

Diante do que foi mostrado, parte-se da seguinte pergunta de pesquisa: A implantação de rolos lotus no processo de moagem da cana-de-açúcar é economicamente viável para a usina sucroalcooleira analisada?

1.5 Hipótese

Espera-se que a eficiência dos novos rolos lotus instalados no processo de moagem da cana-de-açúcar é satisfatória, aumentando a produtividade da empresa sucroalcooleira.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Indústria Sucroalcooleira

O Brasil possui fatores favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar como solos férteis, água em abundância, clima tropical e relevos planos. Por isso, essa atividade econômica iniciada na fase de colonização, ao longo da costa e do interior nordestino brasileiro, cresceu de maneira rápida, contribuindo para a expansão e modernização do processo até os dias atuais (CONAB, 2019).

No início, o processo agroindustrial era realizado na casa de engenho, onde se produzia o açúcar a partir de métodos rudimentares comparados aos de hoje. Este processo de produção passou pela época colonial, império e na república (CONAB, 2019).

Segundo Flausinio (2015), “o mercado europeu foi abastecido pelos engenhos de Pernambuco e Paraíba, embora tenha sido iniciada em São Paulo”. Dessa forma, a produção de açúcar foi a principal geração de renda durante os séculos XVI e XVII para o país, havendo uma redução na produção somente com a descoberta do ouro no século XVIII.

Os engenhos tiveram grande importância na economia e política do país até meados do século XX, quando começaram a ser desativados, cedendo espaço às usinas sucroalcooleiras. O setor sucroenergético (açúcar e etanol) é importante para o país, pois apresenta números expressivos no âmbito ocupacional, gera prosperidade e contribui para o equilíbrio da balança comercial com suas exportações (CONAB, 2019).

A expansão da produção de cana-de-açúcar tem ocorrido principalmente no Paraná, Goiás, Mato Grosso do Sul, Triângulo Mineiro e São Paulo como mostra a Figura 1.

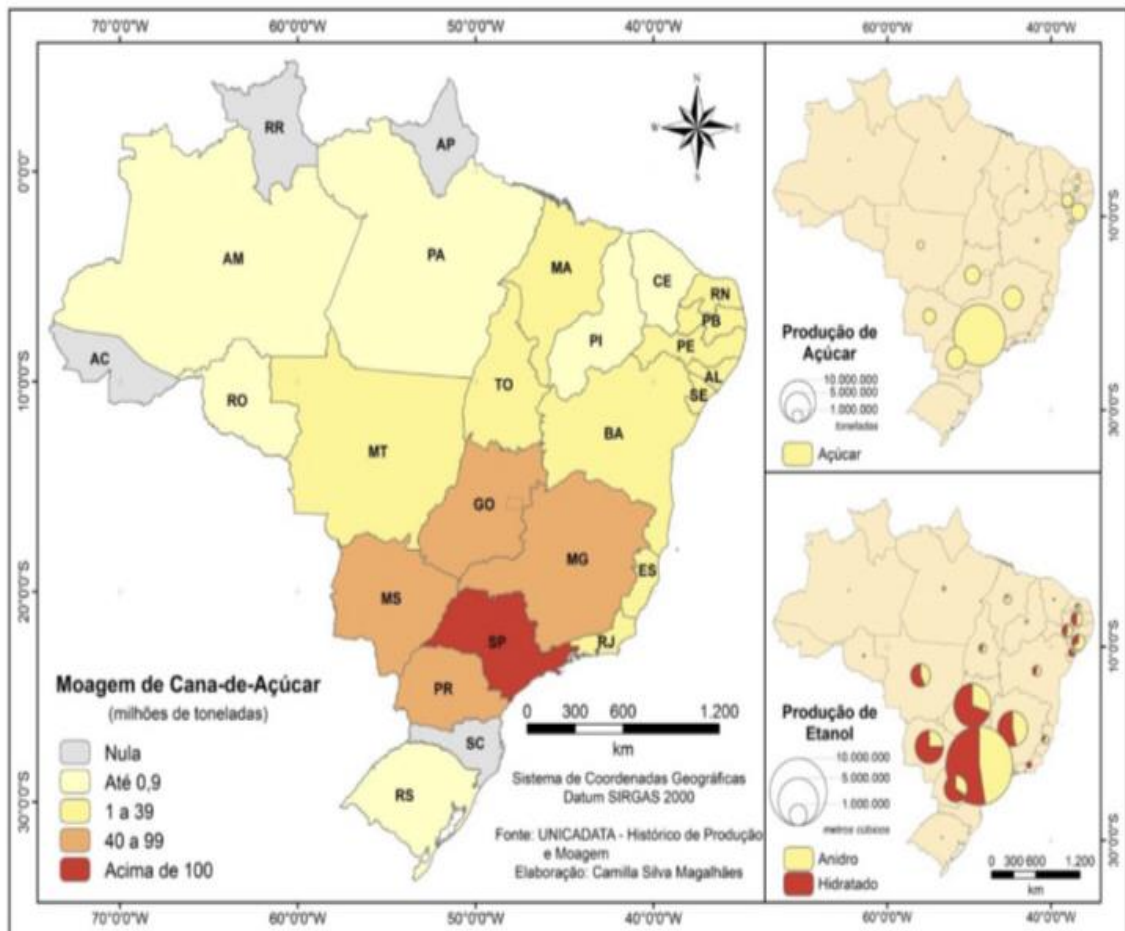


Figura 1 - Mapa da moagem de tonelada de cana-de-açúcar e produção de açúcar e de etanol (m³) nos estados brasileiros
Fonte: CONAB, 2019

Na indústria sucroalcooleira são produzidos o bagaço e a vinhaça, dois resíduos com altíssimo potencial de geração de energia elétrica através da biomassa. Em 2017, a geração total de energia elétrica no Brasil foi de 578,9 TWh, e o bagaço da cana teve uma contribuição de 35,236 TWh, estando em terceiro lugar comparado à outras fontes de energia. (CONAB, 2019) conforme a Figura 2.

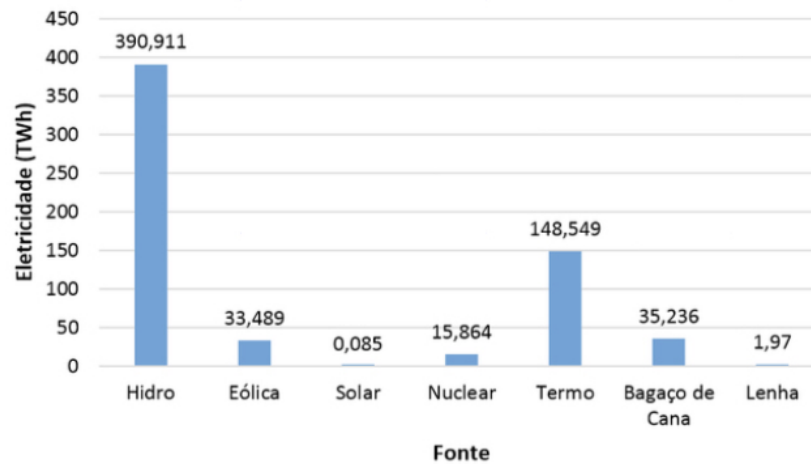


Figura 2 – Comparativo entre as matrizes energéticas no Brasil.
Fonte: Balanço Energético Nacional (2017)

Os dados apresentados revelam a importância da cana-de-açúcar para a geração de energia para o Brasil. Além da geração de renda pela produção e exportação dos subprodutos da cana, como a biomassa gerada no processo, amplia as oportunidades do setor, diversifica a matriz energética e promove o ganho ambiental, pela redução das emissões de compostos responsáveis pelo efeito estufa (FLAUSINIO, 2015).

2.2 Processo de moagem da cana

O objetivo da moagem é separar o caldo da fibra da cana, uma vez que a cana é composta basicamente de duas partes: fibra (sólidos insolúveis) e caldo (água e sólidos dissolvidos) (DELFINI, 2013).

A composição mais detalhada da cana é ilustrada pela Figura 3.

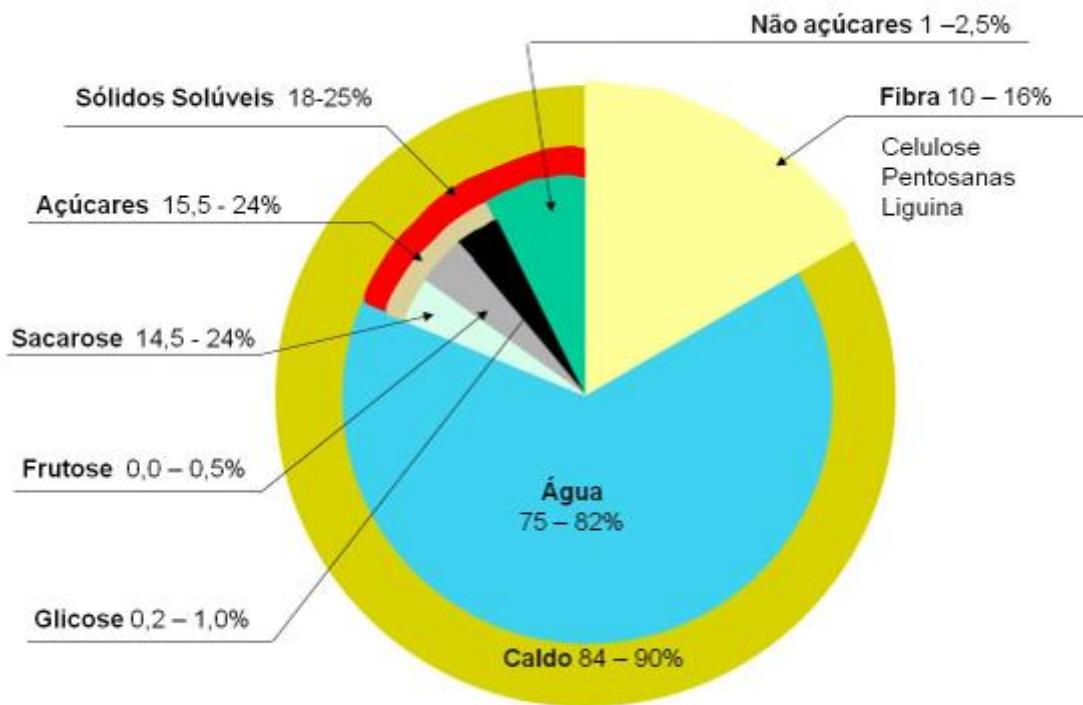


Figura 3 - Composição da cana-de-açúcar.

