



**INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FELIPE GUEDES
GUILHERME B. FARIA
NIKAEL RESENDE
JOICE PALOMA**

TERNO DE MOAGEM DE CANA-DE-AÇÚCAR

**Arcos-MG
2017**

**FELIPE GUEDES
GUILHERME B. FARIA
NIKAEL RESENDE
JOICE PALOMA**

TERNO DE MOAGEM DE CANA-DE-AÇÚCAR

Relatório Final apresentado ao Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), em cumprimento a exigência a disciplina de Trabalho Acadêmico Integrador II.

Orientador (a): Prof. Dr. Francisco Junior

**Arcos-MG
2017**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos de nossas famílias que vem nos apoiando nessa nova jornada na qual iniciamos.

Agradeço também ao nosso orientador Prof. Dr. Francisco Junior, por nos orientar diretamente disciplina TAI, e a todos os demais professores pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço a todos que colaboraram no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A moagem é uma das primeiras operações do processamento de uma usina sucroalcooleira e fundamental para os próximos processos de produção da usina. Este trabalho tem por finalidade apresentar um sistema básico de extração de caldo de cana-de-açúcar industrial, em especial o terno de moenda, que são um conjunto de componentes de pressurização de baixa velocidade e alta pressão que são utilizados nas indústrias do ramo sucroalcooleiros. A moenda é um sistema de separação física e de ampla utilização no mundo e no Brasil desde o período colonial. Portanto, o trabalho busca apresentar o processo de funcionamento de um terno de forma objetiva e detalhar alguns procedimentos operacionais em especial com demonstração de cálculos. Assim, focando na atuação de um engenheiro mecânico em tais atividades para tal tarefa, são utilizados conceitos, fórmulas, tabelas, softwares computacionais, em especial o de modelagem 3D, além de outras ferramentas.

Palavras-chave: usinas sucroalcooleiras; extração; moenda; terno.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Conjunto de moagem.....	11
Figura 2 – Vista do terno de moenda.....	12
Figura 3 – Castelo de moenda.....	13
Figura 4 – Rolos de moenda.....	13
Figura 5 – Bagaceira.....	14
Figura 6 – Cabeçote Hidráulico.....	15
Figura 7 – Pente.....	15
Figura 8 – Esteira intermediaria.....	16
Figura 9 – Sistema de embebição.....	17
Figura 10 – Material uso consumo.....	25
Figura 11 – Material manutenção e reposição.....	26
Figura 12 – Serviço manutenção e conservação.....	26
Figura 13 – Consumo de óleo mensal.....	27
Figura 14 – Total de horas paradas x número de paradas.....	29
Figura 15 – Acumulo de paradas X % acumulada.....	30
Figura 16 – Número de paradas.....	31
Figura 17 – Total horas paradas.....	31
Figura 18 – Castelo em 3D.....	32
Figura 19 – Pente em 3D.....	32
Figura 20 – Rolo em 3D.....	33
Figura 21 – Cabeçote inferior em 3D.....	34
Figura 22 – Mancal deslizante em 3D.....	34
Figura 23 – Bagaceira em 3D.....	35
Figura 24 – Suporte do pente em 3D.....	36
Figura 25 – Terno de Moenda 3D.....	36
Figura 26 – Terno de Moenda 3D II.....	37
Figura 27 – Solidworks.....	37
Figura 28 – Gráfico de pizza em Matlab.....	41
Figura 29 – Gráfico de barras em Matlab.....	41

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Custo de Manutenção Moenda.....	25
Tabela 2- Consumo de Óleo Mensal.....	28
Tabela 3- Principais motivos de paradas.....	29
Tabela 4 - Tolerâncias dimensionais do castelo.....	33
Tabela 5- Tolerâncias dimensionais do pente.....	33
Tabela 6 - Tolerâncias dimensionais do rolo.....	34
Tabela 7- Tolerâncias dimensionais do Cabeçote.....	35
Tabela 8 - Tolerâncias dimensionais do mancal deslizante.....	36
Tabela 9- Tolerâncias dimensionais da bagaceira.....	36
Tabela 10- Tolerâncias dimensionais do suporte do pente.....	37
Tabela 11 – Comandos de entradas.....	39-40
Tabela 12 – Comandos de saída.....	42-43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 JUSTIFICATIVA	10
3 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS.....	11
4 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	11
4.1 PREPARO PARA MOAGEM	11
4.2 TERNO DE MOENDA	12
4.3 CASTELOS	12
4.4 ROLOS.....	13
4.4.1 Rolo de Pressão.....	14
4.4.2 Rolo Superior.....	14
4.4.3 Rolos Inferiores	14
4.5 BAGACEIRA	14
4.6 CABEÇOTES HIDRÁULICOS.....	15
4.7 PENTES	16
4.8 ESTEIRA INTERMEDIARIA.....	17
4.9 EMBEBIÇÕES	17
4.9.1 Embebição Simples	17
4.9.2 Embebição Composta	18
5 METODOLOGIA	18
5.1 CÁLCULO DO RAO DOS ROLOS.....	18
5.1.1 Estudo da Relação de Rotação Entre os Rolos	19
5.1.2 Cálculo da Velocidade Angular.....	20
5.1.3 Cálculo dos Gastos de Energia, Produção em Litros por Dia e Lucro Bruto de um Terno	20
5.2 PRESSÃO HIDRÁULICA	21
5.2.1 Pressão Hidráulica Específica.....	22
5.2.2 Cálculo de Torque.....	23
5.2.3 Cálculo da Potência Mecânica.....	24
5.3 CÁLCULO DA REAÇÃO RESULTANTE QUANDO NÃO HÁ REABSORÇÃO.....	24
5.4 CUSTO DE MANUTENÇÃO DA MOENDA.....	25
5.4.1 Consumo de Óleo Mensal da Moenda.....	27
5.4.2 Principais Motivos de Paradas.....	28
5.4.3 Relação Total de Horas Paradas e Número de Paradas	29
5.4.4 Relação Acumulo de Paradas e Porcentagem Acumulada	30
5.4.5 Relação Número de Paradas e Total de Horas Paradas	31
5.5 TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS	32
5.5.1 Tolerâncias do Castelo.....	33
5.5.2 Tolerâncias Pente.....	33
5.5.3 Tolerâncias Rolo.....	34
5.5.4 Tolerância Cabeçote	35
5.5.5 Tolerância Mancal Deslizante	35
5.5.6 Tolerância Bagaceira	36

5.6 MODELAGEM 3D.....	37
5.7 SCRIPT EM MATLAB	39
5.7.1 Gráfico Pizza	42
5.7.2 Gráfico Barras.....	42
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS.....	45
APÊNDICE I.....	49
APÊNDICE II	56
APÊNDICE III.....	60

1 INTRODUÇÃO

A partir do período colonial do século XVI, iniciou-se o processo de extração do caldo da cana-de-açúcar no Brasil com os engenhos e desde então as empresas do setor sucroalcooleiros buscam melhorar a eficiência de seus processos. Para que todo equipamento de uma usina possa funcionar corretamente e com bom desempenho é preciso que cada área execute bem a sua função. O aprimoramento nos ternos de moendas é importante para o processo de extração do caldo da cana nas usinas, pois uma falha nesta etapa do processo compromete todas as fases adiante, gerando prejuízos e atrasos na produção. Assim, para garantir o bom funcionamento dos ternos de moenda é importante ter cuidado nos procedimentos de operação e dos elementos específicos que compõem o maquinário.

A moenda, como processo de extração de caldo, é o sistema mais utilizado estando presente em pelo menos 98% das usinas e destilarias do Brasil, que, aliás, são as mais competitivas do mundo. Este nível de competitividade das indústrias sucroalcooleiras brasileiras foi obtido como consequências de vários fatores (Simisa/Empral, 2017).

A extração do caldo é uma das fases importantes nas usinas o qual consiste no processo físico de separação da fibra e pode ser realizada fundamentalmente por moendas. Na moenda a extração é feita por pressão mecânica dos rolos sobre o colchão de cana desfibrada. Esse procedimento é a base de toda a usina, pois além da extração do caldo ele envia o bagaço para a área de cogeração de energia.

Assim, o presente trabalho apresenta o funcionamento dos ternos de moenda nos processos de operações das moendas, de manutenção em geral e a criação de um conjunto mecânico do terno de moenda em 3D utilizando *softwares* de modelamento.

2 JUSTIFICATIVA

Atualmente o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar no mundo. Segundo o levantamento da Conab (2017), o volume de cana-de-açúcar processado no Brasil será de 647,6 milhões de toneladas de cana na safra 2017/2018. As indústrias que atuam no setor sucroalcooleiro e de bioenergia vêm cada vez mais se destacando no mercado pela sua geração de energia elétrica por biomassa da cana que corresponde atualmente há 3,5% da produção da matriz energética brasileira. A quantidade de açúcar produzido na safra 2015/2016 foi de 691 milhões toneladas, e a produção de etanol na safra 2015/2016 atingiu cerca de 30 bilhões de litros. Para obter esses valores as usinas aplicam altos investimentos nas manutenções de entre safra, e buscam cada vez mais realizar melhorias em suas instalações através de profissionais capacitados.

Portanto, os conhecimentos dos procedimentos aplicados nas moendas são essenciais para uma boa safra sem prejuízos.

As manutenções durante a entre safra é um ponto importante para que ocorra um bom aproveitamento da sacarose extraída das canas desfibradas. A má extração do caldo da cana-de-açúcar nas moendas pode diminuir a produção de açúcar e etanol gerando impacto direto nos custos das usinas.

Assim também, uma manutenção bem executada diminuirá prejuízos como a quebra de equipamentos e tempo parado de moagem sem a extração do caldo da cana-de-açúcar durante a safra.

A extração do caldo, assim como outros processos, exige alguns cuidados para que ao iniciar a moagem se alcance o maior volume de matéria-prima para que não se obtenha prejuízos com mau uso a partir da separação da fibra e do caldo da cana-de-açúcar. Assim, conhecer a evolução das tecnologias incorporadas neste método, desde o início até hoje, é muito importante, além disso: “Antecipar-se ao futuro da extração se torna essencial para quem quer se perpetuar neste negócio” (DELFINI, 2016).

3 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Os objetivos gerais deste trabalho é apresentar o funcionamento dos ternos de moendas de modo que se adquiram novos conhecimentos e um embasamento teórico e prático.

Os objetivos específicos é a demonstração de alguns cálculos aplicados nos ternos de moendas e a criação de uma modelagem 3D com utilização de *softwares*.

4 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

As moendas são formadas geralmente por quatro a sete ternos em série, onde ocorre o processo de extração do caldo da cana-de-açúcar por pressão mecânica. Cada conjunto de moenda é formado por três rolos principais denominados: rolo de entrada, rolo superior e rolo de saída. Normalmente, as moendas contam com um quarto rolo, rolo de pressão, que melhora a eficiência de alimentação e a de extração.