Fonte: Usina São Fernando (2021)

Após passar pelo sistema de preparo, onde recebe o ataque de jogos de facas e desfibradores de martelos oscilantes expondo as células de sacarose, entra na moenda através de uma calha responsável por controlar a alimentação das moendas. Ela regulariza e uniformiza a moagem e torna a pressão dos rolos sobre o colchão de cana mais constante durante todo o processo. A cana desfibrada precipita entre os rolos de moenda por gravidade.

Em forma desfibrada, a cana entra através da calha no primeiro terno de moenda:

“chama-se de terno de moenda, um conjunto de rolo superior e inferior de entrada, um inferior de saída e outro de pressão que são montados e apoiados em dois castelos de moenda, que são os pilares sustentadores do terno de moenda, um quarto rolo denominado rolo de pressão tem a finalidade de adensar a cana desfibrada harmonizar e distribuir o fluxo de cana na entrada da moenda. Um conjunto, ou tandem, de moenda pode ser composto por quatro, cinco ou seis ternos de moenda, sendo que em algumas unidades existem dois e até três tandem de moendas” (HEILMANN, 2015, p. 18).

Neste processo, a cana será esmagada pelo rolo inferior de entrada com o rolo superior. Em seguida, acontece a segunda compressão entre o rolo inferior de saída com o rolo superior. Neste primeiro embate, no primeiro terno, tem-se o caldo primário (HEILMANN, 2015).

O bagaço desta primeira etapa segue pela esteira entre moendas para o segundo terno, onde recebe novamente duas compressões. Um esquema de um terno envolvido neste processo é ilustrado na Figura 4.

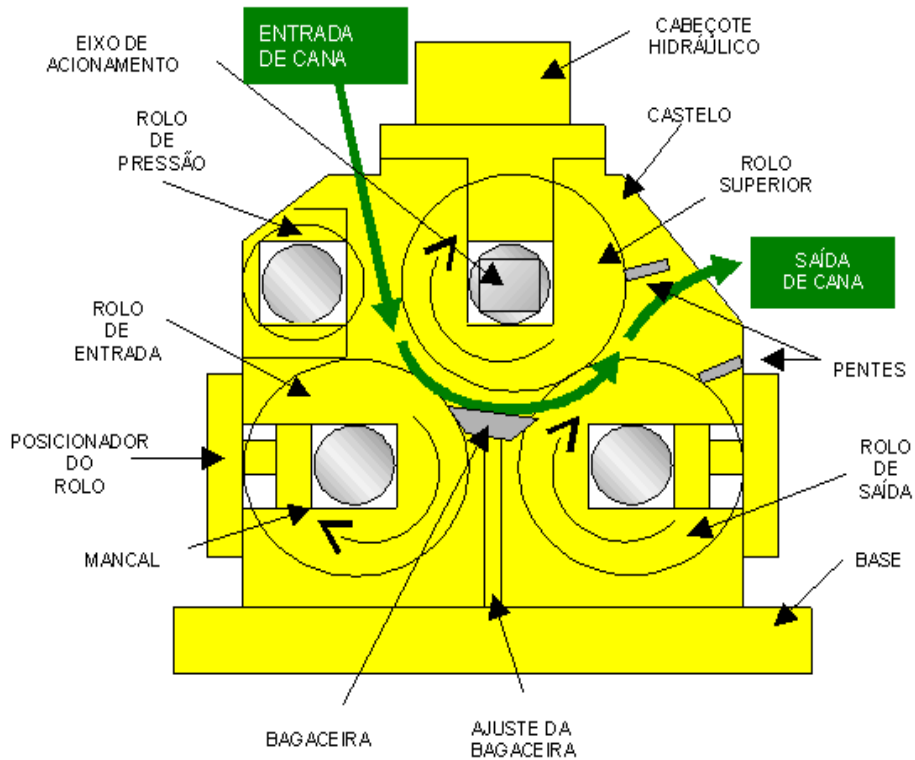


Figura 4 - Esquemática de terno de moenda.

Fonte: Heilmann (2015)

Segundo Heilmann (2015), este processo de moagem dito por esmagamento ocorre sucessivamente pelos próximos ternos até chegar ao último. O bagaço da cana restante após a moagem apresenta umidade próxima de 50% e, na condição favorável de combustível, é possível alimentar a caldeira, onde através da energia elétrica é feito o acionamento dos motores da moenda.

Nesse processo em que a cana-de-açúcar se transforma em bagaço, ocorre a embebição com adição de água, onde a extração de açúcares se dá por meio da lavagem da cana na moagem, acontecendo a captura da sacarose de dentro das células abertas. Os rolos inferiores trabalham de maneira fixa, ao passo que o superior oscila em movimentos verticais em função da espessura do colchão de cana que atravessa a moenda, e a contrapressão exercida por ele (HEILMANN, 2015).

Um terno de moenda deve ser utilizado em sua eficiência plena, se apoiando em dois parâmetros: capacidade e extração. A capacidade está relacionada com a quantidade de cana a ser processada, e a eficiência será maior quanto maior for à extração da sacarose contida na cana e extraída pelas moendas (HEILMANN, 2015).

Durante o processo de moagem ocorre a reabsorção, que passa a ser um dos fatores críticos que mais limitam a capacidade de extração. A força com que esta ocorre não está relacionada apenas com a capacidade de drenagem da moenda, mas com uma combinação de fatores relacionados ao processo de extração (DELFINI, 2013).

A Figura 5 mostra o momento da moagem do bagaço, possibilitando o entendimento da reabsorção:

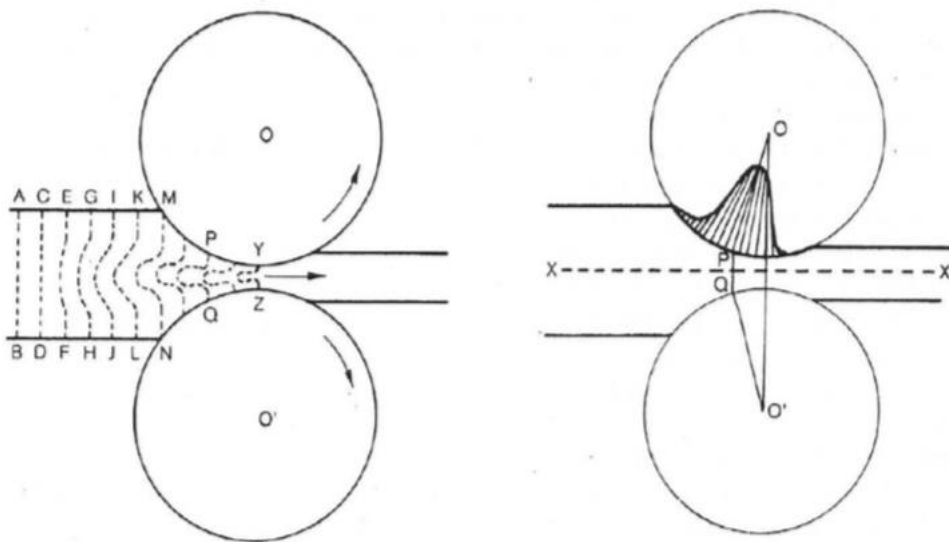


Figura 5 - Momento da moagem do bagaço onde ocorre a reabsorção

Fonte: Delfini (2013)

O caldo que foi então aprisionado no interior da camada de bagaço forma uma bolsa que é retratada pelas faixas verticais distorcidas. Quando a bolsa de material chega ao plano axial OO' , encontra uma zona de pressões decrescentes. O líquido é jogado para frente e encontra um bagaço relativamente seco e expandindo como uma esponja, no qual é imediatamente reabsorvido. Percebe-se que há uma enorme quantidade de energia despendida para libertar uma grande fração de caldo que é imediatamente perdido por reabsorção, ilustrado na Figura 6 (DELFINI, 2013).

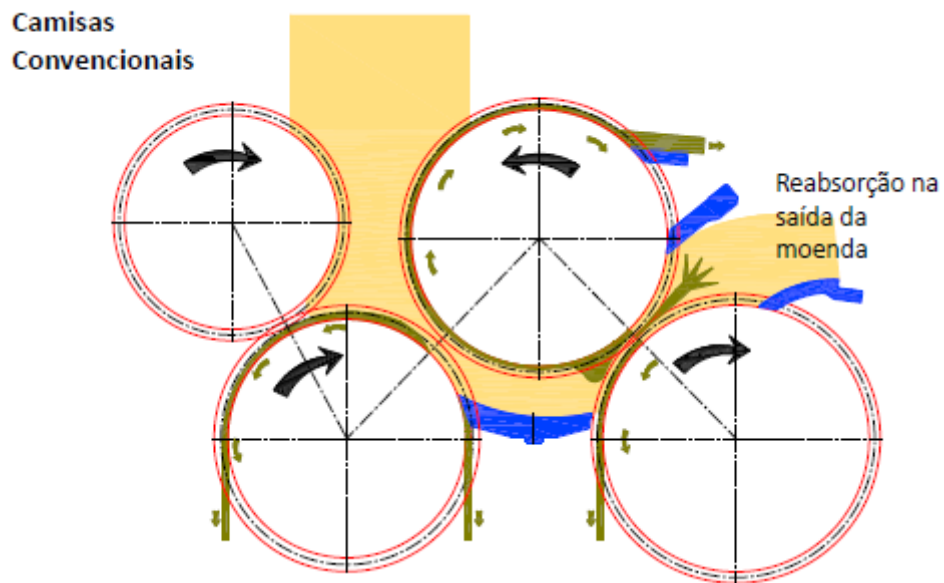


Figura 6 - Reabsorção do bagaço na moagem em camisa convencional.

Fonte: Delfini (2021)

Delfini (2021) mostra benefícios na utilização do rolo lotus, como a diminuição no efeito da reabsorção e na perda de açúcar no bagaço, permitindo maiores taxas de embebição (absorção de líquido por um sólido poroso), como também a redução do transbordo de caldo sobre o rolo superior. O processo de moagem utilizando o rolo lotus é ilustrado na Figura 7.

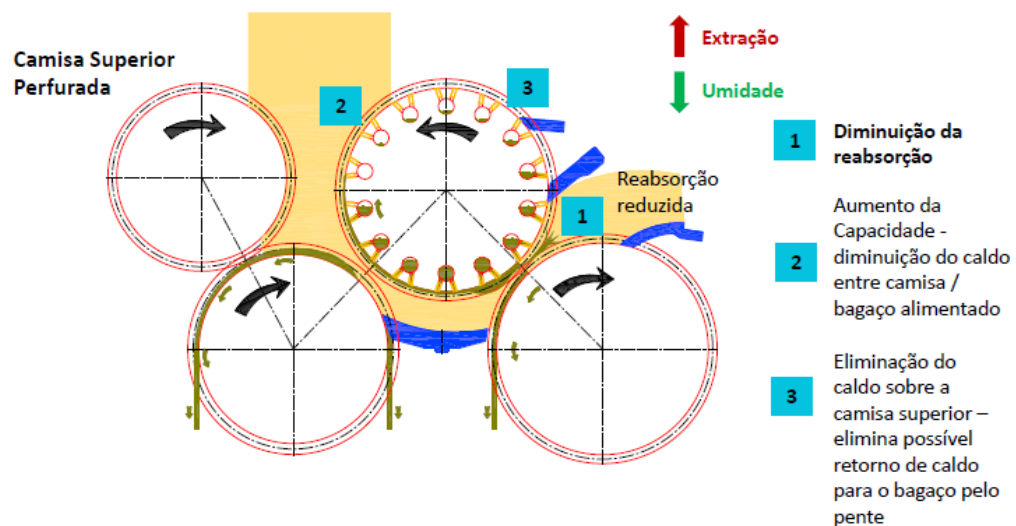


Figura 7 – Processo de moagem utilizando rolo lotus

Fonte: Delfini (2021)

2.3 Tipos de moenda

O processo de moagem por contato foi utilizado por muito tempo quase exclusivamente para a extração do caldo da cana-de-açúcar. No Brasil, a maior evolução no processo de moagem, iniciada na década de 1970, focou sua meta em processamento de grandes escalas de moagem. Sem perder a atenção no desenvolvimento geral de processos, aplicou-se também em estudos de desenvolvimento de novas tecnologias em extração do caldo de cana.

Segundo Rein (2013), neste processo estava o Centro de Tecnologia Coopersucar como grande inovador tecnológico, contando sempre com o apoio de consultorias da Austrália, África do Sul e Havaí. Acerca das novas tecnologias ou no aperfeiçoamento das existentes na extração de caldo por moagem, sempre se buscou melhoria do desempenho, diminuição do investimento inicial, redução dos custos de manutenção e de operação, minimização do consumo de energia e a otimização do processo. A partir do ano 2000 houve uma expansão na instalação de difusores, mais do que dobrando a quantidade desses equipamentos no Brasil.

Para amenizar a situação desfavorável em relação à extração e à capacidade, surgiu a instalação de um terno de moenda, transformando-o em difusor de bagaço. Um aspecto relevante é abordado por Delfini (2013, p. 2):

“Quando se refere ao nível de capacidade que se pretende operar numa determinada planta, levando em consideração que, para altas capacidades de processamento, pode-se considerar um único conjunto de moendas, sendo que, com difusor, seriam necessárias duas linhas paralelas de processamento, podendo eliminar muitos dos benefícios inerentes ao processo de difusão de investimento inicial, consumo de energia e custos de manutenção e operação”.

Essa melhoria do desempenho pode ser expressa em termos da evolução da capacidade específica de moagem por volume de rolos utilizados no processo, e da redução do consumo específico de energia na operação de moagem.

O processo de moagem por difusão fica em desvantagem em comparação à utilização de moendas nos quesitos investimento, custos de manutenção, operação e consumo de energia conforme ressalta Delfini (2013, p. 3):

“[...] fator importante no processamento da cana seja por difusor ou moenda, a logística interna da cana totalmente fornecida por processo mecanizado. Para cana colhida mecanicamente, ocorreram possibilidades de substituição de transportadores metálicos por transportadores com correias. Esta substituição acabou permitindo redução de investimentos nos custos de consumo de energia e manutenção, eliminaram-se também os picadores no preparo da cana por desfibradores, auferindo-se grande economia de recursos financeiros”.

Em contrapartida, o aumento significativo na mecanização da colheita acabou por contribuir para o aumento das impurezas vegetais na cana, o que tem resultado em prejuízos significativos para a capacidade de processamento e para os níveis de extração, viabilizando o investimento nesse sistema. Para que seja possível obter uma melhor utilização da biomassa para uma maior produção de energia ou como matéria-prima para outros produtos, uma das opções é trazer a biomassa junto com a cana. Este fato torna quase obrigatória a incorporação de um processo de limpeza a seco para separação das impurezas vegetais adicionais (DELFINI, 2021).

Diversos sistemas encontram-se em desenvolvimento, implantação e operação, mas o mais utilizado do mercado sucroalcooleiro é a moenda, estando presente em pelo menos 97% das usinas e destilarias do Brasil. A moenda permite a separação do caldo com cerca de 96% do açúcar da cana e cerca de 18 grau brix (quantidade de compostos solúveis numa solução de sacarose, onde 1g de açúcar corresponde a 100g de solução).

Ela é composta por um conjunto de ternos, cada um com acionamento por motores individuais ou por engrenagens chamadas rodetes, como mostra a Figura 8.

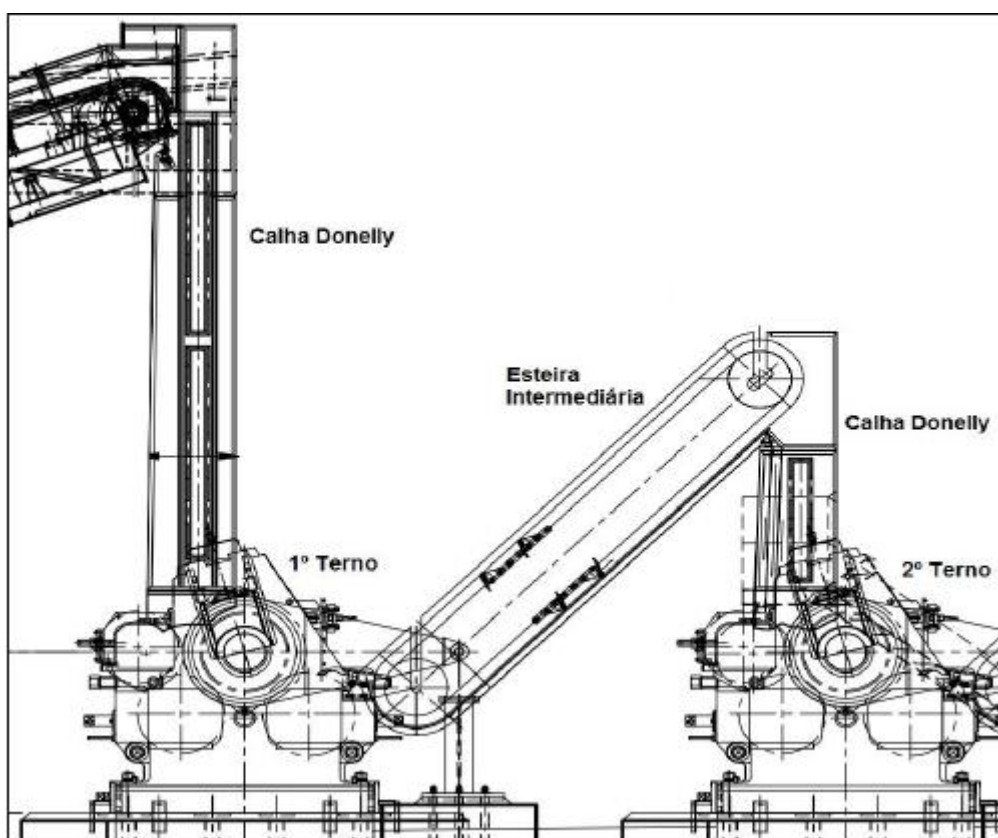


Figura 8 – Sistema de moenda de cana com 2 conjuntos de ternos

Fonte: Centro de Tecnologia Copersucar (2002)

Cada rolo tem um movimento circular com o sentido de operação que guia a cana através do conjunto de moendas e, por pressões hidráulicas, moem a cana e extraem o seu caldo. O produto que sai de cada terno é chamado de bagaço da cana.