Figura 1 – Conjunto de moagem



Fonte: dsempral (2017)

4.1 Preparo para moagem

A mesa alimentadora, que recebe as cargas de cana do estoque, ou diretamente dos caminhões, alimenta e controla a quantidade de cana sobre uma esteira metálica que a transfere ao setor de preparo. O preparo tem o propósito de aumentar a capacidade de moagem, a densidade da cana, como também realizar o máximo rompimento das células da cana facilitando-se a extração do caldo nas moendas, garantindo uma extração maior. Portanto, este processo se destaca pelas vantagens no:

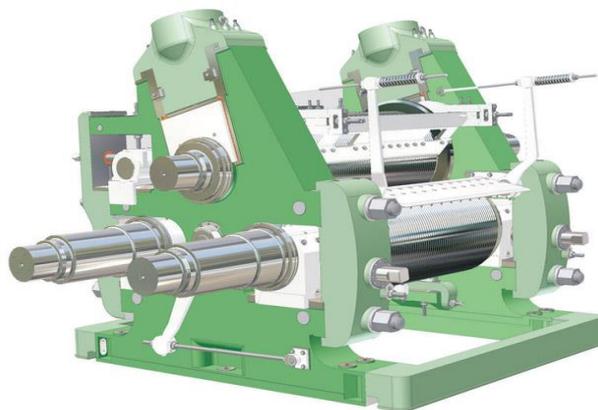
- Aumento do rendimento da usina;
- Regularidade de alimentação das moendas;
- Redução do consumo de energia;
- Homogeneização do teor de fibras nas canas;
- Redução do desgaste e quebra das moendas.

Este processo consiste em alguns equipamentos, como o nivelador que proporciona a cana nivelada numa esteira transportadora para que o picador possa diminuir a estrutura da cana, o tambor alimentador que pressiona a cana para passar entre a placa desfibradora e o desfibrador de martelos pesados, que desfibra a cana, em seguida o espalhador que nivela a quantidade de cana desfibrada na esteira que alimenta o primeiro terno da moenda.

4.2 Terno de Moenda

A função do terno de moenda é forçar a cana a passar pelas aberturas entre os rolos de maneira que separe o caldo contido no bagaço.

Figura 2 – Vista do terno de moenda



Fonte: Simisa/Empral (2017)

4.3 Castelos

Os castelos são peças metálicas que sustentam os rolos do terno da moenda. São constituídos em aço ou ferro fundido e possuem três fendas, duas laterais e uma superior, onde são fixados os rolos.

Figura 3 – Castelo de moenda



Fonte: Simisa/Empral (2017)

4.4 Rolos

O terno é composto por 4 rolos: um de pressão com dimensionamento único e três outros idênticos; sendo eles o rolo superior, o rolo de entrada e o rolo de saída os quais formam uma triangulação.

Figura 4 – Rolos de moenda



Fonte: <http://www.douradosequipamentos.ind.br/componentes/img/uploads/Original-44191301102015-01.jpg>

(Acesso em 13 abril 2017)

4.4.1 Rolo de Pressão

Encontra-se na parte superior do terno logo acima do rolo de entrada. Sua principal função é compactar a cana de forma que otimize a alimentação do Terno (ZOCCA, 2017).

4.4.2 Rolo Superior

Encontra-se na parte superior do castelo entre os rolos de entrada e saída e é o único dos rolos que gira em sentido anti-horário. Sua principal função é ter maior contato com a cana assim ajudando no direcionamento da mesma através da força de seu acoplamento e transmitindo para os demais rolos (ZOCCA, 2017).

4.4.3 Rolos Inferiores

Encontram-se na parte inferior do castelo. Em todo terno de moenda existem dois rolos inferiores, que são respectivamente entrada e saída. A principal função do rolo de entrada é fazer uma pequena extração e direcionar a cana para saída onde há uma maior extração do caldo (ZOCCA, 2017).

4.5 Bagaceira

A bagaceira tem como função conduzir o bagaço do rolo de entrada para o rolo de saída. A regulagem da bagaceira é realizada por um subconjunto do terno, cujos principais componentes são: bagaceira, balança, suporte da balança e o pino excêntrico. (CALTAROSSO, 2008).

Figura 5 - Bagaceira



Fonte: <http://www.faguavermelha.ind.br/produto/bagaceira-com-metalizacao.html> (Acesso em 13 abril 2017)

4.6 Cabeçotes Hidráulicos

São projetados para suportar altas pressões e tem como finalidade fornecer pressão constante na cana de açúcar qual passara sob os ternos da moenda independente da oscilação da vazão.

As forças são transmitidas para as caixas dos mancais superiores através de um pistão com ponta esférica assim eliminando esforços laterais.

Um cabeçote hidráulico é composto pelas seguintes peças:

- Corpo;
- Bucha de bronze;
- Pistão;
- Bloco de fechamento;

Figura 6 – Cabeçote hidráulico



Fonte: (DEDINI, 2007)

4.7 Pentes

Existem dois pentes num terno, o pente superior e o pente inferior; ambos ficam localizados na parte traseira do terno.

O pente superior geralmente é fabricado em aço fundido e tem como função limpar as ranhuras ou frisos do rolo superior e de extrair o caldo através de calhas. Já o pente inferior é fabricado em ferro fundido e tem como função a limpeza dos rolos inferiores de saída e evitar o acúmulo de bagaço nos mesmos.

Figura 7 - Pente



Fonte: <http://zbn.com.br/assets/pente-1.png> (Acesso em 13 abril 2017)

4.8 Esteira Intermediaria

Ela não é um componente do terno em si, porém tem uma função muito importante que é transportar a cana ou bagaço de um terno para outro assim completando o processo de extração.

Figura 8 – Esteira intermediaria



Fonte: http://www.calnil.ind.br/produtos_5.htm (Acesso em 13 abril 2017)

4.9 Embebições

É o processo o qual se injeta água ou caldo no bagaço entre um terno e outro para aumentar a diluição do caldo aumentando a quantidade extraída no próximo terno.

Existem dois tipos de embebição, a embebição simples e a embebição composta quais serão a seguir comentados.

4.9.1 Embebição Simples

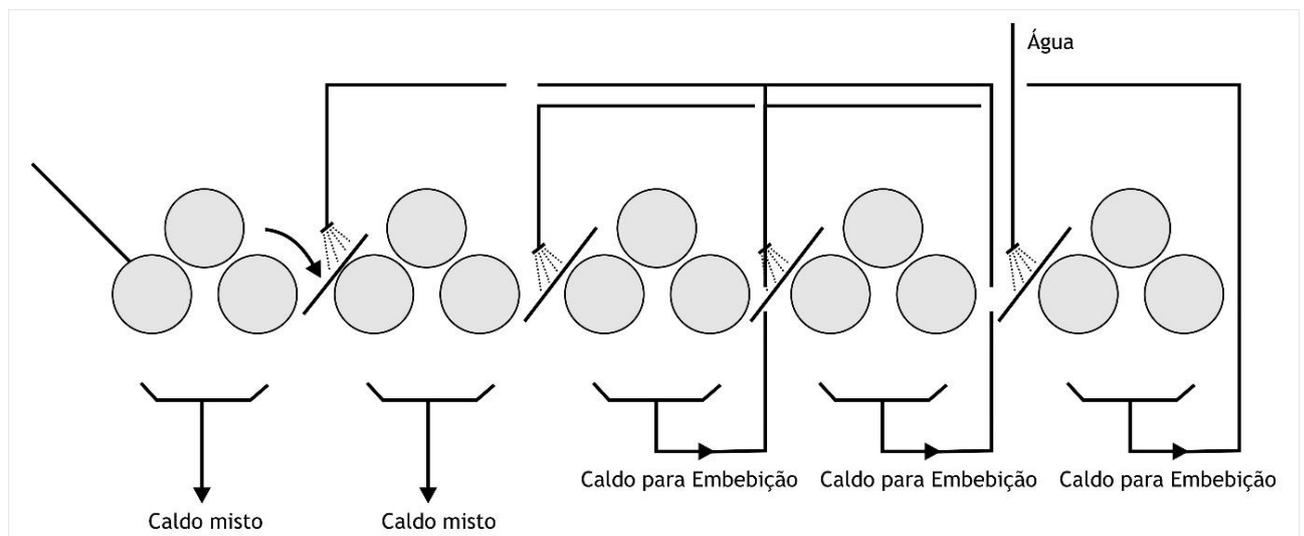
Somente água é aplicada no bagaço em cada terno começando pelo segundo, pois na entrada há uma vazão grande de cana e bagaço, não sendo necessário a aplicação de água nesta etapa.

4.9.2 Embebição Composta

É a mais utilizada nas moendas e trata da aplicação de toda água de embebição no último terno da moenda; o caldo deste terno é então bombeado ao terno anterior e aos demais até chegar ao segundo terno onde se encerra esse ciclo.

Logo após o fim do ciclo, é retomado todo o processo de maneira contínua.

Figura 9 – Sistema de embebição



Fonte: (SEaD/UFSCar, 2011).

5 METODOLOGIA

5.1 Cálculo do Raio dos Rolos

Sabendo que os ternos possuem quatro rolos, sendo três; rolo superior, rolo de entrada e rolo de saída, de mesmo diâmetro e um rolo de pressão de diâmetro diferente, calculam-se primeiramente os raios:

$$R = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_4 \end{bmatrix}$$

Onde:

R= Raio (m);

D= Diâmetro (m);

Resultado para o terno 35"x72":

$$R = \begin{bmatrix} 0.4445 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4445 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4445 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4140 \end{bmatrix} \text{ metros}$$

Resultado para o terno 34"x66":

$$R = \begin{bmatrix} 0.4318 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4318 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4318 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4140 \end{bmatrix} \text{ metros}$$

5.1.1 Estudo da Relação de Rotação Entre os Rolos

Sendo a velocidade linear igual a todos os rolos, 0.2560m/s, uma vez que, estão em contato entre si externamente, tem-se:

$$n = \frac{30V}{\pi R}$$

Onde:

V= Velocidade linear (m/s);

n= Rotação (rpm);

R= Raio do rolo (m);

Resultado para o terno 35"x72":

$$n = \begin{bmatrix} 0.716 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.716 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.716 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.769 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 7.68 \\ 7.68 \\ 7.68 \\ 7.68 \end{bmatrix} \rightarrow n = \begin{bmatrix} 5.5 \\ 5.5 \\ 5.5 \\ 5.9 \end{bmatrix} \text{ rpm}$$

Resultado para o terno 34"x66":

$$n = \begin{bmatrix} 0.737 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.737 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.737 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.769 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 7.47 \\ 7.47 \\ 7.47 \\ 7.47 \end{bmatrix} \rightarrow n = \begin{bmatrix} 5.5 \\ 5.5 \\ 5.5 \\ 5.7 \end{bmatrix} \text{ rpm}$$

5.1.2 Cálculo da Velocidade Angular

Para isolar-se a velocidade angular pelos conceitos de matrizes faz-se o seguinte processo:

$$\omega = R^{-1}V$$

Onde:

W= Velocidade angular (rad/s);

V= Velocidade linear (m/s);

R= Raio do rolo (m);

Resultado para o terno 35"x72":

$$W = \begin{bmatrix} \frac{1}{0.4445} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{0.4445} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{0.4445} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{0.4140} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.2560 \\ 0.2560 \\ 0.2560 \\ 0.2560 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.575928 \\ 0.575928 \\ 0.575928 \\ 0.6184 \end{bmatrix} \text{rad/s}$$

Resultado para o terno 34"x66":

$$W = \begin{bmatrix} 2.3159 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.3159 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.3159 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.4155 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.249 \\ 0.249 \\ 0.249 \\ 0.249 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega 1 \\ \omega 2 \\ \omega 3 \\ \omega 4 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0.575961 \\ 0.575961 \\ 0.575961 \\ 0.6001 \end{bmatrix} \text{rad/s}$$