A tecnologia de extração encontra-se num patamar de desenvolvimento que pode ser considerado satisfatório. Basta que sua operação tenha um bom controle e seja mantida dentro das condições que propiciam os resultados esperados (DELFINI, 2021).

Ao longo das evoluções tecnológicas, sempre existiram oportunidades para se introduzir novas tecnologias, como ocorreu com o rolo lotus, que antigamente não eram utilizados no Brasil. Neste sistema encontram-se benefícios constatados em sua utilização, como a redução dos índices de umidade quando instalada no último terno e aumento substancial de capacidades quando instalada no primeiro terno (LOURENÇO, 2019).

Faber (2014) afirma que se pode elencar outros benefícios, como a redução no efeito da reabsorção, redução na perda de açúcar no bagaço, aumento das taxas de embebição, que reduz significativamente o transbordo de caldo sobre o rolo superior e o deslizamento entre camisa e bagaço e o aumento da eficiência das caldeiras.

Assim, a Figura 9 ilustra a condição de drenagem do caldo extraído em uma moenda convencional e outra moenda com o rolo lotus. O rolo lotus melhora as condições de drenagem e permite um melhor contato entre a cana ou o bagaço com a superfície do rolo.

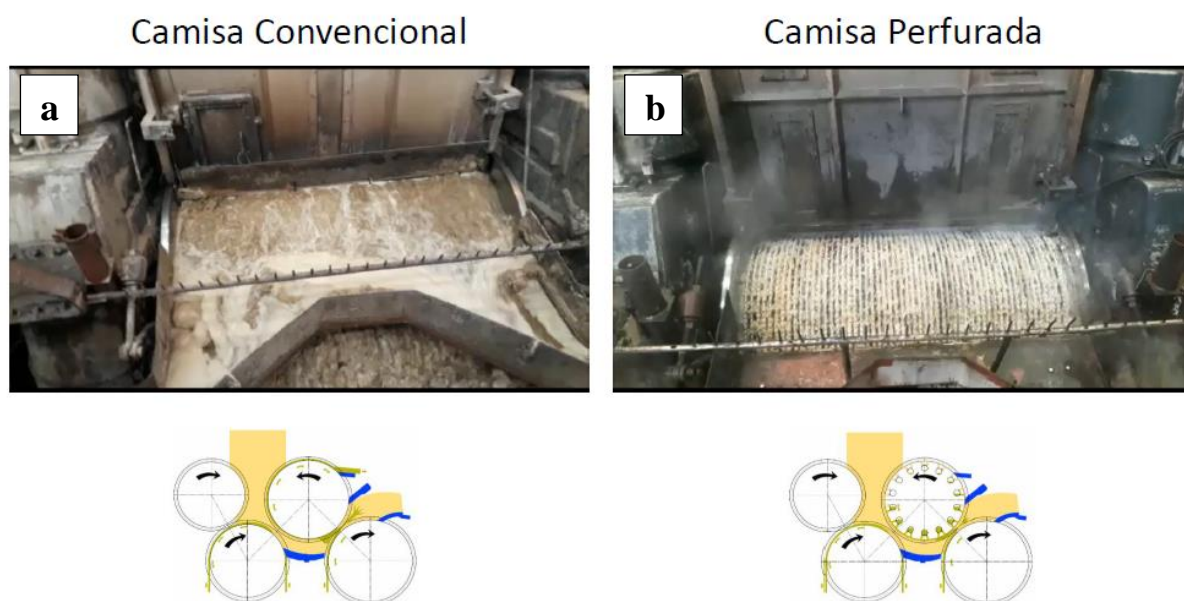


Figura 9 – a) Condição de drenagem em moenda convencional; b) Condição de drenagem com rolo lotus.

Fonte: Delfini (2013)

Segundo Rein (2013), Bouvet inventou o rolo lotus em 1973 e o instalou em Taiwan. O rolo consiste em uma camisa de aço fundido contendo furos de drenagem radiais na raiz de cada friso, espaçados em intervalos regulares ao redor da circunferência, que drenam em canais axiais ao longo da largura do rolo sem contato com a cana que está sendo moída, descarregando do lado externo do flanco do rolo lotus. Plugues de aço temperado com pequenos orifícios são inseridos nas entradas dos buracos de drenagem radial para evitar a entrada das partículas maiores, que podem bloquear as passagens subsequentes e resistir ao desgaste dos buracos.

Na prática, a tecnologia do rolo lotus se caracteriza por furos feitos no fundo dos frisos da camisa, ao longo de todo o perímetro do rolo de moenda, por onde o caldo é drenado. A Figura 10 mostra o Rolo Lotus em corte parcial. Assim, com a camisa perfurada, a embebição e a extração da planta aumentam, variando de acordo com a capacidade de cada moenda. Outra vantagem é que esta tecnologia diminui a umidade do bagaço da cana, uma vez que o resíduo não tem contato com o caldo extraído.

Heilmann (2015) relata que, no Brasil, há uma única patente depositada em 26 de setembro de 1985 pelo próprio Bouvet, com numeração PI 8504736-8 e com o título “Rolo de moenda com capacidade de moagem aumentada”.

A preocupação de Bouvet era a reabsorção do caldo já extraído, rico em sacarose, pois este, ainda no momento do processo de moagem, retorna para o colchão da cana já esmagada e

vai para os outros ternos de moenda, mantendo o bagaço ainda rico em sacarose (HEILMANN, 2015).

De acordo com Sanchez e Chavarro (2013), para aumentar a extração, o rolo lotus deve ser instalado preferencialmente no 1º terno. Nesta condição, chega-se a obter um ganho na extração da sacarose de até 5 % quando usado no rolo superior, em conjunto com sistema de limpeza a seco, bom preparo da cana em desfibradores pesados, controle automático da calha intermediária e eletrificação dos acionamentos dos rolos.

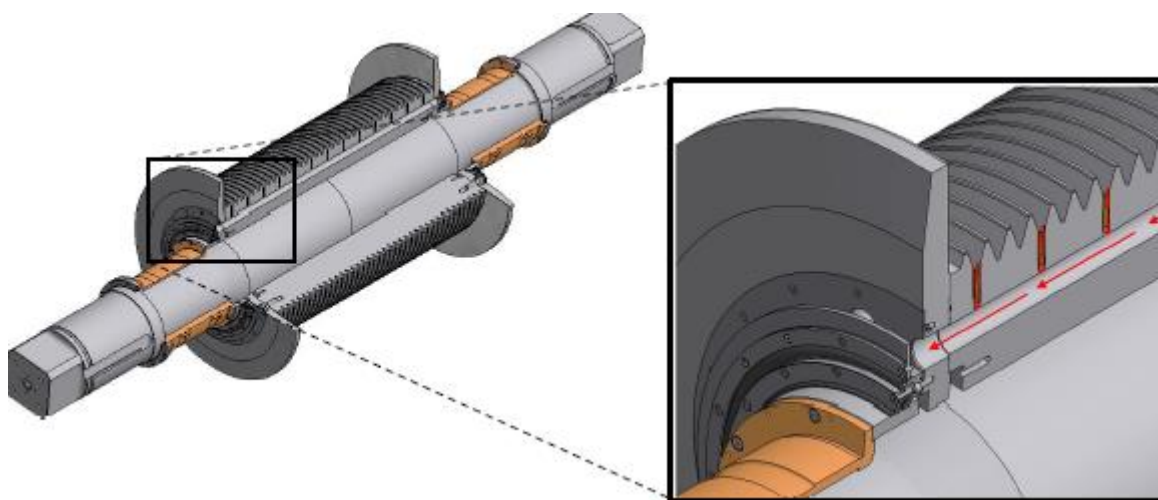
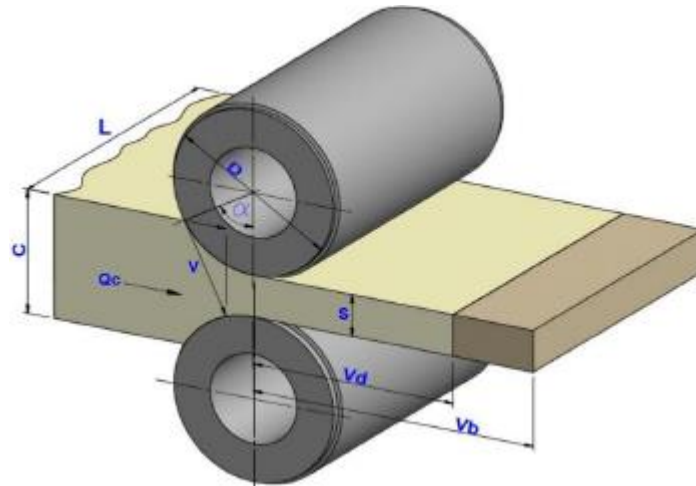


Figura 10 - Rolo Lotus em corte parcial.

Fonte: Lourenço (2019)

O fator de reabsorção do caldo pelo bagaço de cana é calculado conforme mostra a Figura 11.



O fator de reabsorção (k) é definido como: $k = Vb/Vd$

k = fator de reabsorção

Vb = volume de bagaço

Vd = volume descrito

Em uma moenda com:

- regulagem adequada
- boa manutenção
- bem operada



$k = 1,4$

Figura 11 - Cálculo de fator de reabsorção

Legenda: L: comprimento do rolo. D: diâmetro do rolo. C: altura da camada de bagaço antes da passagem pelos rolos. s: altura da camada de bagaço após a passagem pelos rolos. Qc: vazão de bagaço (kg de bagaço/min).