5.1.3 Cálculo dos Gastos de Energia, Produção em Litros por Dia e Lucro Bruto de um Terno

Para o gasto de energia diário considera-se quatro motores de potência igual a 294.6 KW, sendo que a moenda trabalha 24 horas por dia, calcula-se o consumo de energia em KWh pela equação:

$$\begin{bmatrix} 4P & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & PD \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ PKW \\ Plitros \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ Creais \\ L \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 294.6 & 0 & 0 \\ 0 & 28281.6 & 0 \\ 0 & 0 & 15000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 24 \\ 0.6 \\ 0.8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ Creais \\ L \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 28281.6 \\ 16968.96 \\ 22500,00 \end{bmatrix} \begin{matrix} KW \\ R\$ \\ R\$ \end{matrix}$$

Onde:

E= Consumo de energia (KWh);

P= Potência do motor (KW);

t= Tempo de funcionamento por dia (h);

C reais= Consumo de energia (R\$);

PKW= Preço do KW;

L= Receita (R\$);

PD= Produção de garapa por dia (litros);

Plitros= Preço do litro de garapa (R\$/L);

5.2 Pressão Hidráulica

Aplicando-se uma carga, causa uma pressão sobre o rolo superior que está dentro dos limites suportado, distribuído sobre a superfície do mancal. Assim, para calcular a força aplicada em cada mancal do rolo superior sobre uma pressão hidráulica à superfície do pistão, tem se:

Calcula-se:

$$A_p = \frac{\pi \cdot 3^2}{4} \approx 7,069 \text{ cm}^2 \quad P_h = \frac{100}{7,069} \approx 14,146 \text{ kgf/cm}^2$$

Onde:

Ph= Pressão hidráulica (kgf/cm²);

Fp= Força aplicada pelo pistão no mancal (kgf);

Ap= Área do pistão (cm²);

dp= Diâmetro do pistão (cm);

Fazendo-se as conversões de unidades necessárias, temos:

$$P_h = \frac{5688 \cdot F_p}{\pi \cdot d_p^2}$$

Onde:

P_h = Pressão hidráulica (lbf/in²);

F_p = Força aplicada pelo pistão no mancal (kgf);

d_p = Diâmetro do pistão (mm);

Aplicando-se:

$$P_h = \frac{5688.100}{\pi \cdot 300^2} \approx 2,012 \text{ lbf/in}^2$$

5.2.1 Pressão Hidráulica Específica

É a relação da carga total aplicada à camada de bagaço ao diâmetro e ao comprimento da camisa do rolo.

De acordo com o Curso de Operação de Moendas da Copersucar (1999) admite-se a hipótese de que para as espessuras de bagaço que passam normalmente nas moendas, a pressão média é semelhante à que seria exercida pela carga total uniformemente distribuída sobre uma superfície plana de comprimento igual à da camisa e largura equivalente a um décimo do seu diâmetro.

$$P_{he} = \frac{2 \cdot F_p}{0,1 \cdot D_c \cdot L_c}$$

Fazendo-se as conversões de unidades, tem-se:

$$P_{he} = \frac{200 \cdot F_p}{D_c \cdot L_c}$$

Onde:

p_{he} = Pressão hidráulica específica (t/dm²);

F_p = Força aplicada pelo pistão no mancal (kgf);

D_c = Diâmetro médio da camisa (mm);

L_c = Comprimento da camisa (mm);

Aplicando-se:

$$Phe = \frac{200.100}{863.1676} \approx 0.0138 \text{ t/dm}^2$$

5.2.2 Cálculo de Torque

Para as transmissões de movimento, o torque é definido por meio do produto entre a força tangencial e o raio dos rolos.

$$T = R.F$$

Onde:

T= Torque (N.m);

R=Raio do rolo (m);

F= Carga Aplicada (N);

Aplicando-se no terno 35"x72":

Onde:

F= 6N;

R= 0,4445m;

$$T = 6 \times 0,4445 = 2,667 \text{ N.m}$$

Aplicando-se no terno 34"x66":

Onde:

F= 6N;

R= 0,4318m;

$$T = 6 \times 0,4318 = 2,5908 \text{ N.m}$$

5.2.3 Cálculo da Potência Mecânica

A potência mecânica, é aquela que é transmitida através do acionamento de um mecanismo ou do exercício da força física.

$$P = W.T$$

Onde:

P= Potência mecânica (Watts);

W= Velocidade angular (rad/s);

T= Torque (N.m);

Aplicando-se no terno 35"x72":

$$P = 0.575928 . 2667 \approx 1536,00 \text{ Watts}$$

Aplicando-se no terno 34"x66":

$$P = 0.575961 . 2590,8 \approx 1501,65 \text{ Watts}$$

Conclui-se que a potência gasta em trabalho do terno 35"x72" é de aproximadamente 1536,00 Watts, e a do terno 34"x66" é de 1501,65 Watts.

5.3 Cálculo da Reação Resultante Quando não há Reabsorção

Segundo Hugot (1999), a carga hidráulica resultante determina a compressão do bagaço, de modo que a soma das pressões em cada ponto determinado corresponde a carga hidráulica resultante.

A pressão em cada ponto determinado, a soma de todas as pressões representa a reação total exercida pelo bagaço sobre o rolo, reação igual e oposta a pressão exercida pelo rolo sobre o bagaço.

$$y = \int_0^L \frac{dz}{(z^2 + 1)^6}$$

y = Reação resultante;

z = Variável;

F = Carga total exercida pelo rolo sobre o bagaço é calculada em kg;

L = Largura dos rolos (cm);

D = Diâmetro médio dos rolos (cm);

e_a = Abertura média entre os rolos em atividade (cm);

C = Compressão do bagaço no plano axial dos rolos.

Resultado da Integral:

$$y = \frac{9.7.5.3}{10.8.6.4.2} \left[\text{arc tg } z + \frac{z}{1+z^2} + \frac{2}{3} \cdot \frac{z}{(1+z^2)^4} + \frac{2.4.6.8}{3.5.7.9} \cdot \frac{z}{(1+z^2)^5} \right] L$$

5.4 Custo de Manutenção da Moenda

Usando os conceitos estatísticos coletamos os dados com base em situações reais onde uma indústria A forneceu os mesmos.

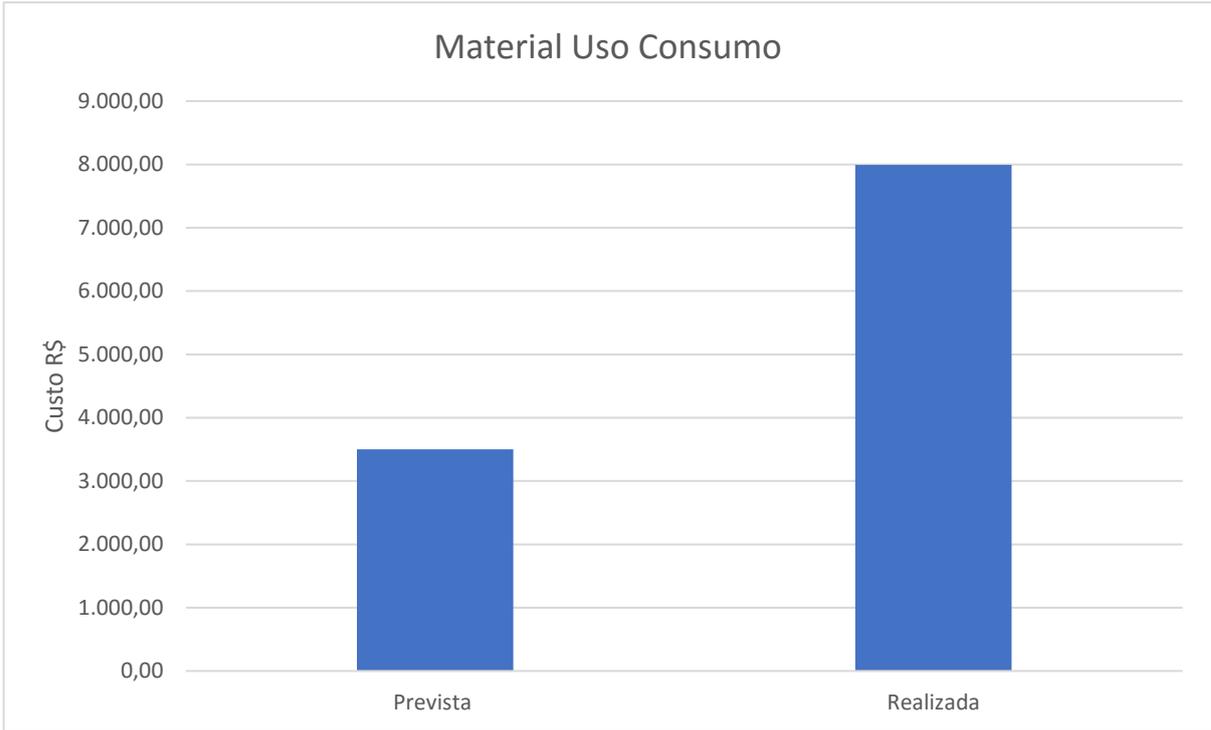
A seguir uma relação real de custo de manutenção de moenda fornecida por uma indústria A, que pediu para não ser identificada.

Tabela 1 - Custo de manutenção moenda

Área	Material Uso Consumo		Material Manutenção e Reposição		Serviço Manutenção e Conservação de Bens	
	Prevista	Realizada	Prevista	Realizada	Prevista	Realizada
Ternos de Moenda	3.500,00	7.994,90	18.000,00	1.676.048,71	1.900,00	60.134,07