Fonte: Delfini (2013)

Delfini (2013) orienta quanto à instalação do terno da moenda, para que seja realizada no rolo superior. Em outras posições tem-se um maior entupimento dos bocais e canais de drenagem, justificado pelo fato de que o rolo superior recebe maior pressão do bagaço no processo de moagem, conforme demonstra a Figura 12. Também pode-se observar que o terno de moenda com camisa perfurada apresenta um fator de reabsorção (k) de 1,3, menor do que quando se emprega o rolo convencional, com $k = 1,4$.

Redução da Reabsorção com camisa perfurada

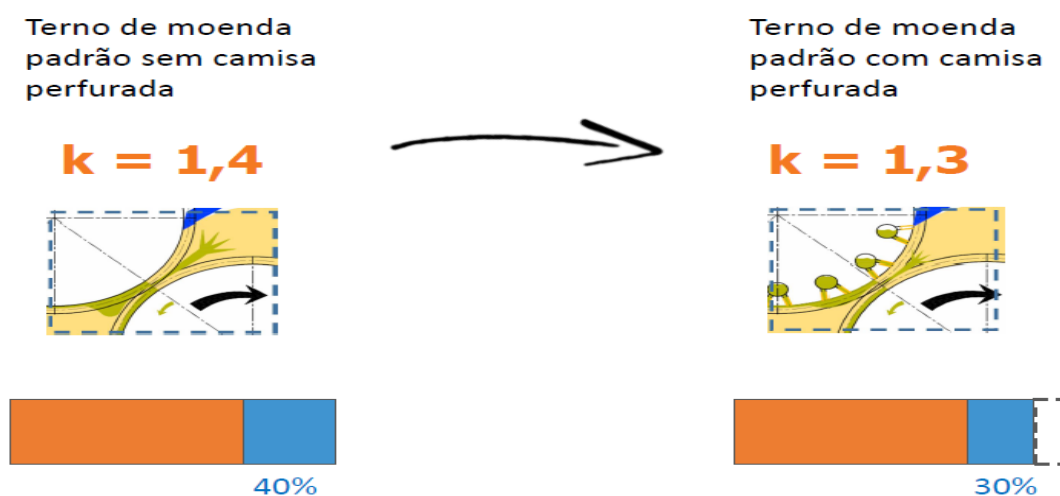


Figura 12 - Diferença de reabsorção entre o rolo convencional e o rolo lotus

Fonte: Delfini (2013)

Delfini (2013) aborda a respeito do uso do rolo lotus em várias usinas de países do continente americano como Argentina, Peru, Equador, Venezuela, República Dominicana, Caribe, Panamá, Guatemala, México, Colômbia e Estados Unidos. No Brasil, o uso do rolo lotus começou a ser intensificado e difundido para várias usinas a partir de 2014.

O bagaço mais seco traz melhora na eficiência do processo de geração de energia. Com a drenagem do caldo sendo feita pelo próprio rolo, as usinas não precisam mais instalar sistemas de aspiração externa, o que reduz gastos com manutenção e atualização.

Os avanços na engenharia mecânica e metalúrgica possibilitaram a construção do rolo lotus em ferro fundido, apresentando baixo custo, tempo de fabricação adequado aos prazos das usinas, facilidade de operação durante a moagem e simplicidade de manutenção (SANCHEZ; CHAVARRO, 2013).

Delfini (2013) e Sanchez e Chavarro (2013), defendem a hipótese afirmando que, quando empregado de maneira adequada e em condições operacionais satisfatórias, o rolo lotus possibilita a redução da umidade do bagaço, do efeito da reabsorção e do transbordamento de caldo sobre o rolo superior, aumento da extração e da capacidade de moagem, facilita a aplicação do chapisco, possibilita maiores taxas de embebição, dispensa a utilização de succionadores de caldo e a utilização de frisos de passos diferentes. Com melhor

aproveitamento no remanejamento das camisas e padronização de pentes, melhora significativamente a eficiência das caldeiras.

2.4 Processo de fabricação

Para um bom dimensionamento de rolo lotus, algumas variáveis devem ser consideradas, como material, quantidade de boquilhas, furos longitudinais e frisos, conforme demonstra Figura 13.

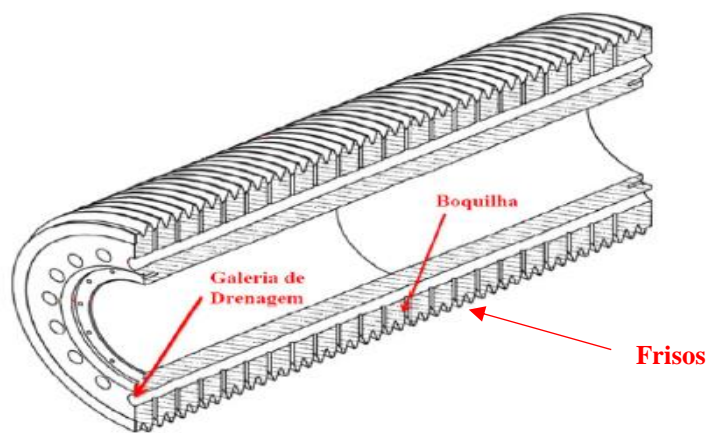


Figura 13 - Variáveis de dimensionamento do rolo lotus.

Fonte: Faber (2014)

2.4.1 Material

Para uma seleção adequada do material utilizado para a concepção de uma camisa de rolo de moenda, é imprescindível conhecer os esforços atuantes no componente. Geralmente é utilizado o método dos elementos finitos, como mostrado na Figura 14, para estimar as tensões e os pontos de concentração de tensão para otimizar o modo de produção e escolher o material mais adequado.

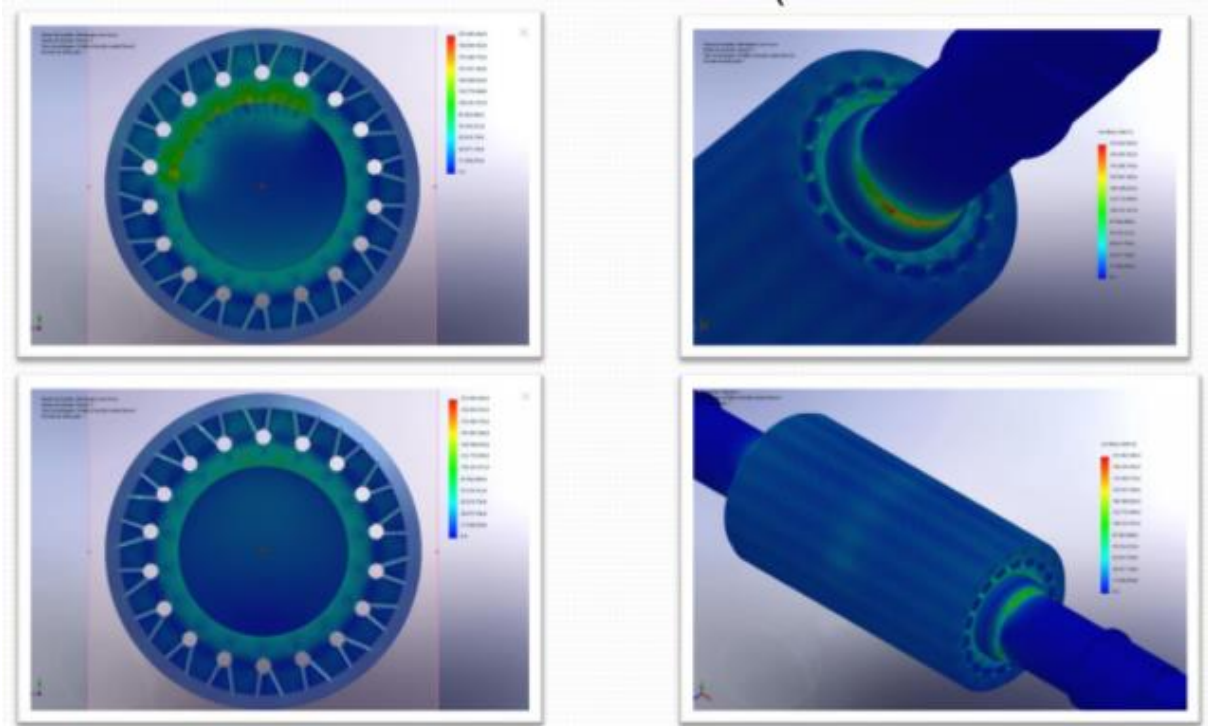


Figura 14 - Aplicação do método dos elementos finitos em um rolo de moenda

Fonte: Faber (2014)

Na Figura 15 é possível notar uma concentração de tensão em todo o diâmetro interno da camisa, que é justificada pelo ajuste por interferência utilizado na união com o eixo para impedir o escorregamento dos dois componentes.

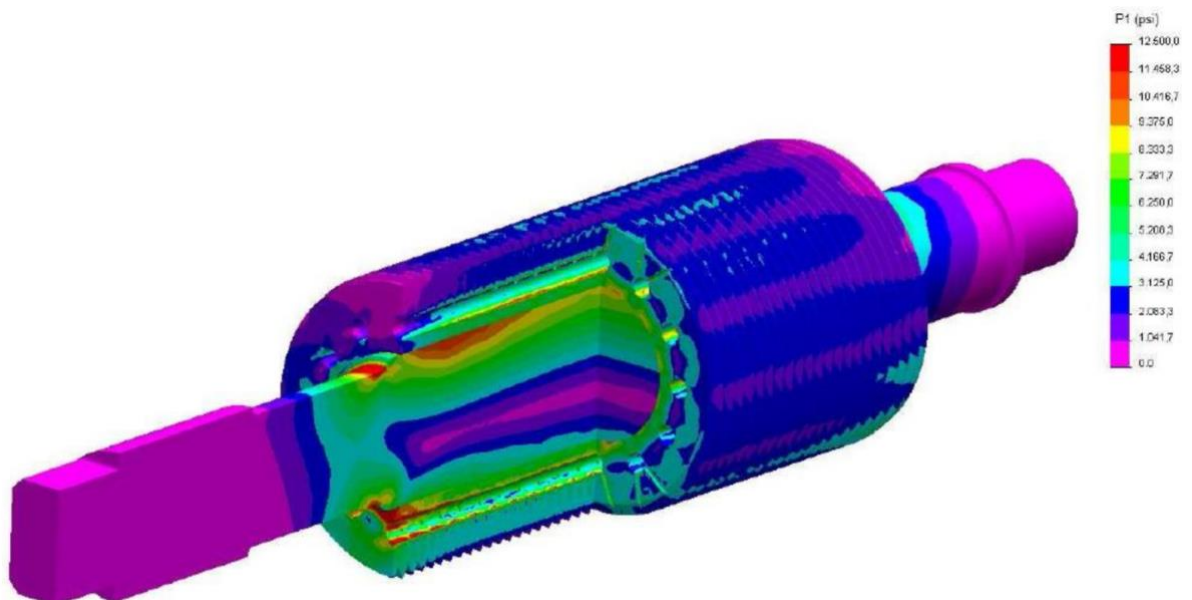


Figura 15 - Análise através de elementos finitos

Fonte: Delfini (2013)

2.4.2 Boquilhas

As boquilhas têm como função permitir a entrada do caldo para os furos axiais, evitando com que o bagaço entupa essa passagem. São fabricadas geralmente com furos cônicos (entrada menor que a saída) e feitas de latão C630, conforme ilustrado pela Figura 16.

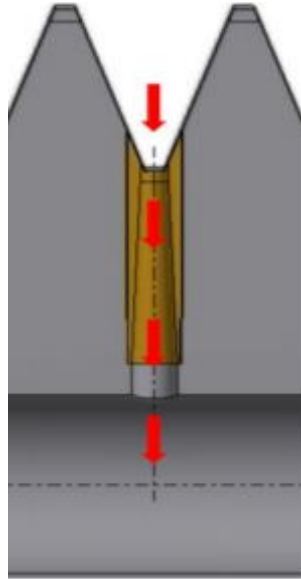


Figura 16 - Boquilha

Fonte: Lourenço (2019)

A quantidade de boquilhas é calculada conforme a Equação 1:

$$Qb = F_{fr} \cdot F_{long} \cdot q_{fr} \quad (1)$$

Onde:

Qb = Quantidade de boquilhas

F_{fr} = Quantidade de frisos

F_{long} = Quantidade de furos axiais

q_{fr} = Quantidade de furos por frisos e furos axiais.

As boquilhas mais utilizadas no mercado são as convencionais, mas existe um modelo intitulado filtrante que permite uma melhora na extração e diminuição da umidade em relação às boquilhas convencionais. Ambos os modelos são ilustrados na Figura 17.

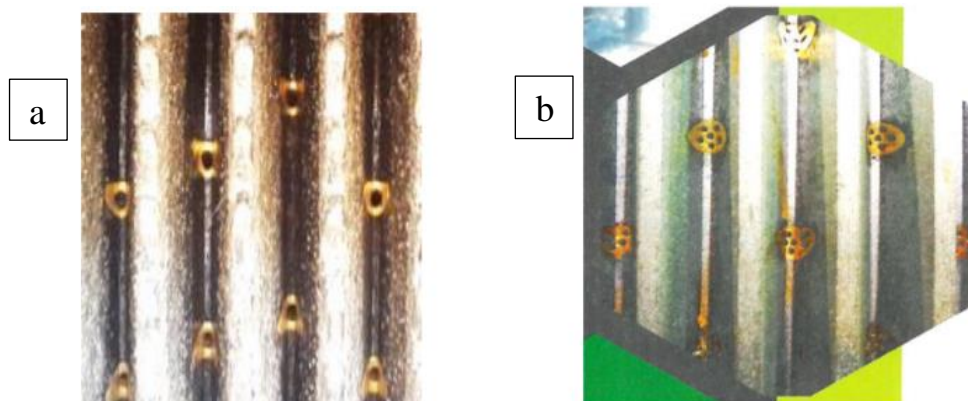


Figura 17 – Modelos de Boquilha: a) Boquilha convencional; b) Boquilha filtrante.

Fonte: Lourenço (2019)

2.4.3 Furos axiais

Os furos axiais são os responsáveis por drenar o caldo coletado pelas boquilhas e direcioná-lo para as calhas de coleta de caldo, onde é enviado para o gamelão do terno, estrutura que recebe o caldo extraído (funil) e o direciona até os tanques pulmão (tubulações). É de extrema importância levar em consideração a relação entre a área das boquilhas e a área dos furos axiais, pois, um furo axial com capacidade de absorção menor do que a das boquilhas pode inviabilizar toda a vantagem proposta pelo rolo lotus, uma vez que ocorrerá a reabsorção do caldo retido fora das galerias. Apesar de a literatura explicitar tal importância, não foi encontrado o dado exato da relação entre a área das boquilhas e a área dos furos axiais.

Outro ponto importante em relação ao rolo lotus é a proteção das fixações dos flanges mostrada na Figura 18, uma vez que o caldo será direcionado justamente onde as cabeças dos parafusos geralmente ficam expostas.

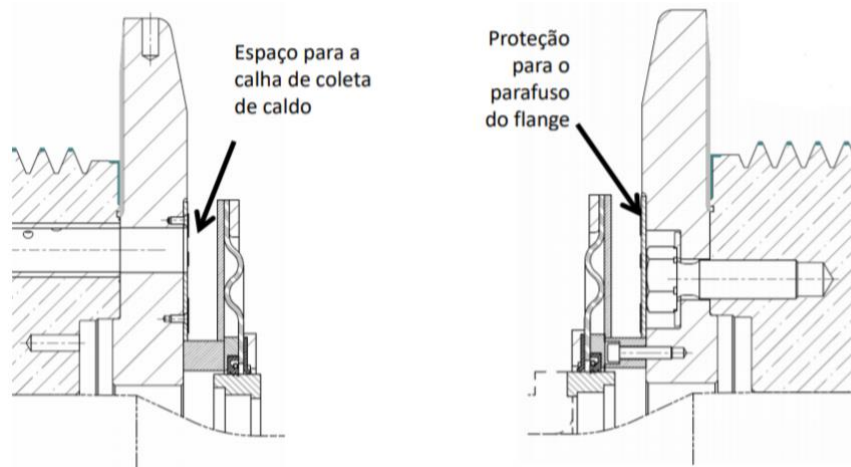


Figura 18 - Modificações necessárias nos flanges

Fonte: Lourenço (2019)

Geralmente os furos axiais são localizados entre os furos dos parafusos de fixação do flange, o que pode causar problemas de parede fina entre as duas cavidades como mostra a Figura 19.



Figura 19 - Falhas por baixa espessura de parede.

Fonte: Lourenço (2019)

Para solucionar o problema, são utilizados parafusos especiais com cabeça rebaixada como na Figura 20. Assim, é possível aumentar a espessura da parede e evitar trincas nessa localidade.



Figura 20 - Parafusos especiais com cabeça rebaixada.

Fonte: Lourenço (2019)

3 METODOLOGIA

O método de pesquisa utilizado foi o de Estudo de Caso. A escolha se deve ao fato de ser um método de estudo aplicado a um contexto contemporâneo que possibilita conhecimento amplo e detalhado de algo presente na teoria. A escolha também se ateu ao fato de que sua abordagem vem crescendo ao longo dos anos com notável sucesso.

De acordo com Yin (2001), fatores que estimulam o Estudo de Caso são: o esclarecimento do motivo que levou a uma tomada de decisão assim como a sua implementação e seus resultados atingidos. Esse método permite a elaboração de novas teorias ou aumento do entendimento de eventos reais e contemporâneos, sendo este último mais aplicado ao presente trabalho.

De acordo com Miguel (2012), o Estudo de Caso permite a análise histórica de um determinado acontecimento, baseando-se em múltiplas fontes de evidências.

Para apresentar o impacto econômico da adoção do rolo lotus em moendas de cana de açúcar, apresentou-se um balanço financeiro do impacto da diminuição de Açúcares Redutores Totais (ART) no bagaço destinado à alimentação da caldeira da indústria em estudo. Como esse açúcar seria queimado, quanto menos ART presente no bagaço nesta etapa, menor a reabsorção ocorrida no processo de moagem, resultando, portanto, em um processo mais eficiente.

Para isso, buscou-se os dados de extração das safras de 2014 a 2020 nos relatórios anuais da empresa sucroalcooleira. No relatório, coletou-se os dados de porcentagem de ART e

umidade no bagaço destinado à caldeira, a vazão mássica de cana-de-açúcar que entrava e de bagaço que saía da moenda, bem como as horas efetivas de moagem.

Com o objetivo de não distorcer o resultado com outros parâmetros, fixou-se variáveis como qualidade da cana, taxa de embebição, vazão mássica de entrada de cana e alteração do preço do produto.

Com o intuito de diminuir a reabsorção de caldo no processo de extração, a indústria sucroalcooleira passou a adotar o rolo lotus sistematicamente em seu processo. A cronologia dessas mudanças foi:

- 2014: Instalação no sexto terno da moenda;
- 2015: Instalação no primeiro terno da moenda;
- 2017: Os rolos lotus do sexto terno foram realocados para o quinto terno e instalados novos rolos no sexto terno;
- 2018: Os rolos lotus do primeiro terno foram realocados para o segundo terno e instalados novos rolos no primeiro terno.