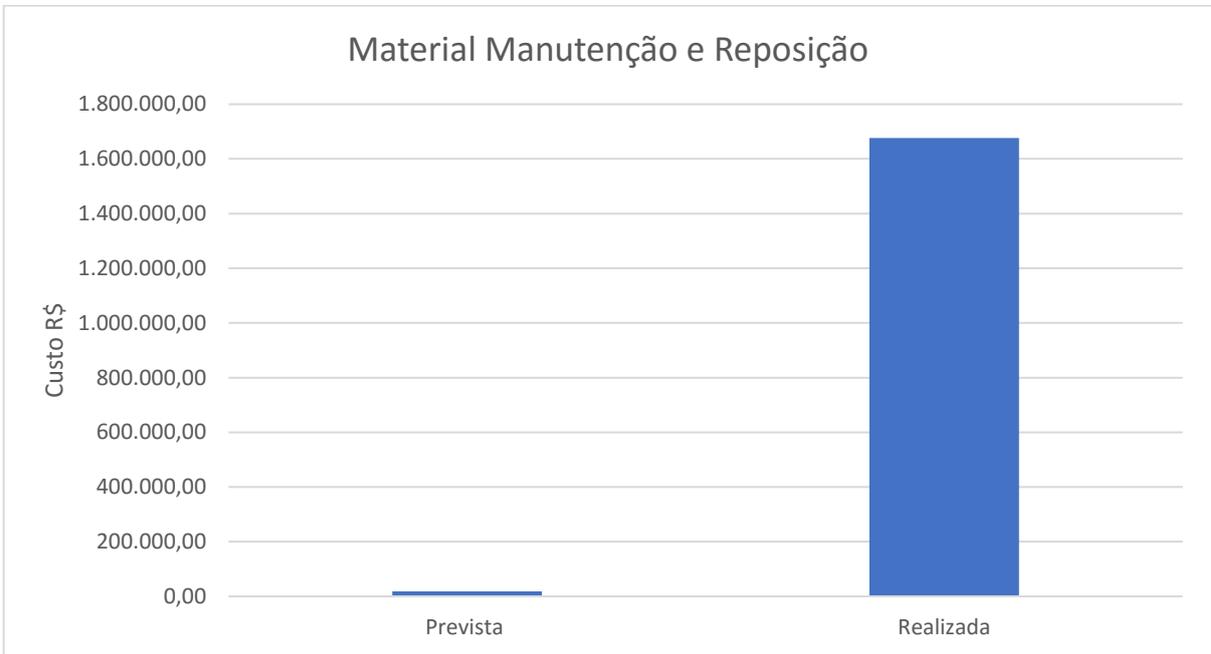
Fonte: Autores

Figura 10 – Material uso consumo



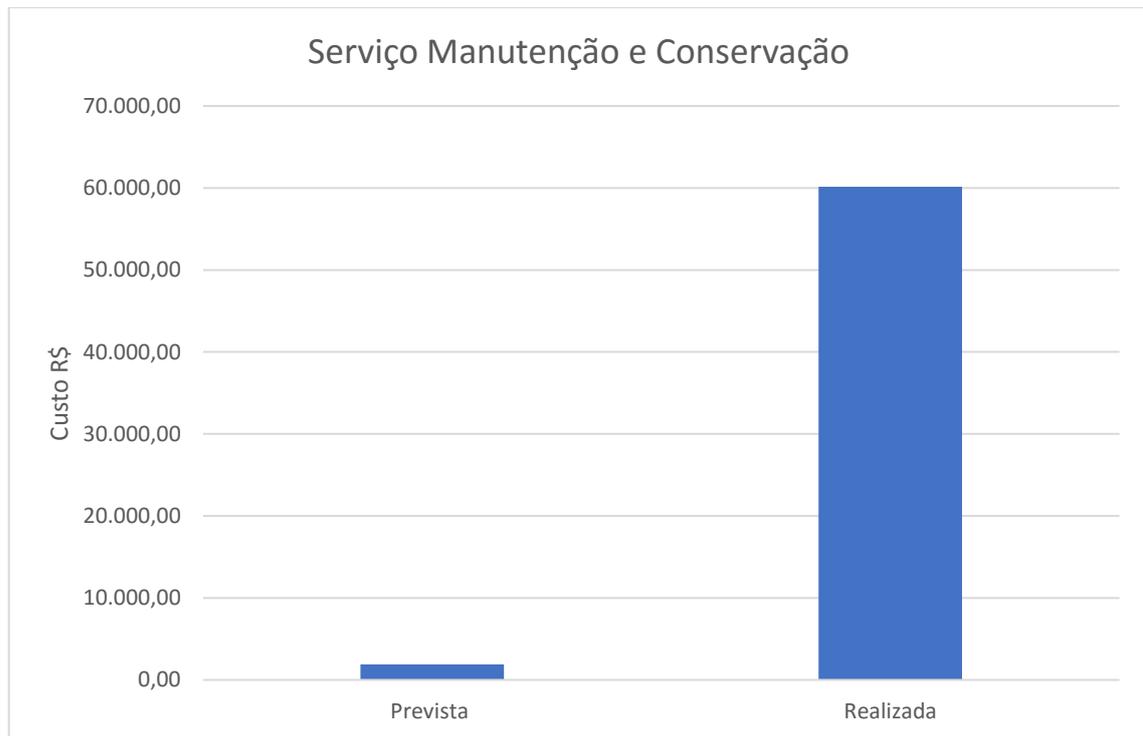
Fonte: Autores

Figura 11 – Material manutenção e reposição



Fonte: Autores

Figura 12 – Serviço manutenção e conservação



Fonte: Autores

Com base na tabela 1 e nas figuras 10, 11 e 12 apresentados podemos concluir que houve uma falha no planejamento, pois o mesmo está muito acima do previsto.

Analisando a forma como foi planejado somente com base no ano anterior, identificou-se que a falha se deu por falta de inclusão de muitas variáveis importantes como por exemplo, desgaste do equipamento de um ano para o outro, possíveis falhas na manutenção, o que gera um aumento enorme de quebra, entre outros.

5.4.1 Consumo de Óleo Mensal da Moenda

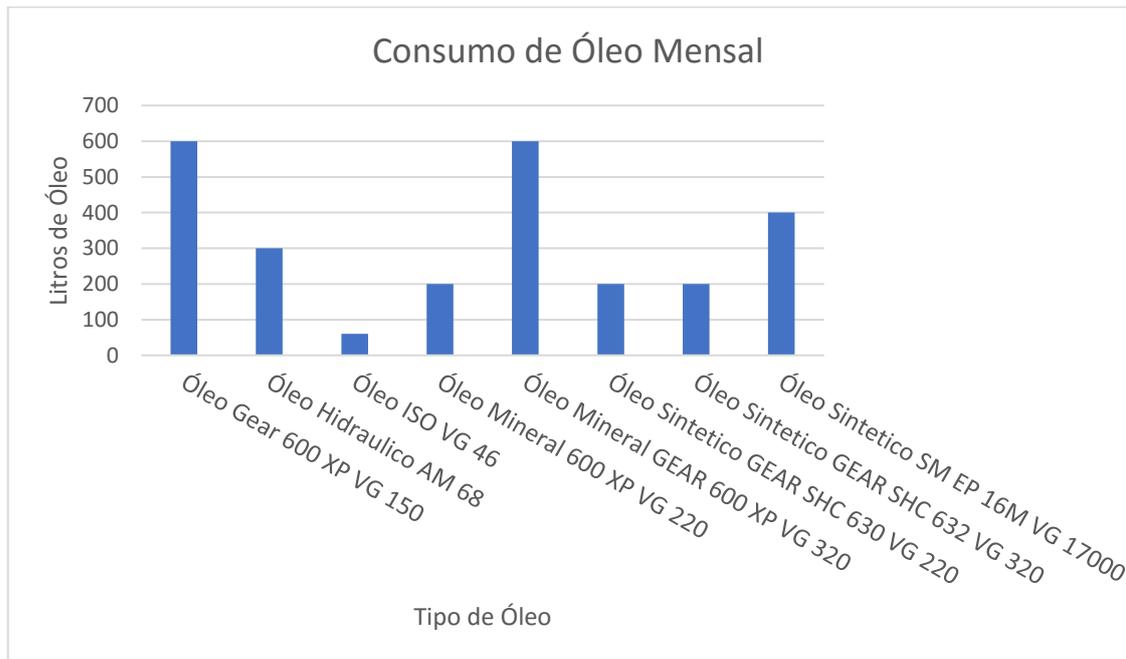
Tabela 2- Consumo de óleo mensal

Industria Moagem- Extração	Consumo Litros
Óleo Gear 600 XP VG 150	600
Óleo Hidráulico AM 68	300
Óleo ISO VG 46	60
Óleo Mineral 600 XP VG 220	200
Óleo Mineral GEAR 600 XP VG 320	600
Óleo Sintético GEAR SHC 630 VG 220	200

Óleo Sintético GEAR SHC 632 VG 320	200
Óleo Sintético SM EP 16M VG 17000	400

Fonte: Autores

Figura 13 – Consumo de óleo mensal



Fonte: Autores

A tabela 2 e a figura 13 apresentados com relação de gasto de óleo foram elaborados para que se pudesse mensurar um dos maiores gastos nos equipamentos de uma moenda, que é o seu consumo de óleo e lubrificantes.

Conclui-se a partir dos dados levantados sobre a manutenção preventiva que a parte de lubrificação é primordial para um bom funcionamento e que é uma maneira de se prevenir possíveis quebras, pois um equipamento com sua lubrificação em dia tem menores chances de quebra.

5.4.2 Principais Motivos de Paradas

Tabela 3- Principais motivos de paradas

Motivos	Total de horas paradas referente ao número de paradas	Número de Paradas	% Acumulada
---------	---	-------------------	-------------

Falta de cana-Chuva	55,8	8	47,44897 959
Falta de cana-Transporte	25,65	12	69,26020 408
Vazamento parede d'água- Caldeira 2	14,03	1	81,19047 619
Desarme-Geradores	10,5	3	90,11904 762
Multiplicação do Fermento	4,15	1	93,64795 918
Queima do freio-Esteira Cana Desfibrada	1,57	1	94,98299 32
Falha Sensor-Donelly	1,38	1	96,15646 259
Desarme-Gerador	0,93	1	96,94727 891
Soltou Chapa-Mesa Alimentadora	0,83	1	97,65306 122
Bucha-Donelly	0,8	2	98,33333 333
Queima Disjuntor	0,78	1	98,99659 864
Tencionar Corrente-Esteira Intermediária	0,5	1	99,42176 871
Desarme Esteira Distribuidora	0,28	1	99,65986 395
Soltou Parafuso da Talisca- Esteira	0,25	1	99,87244 898
Retirar Chapa-Esteira Distribuidora	0,15	1	100
TOTAL	117,6		

Fonte: Autores

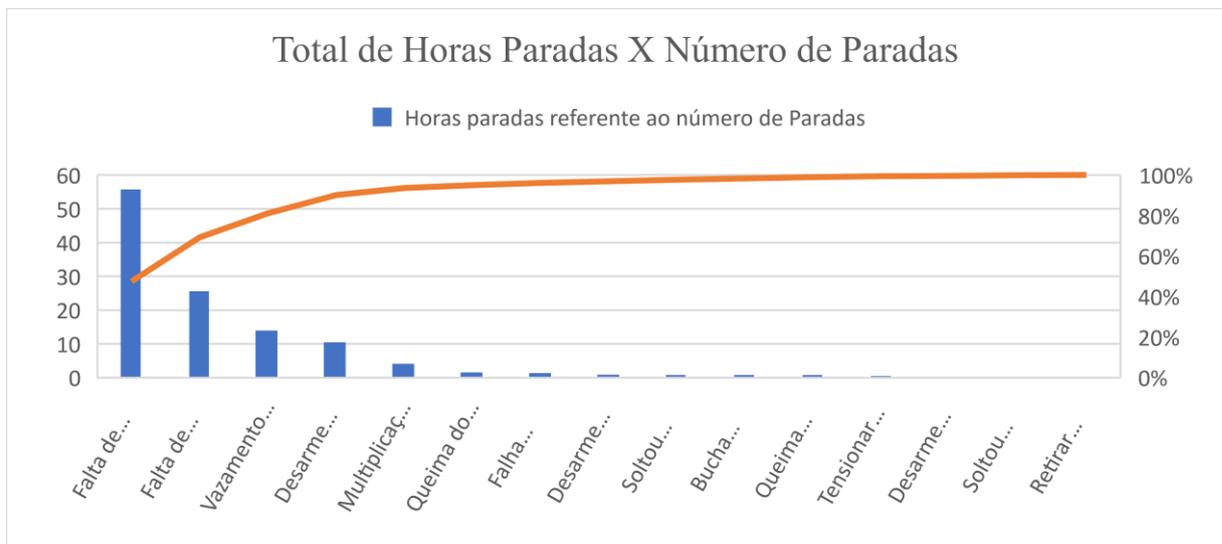
Analisando a tabela 3 em um período de trinta dias, durante a safra, pôde-se calcular que em média se perdem 117,6 horas ou aproximadamente 5 dias com a moagem fora de operação.

Esses são os principais motivos que levam a uma parada não programada, podendo gerar perdas significativas de receita, ou até mesmo prejuízo relacionado a reposição de peças que venham a quebrar.

5.4.3 Relação Total de Horas Paradas e Número de Paradas

O gráfico a seguir mostra uma relação de horas paradas. Observa-se que quanto maior o número de paradas não esperadas se tem uma maior perda de horas com a moagem trabalhando.

Figura 14 – Total de horas paradas x número de paradas

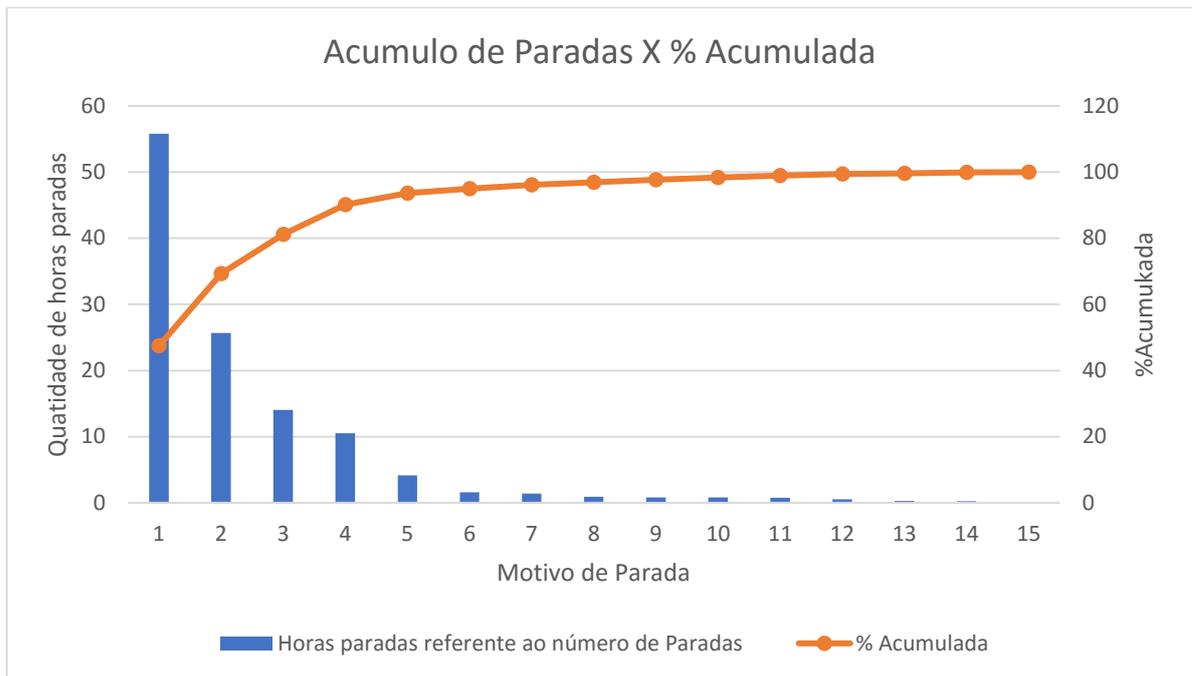


Fonte: Autores

5.4.4 Relação Acúmulo de Paradas e Porcentagem Acumulada

A figura 15 apresenta um gráfico que faz uma relação do acúmulo de paradas com suas porcentagens acumuladas, podendo então estimar que quanto maior o número de causas e de paradas se tem um aumento também na sua porcentagem acumulada; além de se observar que os principais motivos que geram as paradas são a falta de cana por fator climático (chuva) e a falta de cana por falha no transporte. Com base nisso eles devem ser os primeiros para se fazer um estudo para buscar uma possível solução.

Figura 15 – Acumulo de paradas X % acumulada



Fonte: Autores

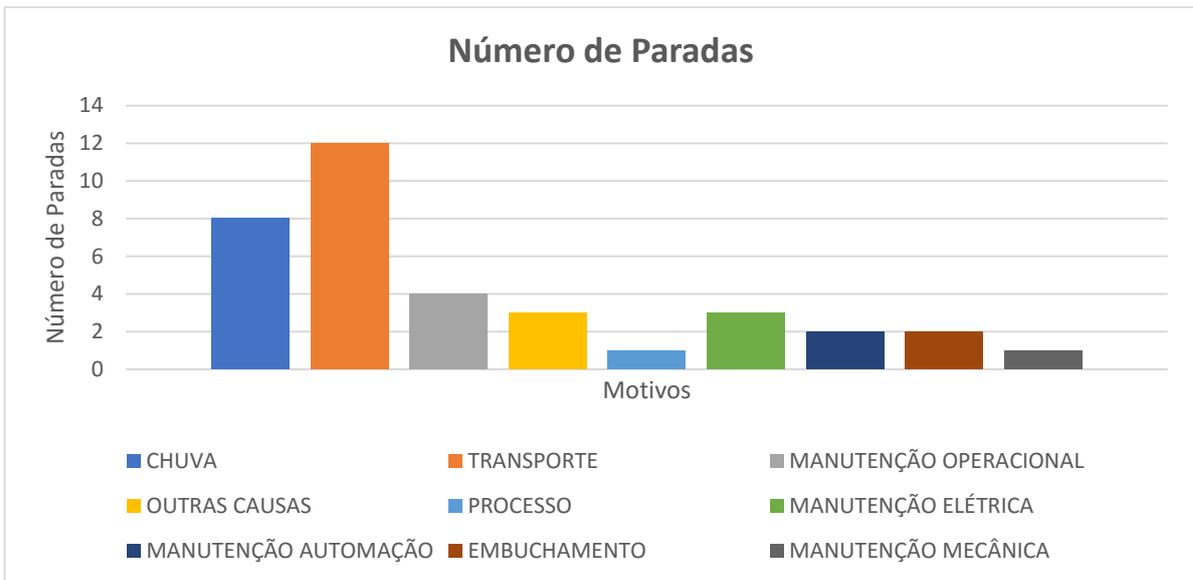
5.4.5 Relação Número de Paradas e Total de Horas Paradas

Os gráficos apresentados são somente para uma melhor visualização e entendimento do leitor, apresentando as principais razões das paradas e quantas horas em média são gastas até poder retornar ao normal funcionamento da moenda.

Na figura 16 o gráfico indica as principais causas de parada e quantas paradas aconteceram.

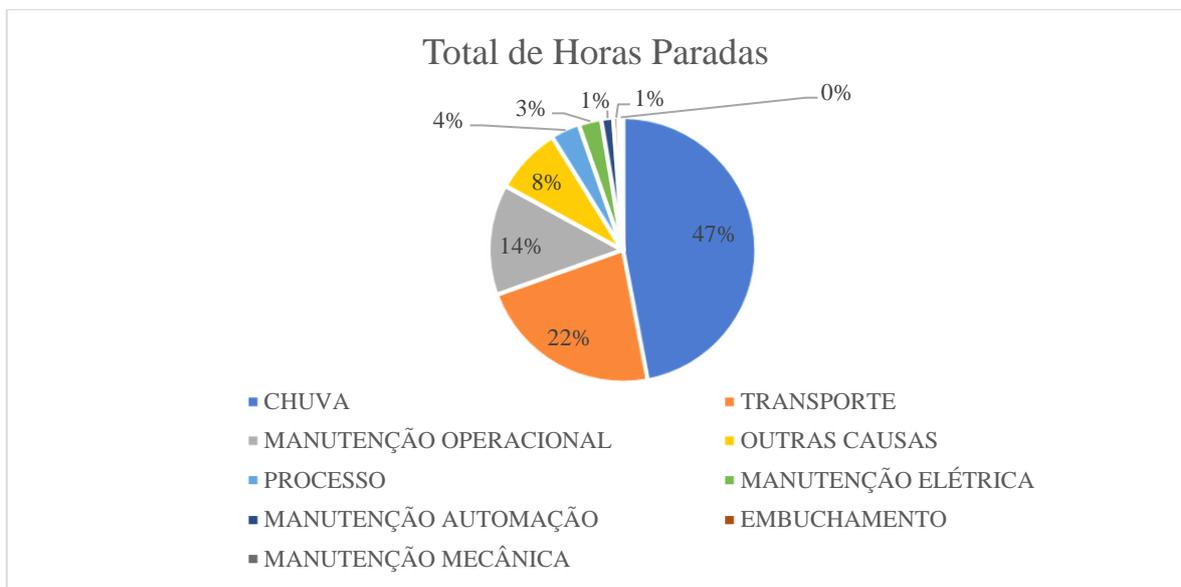
E na figura 17 o gráfico indica a porcentagem de horas paradas para cada causa de parada.

Figura 16 – Número de paradas



Fonte: Autores

Figura 17 – Total horas paradas



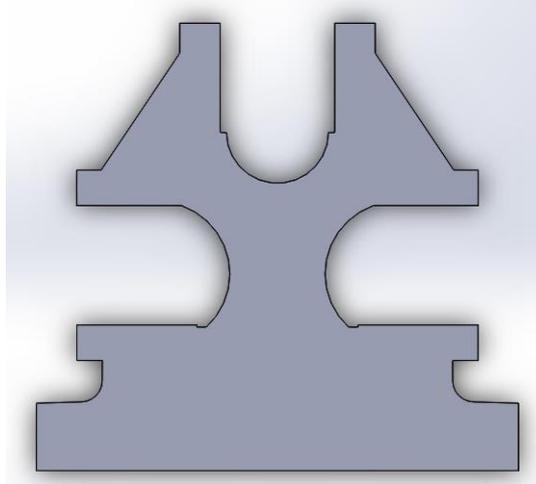
Fonte: Autores

5.5 Tolerâncias Dimensionais

A seguir serão demonstrados cálculos de tolerância que são basicamente valores estipulados através do tipo de material e acabamento de cada peça. O cálculo de tolerância é dado por um valor máximo e mínimo de alteração nas medidas de fabricação da peça para mais ou para menos do valor nominal.

5.5.1 Tolerâncias do Castelo

Figura 18 - Castelo em 3D



Fonte: Autores

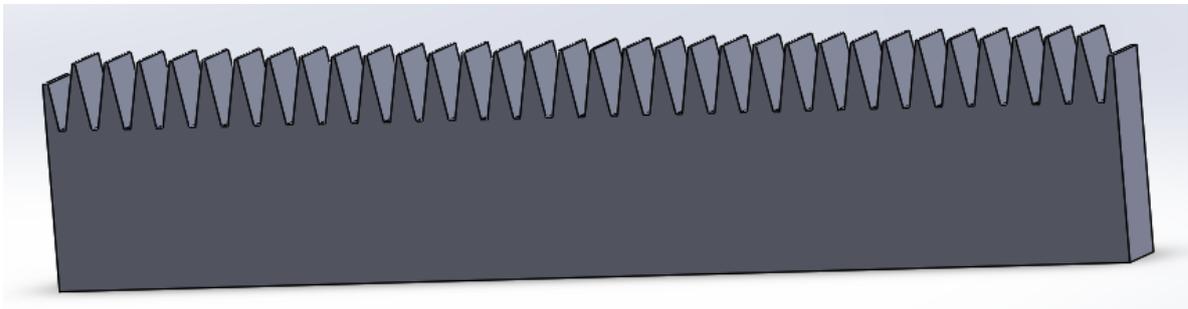
Tabela 4 - Tolerâncias dimensionais do castelo

Parte da Peça	Tamanho	Acabamento	Tolerância	Nomenclatura Final
Furo Superior	Ø480	X	H11	Ø480 H11
Furo Lateral	Ø688	X	H11	Ø688 H11
Peça Toda	2094 mm	Médio	±2	2094±2mm