Para o cálculo da perda de produto devido à quantidade de ART presente no bagaço, foram fixados todos os dados com exceção do ART médio fornecido pela empresa, e foi utilizada a conversão de ART em açúcar conforme sugerido pela União dos Produtores de Bioenergia (2021), de 1 kg de açúcar para 1,04726 kg de ART.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 1 estão os cálculos utilizados para verificar o custo da perda de ART no bagaço de cana.

Quadro 1 - Cálculo para perda de produto.

Dados	2014	2020
Vazão mássica de entrada de cana	500 ton/h	
Vazão de bagaço produzido	155 ton/h	
Porcentagem de ART no bagaço	2,290 %	1,827%
Horas efetivas de moagem	5000 horas	
R\$/Saca de 50 Kg	R\$ 115,00	
Custo da perda de ART no bagaço	R\$ 51.692.500,00	R\$ 32.566.275,00

Fonte: o autor

Observa-se que no ano de 2014, nos meses anteriores da instalação dos rolos lotus no processo de moenda da empresa sucroalcooleira, houve uma perda de R\$ 51.692.500,00, enquanto que no ano de 2020, após a instalação dos rolos, a perda foi de R\$ 32.566.275,00, diminuição de 37%, resultando num custo teórico evitado de R\$ 19.126.225,00.

Este fato corrobora com os estudos de Delfini (2013) e Sanchez e Chavarro (2013), que afirmaram que há aumento da extração do caldo de cana, bem como redução do efeito da reabsorção, resultando numa menor concentração de ART presente no bagaço, que culmina em menos desperdícios tanto no processo de moagem quanto no processo de queima do bagaço residual.

Essa diminuição dos custos por perda de produto pôde ser notada ao longo do tempo, como ilustra a Figura 21, onde a concentração de ART presente no bagaço destinado à caldeira diminuiu de 2,29% em 2014 para 1,83% em 2020, com redução de 20,1%.

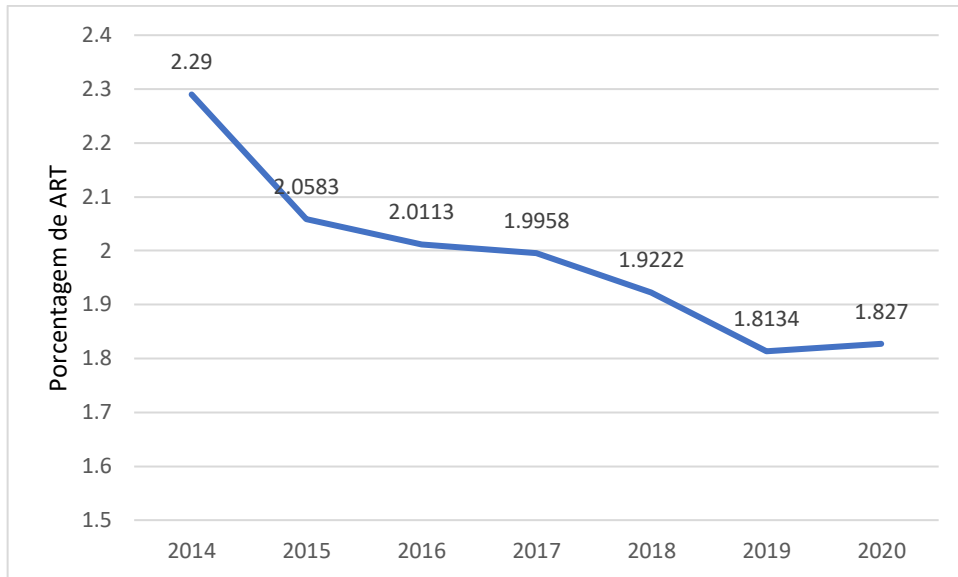


Figura 21 - Porcentagem de ART no bagaço destinado à caldeira entre 2014 e 2020

Fonte: o autor

Em relação a umidade no bagaço no final do processo de moagem, não foi possível identificar variação significativa de acordo com os relatórios da empresa, conforme ilustra Figura 22.

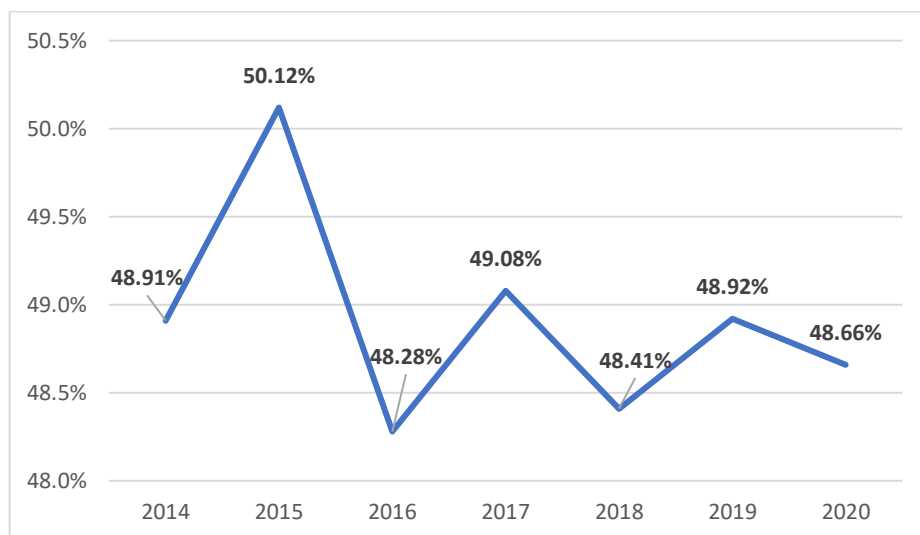


Figura 22 - Porcentagem de umidade presente no bagaço ao final do processo de moagem

Fonte: o autor

Este fato não corrobora com os achados de Delfini (2013) e Sanchez e Chavarro (2013), que observaram uma diminuição na umidade do bagaço processado por rolos lotus. Entende-se que esse aumento ou não na umidade do bagaço processado depende de outros fatores que não

foram abordados neste trabalho, como por exemplo, qualidade de matéria prima, armazenamento e condições de processamento.

Com maior extração de caldo, obtêm-se um bagaço mais seco, com volume menor. Isso permite aumentar a taxa de entrada de cana nas moendas, o que conseqüentemente aumenta a produção. Foi possível observar os resultados desta maior extração de caldo, com o aumento da vazão mássica de cana e, portanto, da produtividade, durante os anos do estudo, conforme ilustra a Figura 23. Partiu-se de 569 toneladas de cana por hora em 2014, chegando a 603,5 ton/h, um aumento de 6,1%.

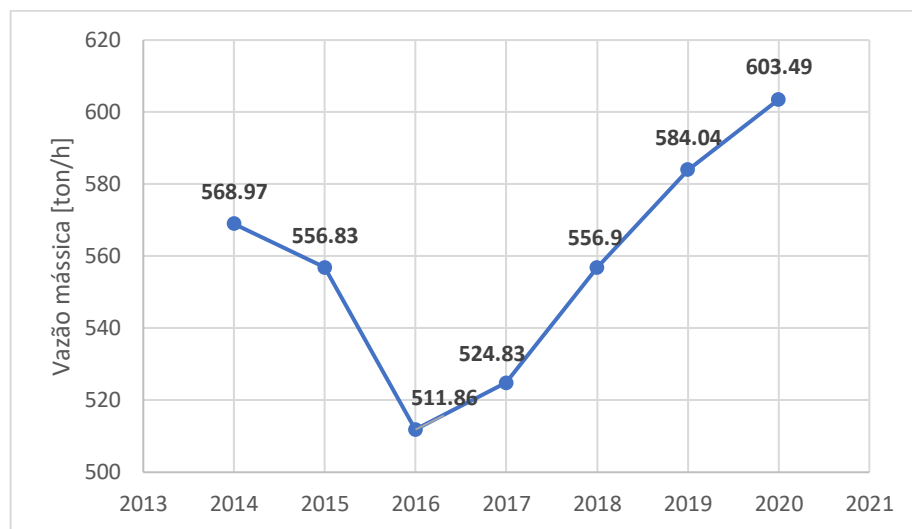


Figura 23 - Vazão mássica de entrada de cana nas moendas

Fonte: o autor

5 CONCLUSÃO

Caracterizado como um pré-tratamento físico, a pulverização mecânica do bagaço da cana por moagem produz partículas finas com cristalinidade reduzida de celulose, o que aumenta a produtividade do processamento da cana. Desta forma, a moagem se caracteriza como uma etapa crítica do processo de produção de açúcar.

O presente trabalho pretendeu estudar a viabilidade econômica de quatro rolos lotus que foram instalados em uma indústria sucroalcooleira do centro norte goiano. Embora estes tipos de rolos utilizados no processo de moagem tenham maior custo de aquisição e instalação quando comparados aos rolos tradicionais, esperou-se demonstrar ganhos de produtividade que justificassem seu investimento. Também pretendeu-se avaliar se houve diminuição na umidade do bagaço e demonstrar os benefícios gerados por uma extração de última geração.

Com os resultados obtidos pela realização desse trabalho, pôde-se observar, após a instalação dos rolos lotus no processo de moagem, uma diminuição de 37% de perda financeira devido à presença de ART no resíduo a ser incinerado. A concentração de ART no bagaço de cana diminuiu de 2,29% em 2014 para 1,83% em 2020, redução de 20,1%. Também houve um aumento de 6,1% na vazão mássica de cana processada pela moenda, partindo de 569 ton/h em 2014 e chegando a 603,5 ton/h em 2020, o que culmina em um aumento de produtividade da indústria em que os rolos estão instalados.

Desta forma, conclui-se que os objetivos gerais e específicos foram alcançados, e a hipótese inicial de que os rolos lotus possuem eficiência economicamente viável para a empresa foi confirmada, concordando com o que foi apontado na revisão bibliográfica.