Fontes: Autores

5.5.2 Tolerâncias Pente

Figura 19 – Pente em 3D



Fonte: Autores

Tabela 5- Tolerâncias dimensionais do pente

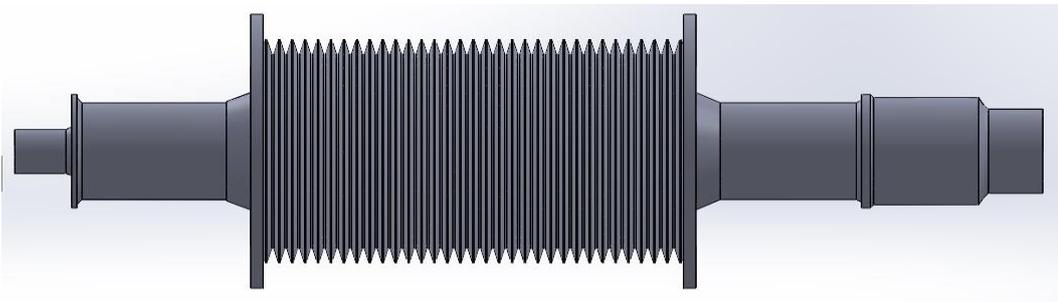
Tamanho	Acabamento	Tolerância	Nomenclatura Final
----------------	-------------------	-------------------	---------------------------

Parte da Peça				
Peça Toda	340mm	Fino	$\pm 0,2$	$340 \pm 0,2$ mm

Fontes: Autores

5.5.3 Tolerâncias Rolo

Figura 20 - Rolo em 3D



Fonte: Autores

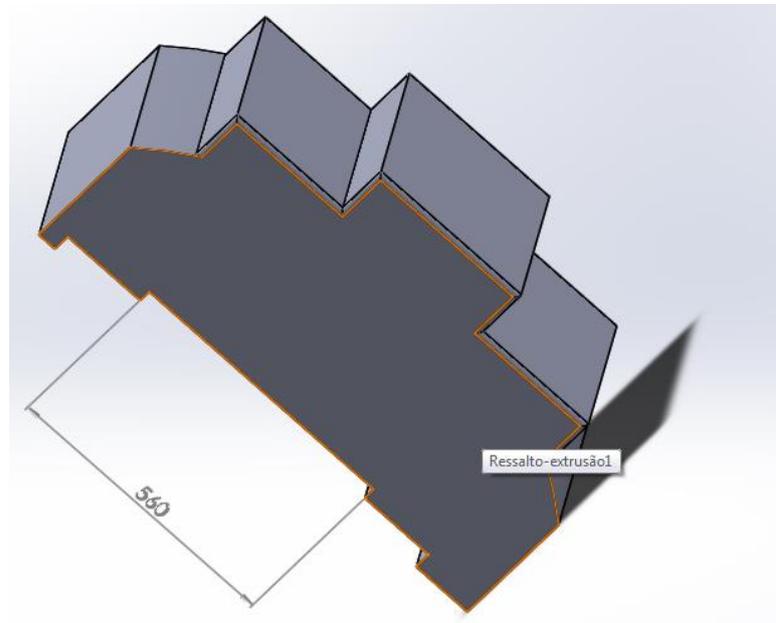
Tabela 6 - Tolerâncias dimensionais do rolo

Parte da Peça	Tamanho	Acabamento	Tolerância	Nomenclatura Final
1	Ø180	X	h11	Ø180 h11
2	Ø206	X	h11	Ø 206 h11
3	Ø480	X	h11	Ø 480 h11
4	Ø460	X	h11	Ø 460 h11
5	Ø420	X	h11	Ø 420 h11
6	Ø463	X	h11	Ø 463 h11
7	Ø1160	X	h11	Ø 1160 h11
8	Ø950	X	h11	Ø 950 h11
9	Ø463	X	h11	Ø 463 h11
10	Ø420	X	h11	Ø 420 h11
11	Ø460	X	h11	Ø 460 h11
12	Ø480	X	h11	Ø 480 h11
13	Ø454	X	h11	Ø 454 h11
14	Ø416	X	h11	Ø 416 h11
15	Ø356	X	h11	Ø356 h11

Fontes: Autores

5.5.4 Tolerância Cabeçote

Figura 21 - Cabeçote inferior em 3D



Fonte: Autores

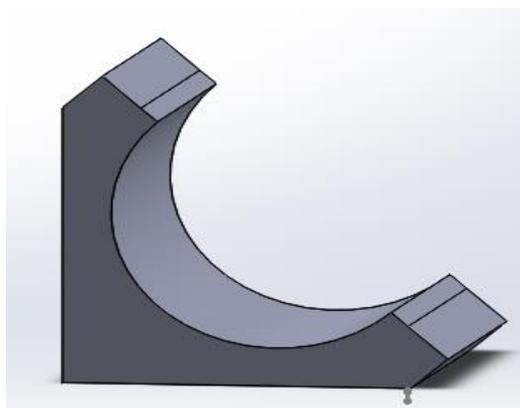
Tabela 7- Tolerâncias dimensionais do cabeçote

Parte da Peça	Tamanho	Acabamento	Tolerância	Nomenclatura Final
Peça toda	1068mm	Fino	$\pm 0,5$	1068 $\pm 0,5$ mm

Fontes: Autores

5.5.5 Tolerância Mancal Deslizante

Figura 22 - Mancal deslizante em 3D



Fonte: Autores

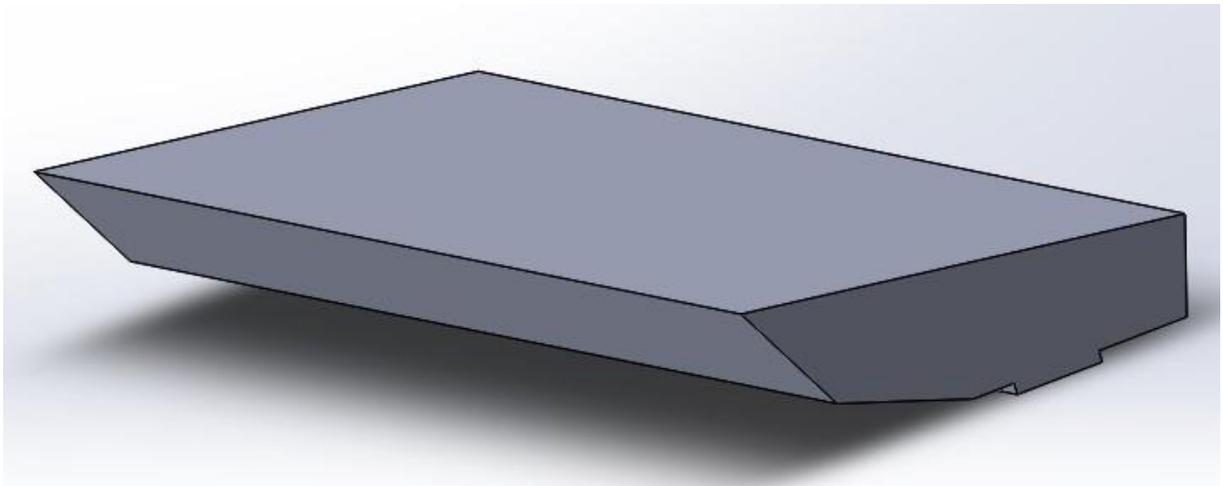
Tabela 8 - Tolerâncias dimensionais do mancal deslizante

Parte da Peça	Tamanho	Acabamento	Tolerância	Nomenclatura Final
Eixo	Ø420	X	H11	Ø420 H11
Peça toda	515mm	Fino	±0,3	515±0,3mm

Fontes: Autores

5.5.6 Tolerância Bagaceira

Figura 23 – Bagaceira em 3D



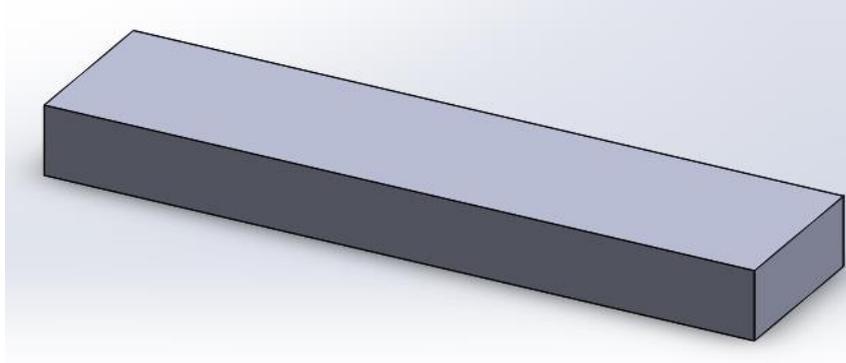
Fonte: Autores

Tabela 9- Tolerâncias dimensionais da bagaceira

Parte da Peça	Tamanho	Acabamento	Tolerância	Nomenclatura Final
Peça toda	123mm	Fino	±0,2	123±0,2mm

Fontes: Autores

Figura 24 - Suporte do pente em 3D



Fonte: Autores

Tabela 10- Tolerâncias dimensionais do suporte do pente

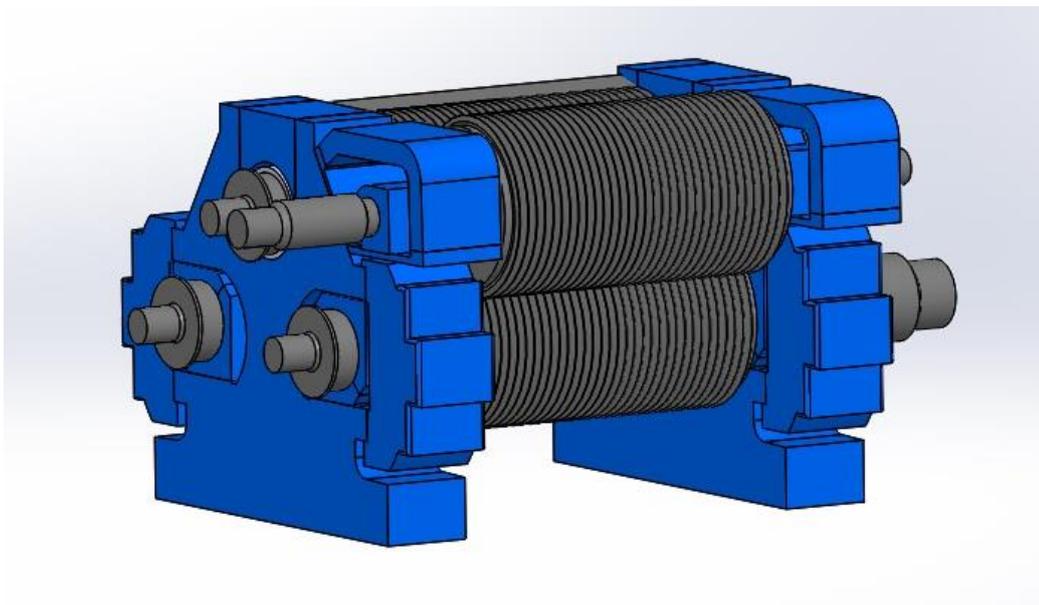
Parte da Peça	Tamanho	Acabamento	Tolerância	Nomenclatura Final
Peça toda	100mm	Fino	$\pm 0,15$	$100 \pm 0,15$ mm

Fontes: Autores

5.6 Modelagem 3D

A figura 25 mostra a modelagem de um terno de moenda, que foi criado através do *software* Solidworks.

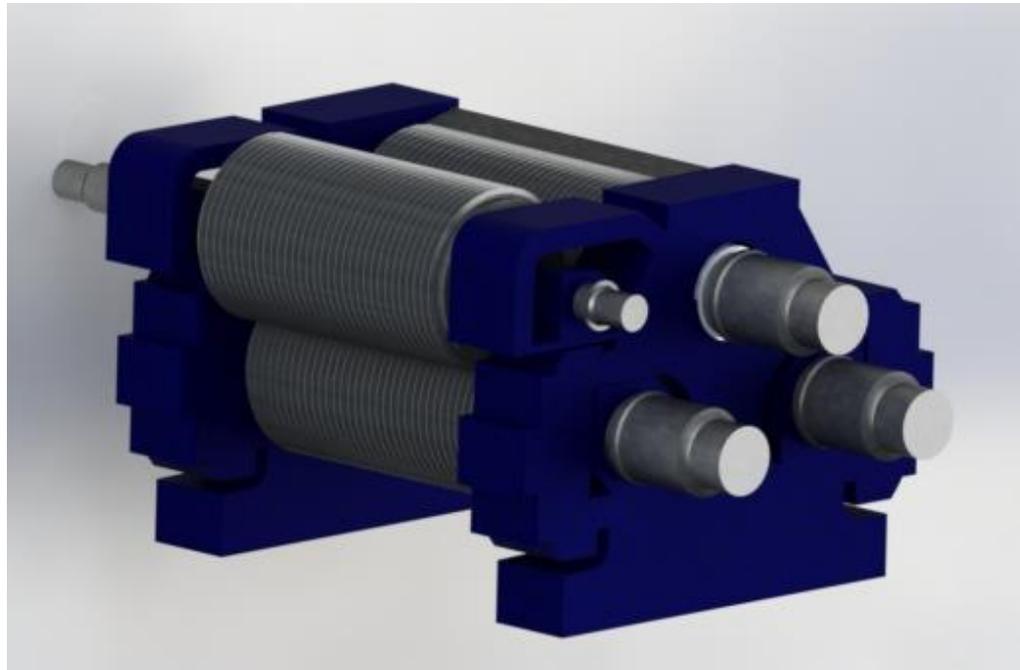
Figura 25 - Terno de moenda 3D



Fonte: Autores

A figura 26 mostra o terno de moenda renderizado.

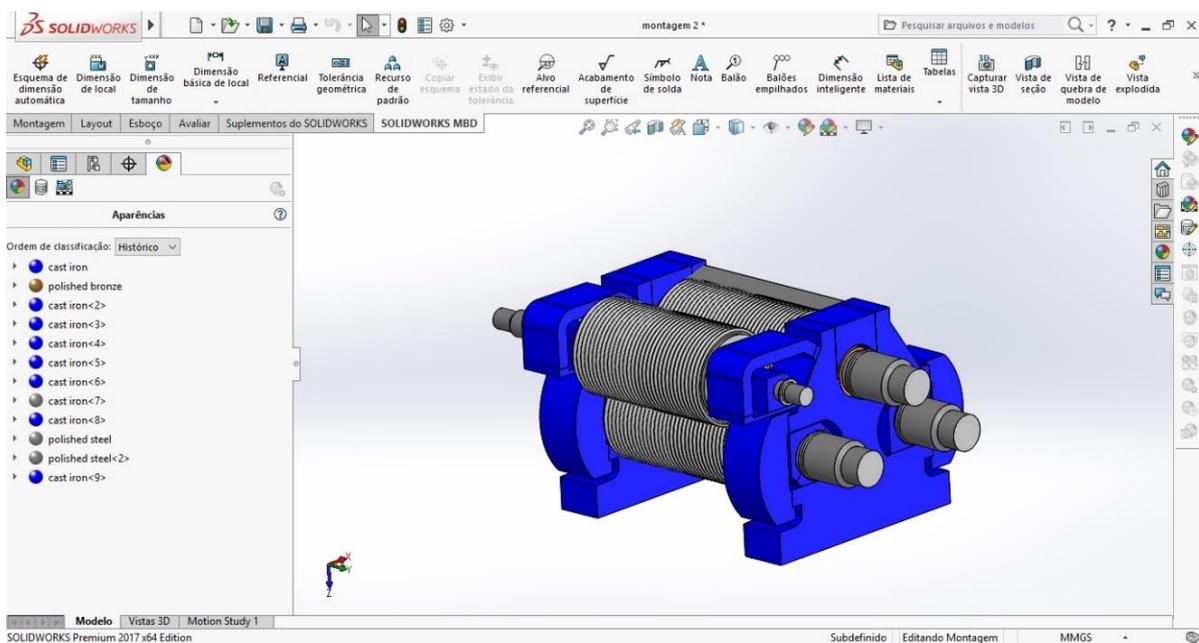
Figura 26 - Terno de moenda 3D II



Fonte: Autores

A figura 27 mostra a modelagem 3D finalizada no *software* Solidworks.

Figura 27 - Solidworks



Fonte: Autores

5.7 Script em Matlab

A seguir serão demonstradas várias aplicações da ferramenta computacional Matlab na solução de vários cálculos apresentados neste trabalho além de haver alguns programas criados para resolução direta dos mesmos apenas com inserção de alguns valores.

	Variáveis de entrada	Unidades	Valores
	Diâmetro do rolo superior	m	0.4445
Cálculo do Raio dos rolos para o 1° terno	Diâmetro do rolo de entrada	m	0.4445
	Diâmetro do rolo de saída	m	0.4445
	Diâmetro do rolo de pressão	m	0.4140
Cálculo da velocidade linear para o 1° terno	Rotação do rolo superior	rpm	5.5
	Rotação do rolo de entrada	rpm	5.5
	Rotação do rolo de saída	rpm	5.5
	Rotação do rolo de pressão	rpm	5.9
	Diâmetro do rolo superior	m	0.4318
Cálculo do Raio dos rolos para o 2° terno	Diâmetro do rolo de entrada	m	0.4318
	Diâmetro do rolo de saída	m	0.4318
	Diâmetro do rolo de pressão	m	0.4318
	Rotação do rolo superior	rpm	5.5

Cálculo da velocidade linear para o 1º terno	Rotação do rolo de entrada	rpm	5.5
	Rotação do rolo de saída	rpm	5.5
	Rotação do rolo de pressão	rpm	5.7
	Potência do motor	KW	294.6
Cálculo do consumo de energia	Tempo de funcionamento	horas	24
	Preço do KW	reais	0,60
Cálculo do lucro	Produção de garapa	/dia	15000
	Preço da garapa	reais	1,50

Fontes: Autores

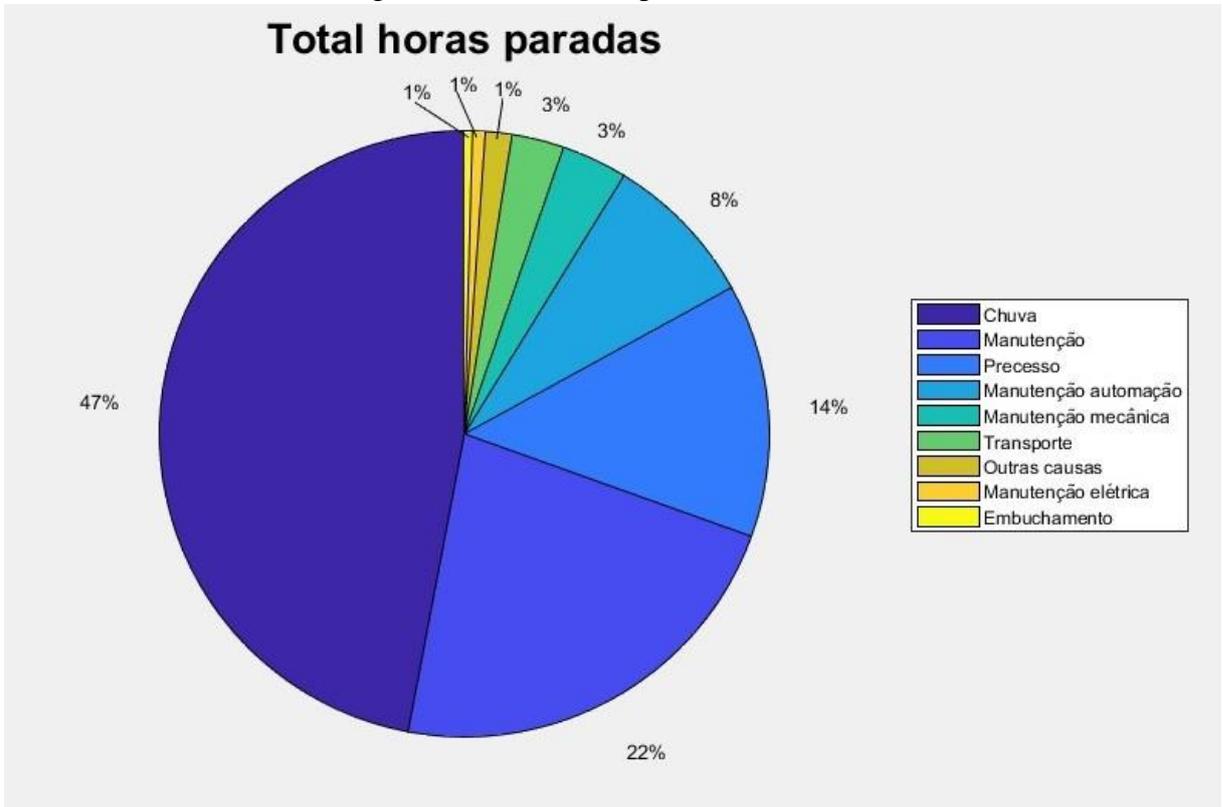
Tabela 11 – Comandos de entradas

Cálculo da pressão hidráulica máxima	Diâmetro do pistão	mm	300
	Força aplicada pelo pistão	N	100
Cálculo da pressão hidráulica específica	Diâmetro médio da camisa	mm	863
	Comprimento da camisa	mm	1676
Cálculo do torque	Carga aplicada	N	6
	Raio do rolo	mm	444.6
Potência mecânica	Velocidade angular	rad/s	0.575928