Sugere-se, para trabalhos futuros, estudar se há ou não, com a alteração no tipo de rolo da moenda, diminuição da umidade presente no bagaço de cana que será direcionado para a caldeira da usina. Os resultados encontrados neste trabalho não confirmaram tudo o que foi encontrado na literatura, uma vez que foi apresentado que não houve a mesma variação na umidade do bagaço. Outra sugestão é fazer o estudo de viabilidade dos custos de implementação da moenda com os rolos lótu, com o ponto de equilíbrio, ROI, entre outros dados financeiros.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN). 2017. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Bala-Energetico-Nacional-2017>>. Acesso em 20 mar. 2021.

CONAB. **Boletim da Safra de Cana-de-Açúcar, Brasília, v. 6 - Safra 2019/20, n. 1 - Primeiro levantamento, maio de 2019**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/26522_a59699997ccd7d2a58a5c9a29371b267>. Acesso em: 28 mar. 2021

Centro de Tecnologia Copersucar. **Apostila do Curso de Engenharia Açucareira**. 1ª Ed. Piracicaba, 2002

DELFINI, P. T. **Eficiência e custos na extração de caldo**. Disponível em: <https://sucroenergetico.revistaopinioes.com.br/revista/detalhes/10-eficiencia-e-custos-na-extracao-de-caldo/>. Acesso em: 22 mar. 2021.

DELFINI, P. T. **Revisão da Moenda**. In: 14o SBA - SEMINÁRIO BRASILEIRO AGROINDUSTRIAL - A usina da superação, Ribeirão Preto, 2013.

DEEPCHAND, K. Characteristics, present use and potential of sugar cane tops and leaves. **Agricultural Wastes**, [s. l.], v. 15, n. 2, 1986. Available at: [https://doi.org/10.1016/0141-4607\(86\)90045-4](https://doi.org/10.1016/0141-4607(86)90045-4)

FABER, A. N. SADE – **Sistema de Alta Drenagem e Extração**. Dedini. In: 15o SBA – SEMINÁRIO BRASILEIRO AGROINDUSTRIAL – Usina da sobrevivência, 2014, Ribeirão Preto. Disponível em: http://www.stab.org.br/15sba/web/10_angelo_dedini.pdf. Acesso em 15 abr. 2021.

FLAUSINIO, B. F. P. G. **Produção de energia elétrica a partir do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar gerado no setor sucroalcooleiro** de minas gerais. Tese (Doutorado de Engenharia Nuclear e da Energia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

HEILMANN, G.G. **Planejamento e controle de manutenção industrial no setor Sucroenergetico – Lotus Roll – camisa de alta drenagem em extração de caldo de cana de açúcar**. Piracicaba: Fundação Municipal de Ensino de Piracicaba/Escola de Engenharia de Piracicaba, 2015. 65 p. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil.

HIRA, A.; DE OLIVEIRA, L. G. No substitute for oil? How Brazil developed its ethanol industry. **Energy Policy**, [s. l.], v. 37, n. 6, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.02.037>

INOUE, H. *et al.* Combining hot-compressed water and ball milling pretreatments to improve the efficiency of the enzymatic hydrolysis of eucalyptus. **Biotechnology for Biofuels**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 1–9, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1186/1754-6834-1-2>. Acesso em: 15 jun. 2021.

LOURENÇO, F. **Camisas Perfuradas**. In: 20 SBA- SEMINÁRIO BRASILEIRO AGROINDUSTRIAL- A usina em transformação, 2019, Ribeirão Preto. Disponível em: http://www.stab.org.br/iv_sem_inter_stab_sul2019/ind_27/27_ind_paulo_delfini.pdf. Acesso em 24 abr. 2021.

MARGEOT, A. *et al.* **New improvements for lignocellulosic ethanol**. [S. l.: s. n.], 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2009.05.009>

MIGUEL, P. A. C., *et al.* **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. p 131-148.

REIN, Peter. **Cane Sugar Engineering**. 1ª Ed. 2013, Pág. 105; Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/140556875/Cane-Sugar-Engineering>. Acesso em 02/05/2021.

SANCHEZ, J. J.; CHAVARRO, S. **Reduciendo la reabsorcion de jugo en molinos de caña mediante el uso de mazas con drenajes internos: mayor extraccion de sacarosa y menor humedad en el bagazo**. Disponível em: <https://www.laica.co.cr/biblioteca/servlet/DownloadServlet?c=443&s=2521&d=1260>. Acesso em: 07 abr. 2021.

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA. **Fórmulas e Conversões utilizadas no setor sucroalcooleiro**. Disponível em: https://www.udop.com.br/download/estatistica/setor_sucroenergetico/formulas_conversoes_utilizadas_setor.pdf. Acesso em: 21 mar. 2021.

USINA SÃO FERNANDO. **Produção Agrícola**. Disponível em: http://www.usinasaofernando.com.br/conteudo_site.asp?tipoID=3. Acesso em: 20 maio 2021.

YIN, R. T. K. **Estudo de Caso - Planejamento e Método**. São Paulo: Bookman, 2001.

APÊNDICE A – Fotos do Rolo Lotus



Figura A.1 - Rolo lotus ao lado de um operador

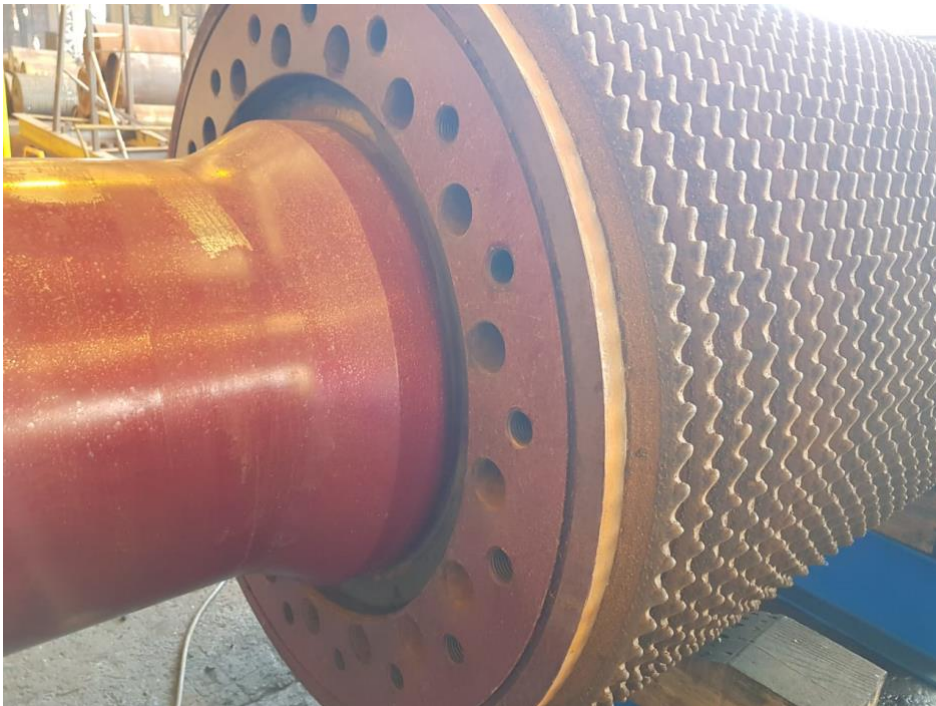


Figura A.2 - Frisos do rolo lotus

APÊNDICE B – Fotos da Montagem do Rolo Lotus



Figura 24 - Instalação das boquilhas no rolo lotus

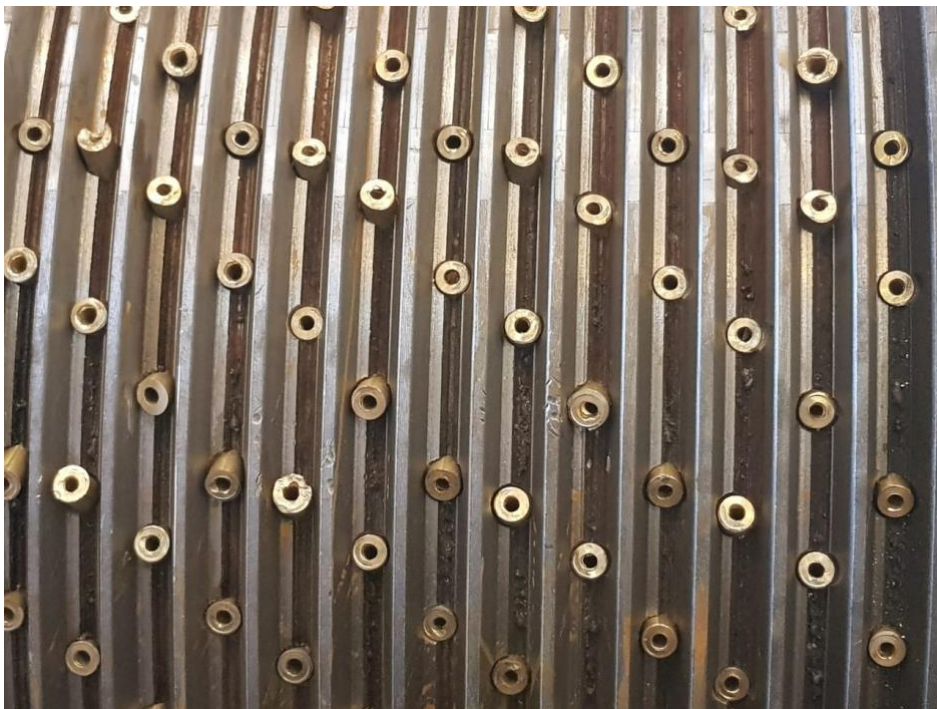


Figura B.2 - Boquilhas já instaladas no rolo lotus