Fonte: Autores

5.7.1 Gráfico Pizza

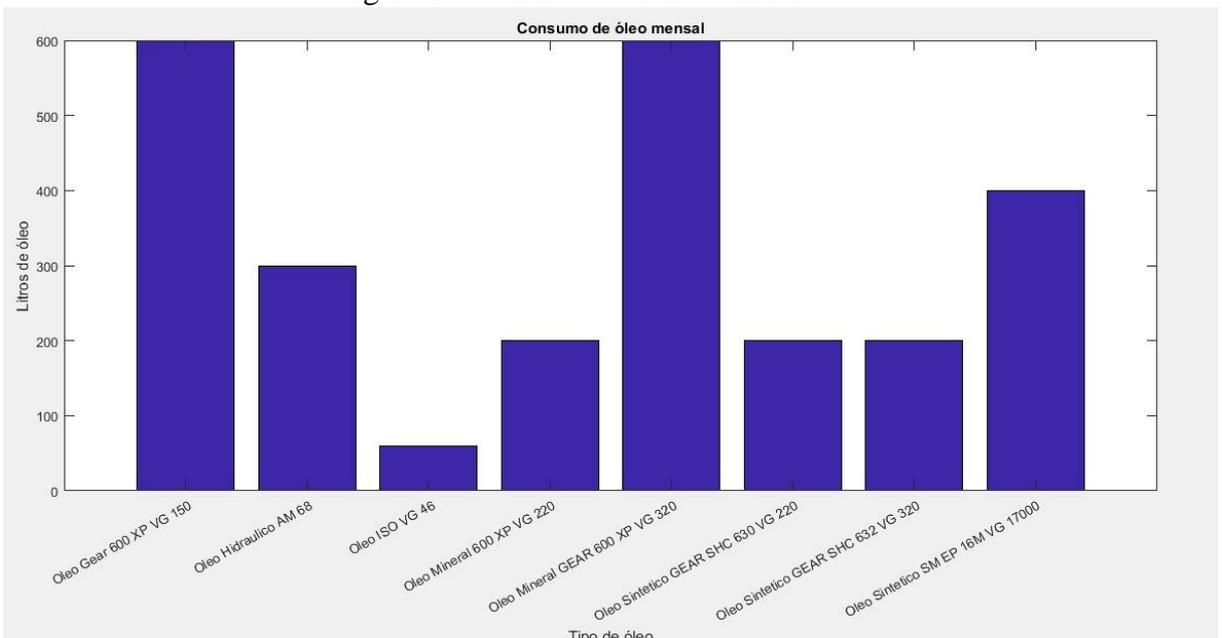
Figura 28 - Gráfico de pizza em Matlab



Fonte: Autores

5.7.2 Gráfico Barras

Figura 29 – Gráfico de barras em Matlab



Fonte: Autores

Tabela 12 – Comandos de saída

Saídas	Unidade	Valor
Velocidade angular do rolo superior do 1° terno	rad/s	0.575928
Velocidade angular do rolo de entrada do 1° terno	rad/s	0.575928
Velocidade angular do rolo de saída do 1° terno	rad/s	0.575928
Velocidade angular do rodo de pressão do 1° terno	rad/s	0.618400
Velocidade angular do rolo superior do 2° terno	rad/s	0.575961
Velocidade angular do rolo superior do 2° terno	rad/s	0.575961
Velocidade angular do rolo superior do 2° terno	rad/s	0.575961
Velocidade angular do rolo	rad/s	0.6001

superior do 2° terno		
Gasto de energia	KW	28281.6
Gasto de energia	Reais	16.968,96
Lucro bruto	Reais	22.500,00
Pressão hidráulica máxima	lbf/in ²	2.012
Pressão hidráulica específica	t/dm ²	0.0138
Torque	N/mm	2667
Potência mecânica	W	1536

Fonte: Autores

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise de como se dá o funcionamento dos ternos de moenda.

Além disso, também permitiu um estudo mais elaborado do que estava “por trás” de seu funcionamento matematicamente falando. O que possibilitou adquirir um conhecimento específico sobre o mesmo e suas aplicações na engenharia e processos de produção sucroalcooleira.

REFERÊNCIAS

DELFINI, P. T. **Extração do Caldo: Evolução das Tecnologias, Prejuízos com Mau Uso e Perspectivas para o Futuro**. In: UDOP, 2ª Aula /Palestra do Curso Industrial. 22 de junho. 2016.

SOUSA, Rainer Gonçalves. "Engenho de Açúcar"; Brasil Escola. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/historiab/engenho-acucar.htm>>. Acesso em 29 de abril de 2017.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. 2.ed. Piracicaba: Ed. Autor, 2005. 302 p.

CALTAROSSO, F. Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos - Análise de tensão em equipamentos de moagem da cana-de-açúcar usando o método dos elementos finitos. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18145/tde-17012011-144324/publico/DISSERTACAOFABIO.pdf>> acessado em: 29/abril/2017.

Cana Online Brasil; Líder Mundial na Produção de Cana e Tecnologia Sucroenergético. Disponível em: <<http://www.canaonline.com.br/conteudo/brasil-lider-mundial-na-producao-de-cana-e-tecnologia-sucroenergetica.html#.WQ5pbdryvIU>> acessado em: 06/maio/2017.

Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar. – v. 4 - Safra 2017/18, n. 1 – Primeiro levantamento, abril de 2017.

Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar, v. 2 - Safra 2015/16, n. 4 - Quarto levantamento, Brasília, p. 1-76, abril 2016.

Portal Brasil, Etanol Atingiu Produção Recorde de 30 Bilhões de Litros em 2015. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2016/05/etanol-atingiu-producao-recorde-de-30-bilhoes-de-litros-em-2015>> acessado em: 06/maio/2017.

Toda Matéria. Engenho de Açúcar no Brasil Colonial. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/engenho-de-acucar-no-brasil-colonial/>> acessado em: 07/maio/2017.

ALCARDE, A. Professor da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP). Arvore do conhecimento – Cana-de-Açúcar. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_103_22122006154841.html> acessado em: 07/maio/2017.

HUGOT, E. **Manual da Engenharia Açucareira**. Tradução de Irmtrud Miocque. São Paulo: Mestre Jou, 1969.

CTC – Centro De Tecnologia Copersucar. **Curso de operação de moendas**. Seção de Tecnologia de Moagem. 1999.

A DE SMET EMPRAL. Extração – Moenda. Disponível em: <<http://www.dsempral.com.br/processo+extracao+moenda.html>> acessado em: 07/maio/2017.

Simisa/Empral, Moenda. Disponível em: <<http://www.simexbrazil.com.br/moenda-simisa-empral/>> acessado em: 07/maio/2017.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica, 2: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2014.

LARSON, R. FABER, B. **Estatística Aplicada**. Tradução José Fernando Pereira Gonçalves; revisão técnica Manoel Henrique Salgado. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

GILAT, A. **MATLAB com aplicações em engenharia**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 430p.

Equipe de Artes - SEaD/UFSCar. **Embebição composta**. <<http://hdl.handle.net/123456789/555>> acessado em: 24/junho/2017.

Simisa/Empral. **Moenda de Cana**. Disponível em: <<http://www.simisa.com.br/home/noticias.php?id=18&area=18>> acessado em 24/junho/2017.

SILVA, A. **Desenho Técnico Moderno**. Tradução Antônio Eustáquio de Melo Pertence, Ricardo Nicolau Nassar Koury. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CRUZ, M. D. **Desenho Técnico para Mecânica: Conceitos, leitura e interpretação**. 1 ed. São Paulo: Érica, 2010.

SOUZA, G. M. **Metrologia**. Florianópolis: SENAI/SC, 2010. 51 p.:il. Color; 28 cm.

LEON S. J. **Álgebra Linear com aplicações**. Tradução e Revisão Técnica Sergio Gilberto Taboada. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

ZOCCA, M. COTIP – Colégio Técnico e Industrial de Piracicaba. Moendas. Disponível em <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/05_-_Moendas_000fxourdm402wyiv8018wi9tas2husf.pdf> acessado em: 13/abril/2017.

APÊNDICE I

Cálculo do Raio dos Rolos

Sabendo que os ternos possuem quatro rolos, sendo três; rolo superior, rolo de entrada e rolo de saída, de mesmo diâmetro e um rolo de pressão de diâmetro diferente, calculam-se primeiramente os raios:

$$R = \frac{1}{2} D$$

Onde:

R= Raio (m)

D= Diâmetro (m)

$$R = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_4 \end{bmatrix} \rightarrow R = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0.889 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.889 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.889 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.828 \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow R = \begin{bmatrix} 0.4445 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4445 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4445 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4140 \end{bmatrix} \text{ metros}$$

Estudo da Relação de Rotação Entre os Rolos

Sendo a velocidade linear igual a todos os rolos, 0.2560m/s, uma vez que, estão em contato entre si externamente, tem-se:

$$\pi R n = 30V$$

Onde:

V= Velocidade linear (m/s)

n= Rotação (rpm)

R= Raio do rolo (m)

Para isolar-se rotação pelos conceitos de matrizes faz-se o seguinte processo:

$$\begin{aligned}\pi R n &= 30V \\ \rightarrow (\pi R)^{-1}(\pi R)n &= (\pi R)^{-1}30V \\ \rightarrow In &= (\pi R)^{-1}30V \\ \rightarrow n &= (\pi R)^{-1}30V\end{aligned}$$

Depois de já calculada a formula para calcular a rotação através de matrizes percebe-se que é preciso calcular a matriz inversa da matriz πR .

$$\pi R = \begin{bmatrix} 1.396 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.396 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.396 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.300 \end{bmatrix}$$

Calculando a matriz inversa da matriz πR :

$$(\pi R)^{-1} = \left[\begin{array}{cccc|cccc} 1.396 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.396 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.396 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.300 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \begin{aligned} L1 &= \frac{1}{1.396} L1 \\ L2 &= \frac{1}{1.396} L2 \\ L3 &= \frac{1}{1.396} L3 \\ L4 &= \frac{1}{1.300} L4 \end{aligned}$$

$$\pi R^{-1} = \begin{bmatrix} 0.716 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.716 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.716 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.769 \end{bmatrix}$$

Matriz velocidade linear:

$$\text{Se } V = \begin{bmatrix} 0.256 \\ 0.256 \\ 0.256 \\ 0.256 \end{bmatrix} \rightarrow 30V = \begin{bmatrix} 0.256 \\ 0.256 \\ 0.256 \\ 0.256 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 7.68 \\ 7.68 \\ 7.68 \\ 7.68 \end{bmatrix}$$

Calculando a rotação:

$$n = \begin{bmatrix} 0.716 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.716 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.716 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.769 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 7.68 \\ 7.68 \\ 7.68 \\ 7.68 \end{bmatrix} \rightarrow n = \begin{bmatrix} 5.5 \\ 5.5 \\ 5.5 \\ 5.9 \end{bmatrix} \text{rpm}$$

Cálculo da Velocidade Angular

Para isolar-se a velocidade angular pelos conceitos de matrizes faz-se o seguinte processo:

$$\begin{aligned} V &= \omega R \\ \rightarrow VR^{-1} &= \omega RR^{-1} \\ \rightarrow VR^{-1} &= \omega I \\ \rightarrow \omega &= R^{-1}V \end{aligned}$$

Depois de já calculada a formula para calcular a velocidade angular através de matrizes percebe-se que é preciso calcular a matriz inversa da matriz R (raio dos rolos).

$$R = \begin{bmatrix} 0.4445 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4445 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4445 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4140 \end{bmatrix}$$

Calculando a matriz inversa da matriz R:

$$R^{-1} = \left[\begin{array}{cccc|cccc} 0.4445 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4445 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4445 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4140 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \begin{aligned} L1 &= \frac{1}{0.4445} L1 \\ L2 &= \frac{1}{0.4445} L2 \\ L3 &= \frac{1}{0.4445} L3 \\ L4 &= \frac{1}{0.4140} L4 \end{aligned}$$

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{0.4445} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{0.4445} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{0.4445} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{0.4140} \end{bmatrix}$$

Com a matriz R^{-1} já calculada pode-se calcular a velocidade angular fazendo a multiplicação das matrizes $R^{-1}V$.

$$W = \begin{bmatrix} \frac{1}{0.4445} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{0.4445} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{0.4445} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{0.4140} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.2560 \\ 0.2560 \\ 0.2560 \\ 0.2560 \end{bmatrix} \rightarrow W = \begin{bmatrix} \omega 1 \\ \omega 2 \\ \omega 3 \\ \omega 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.575928 \\ 0.575928 \\ 0.575928 \\ 0.6184 \end{bmatrix} \text{ rad/s}$$

Conclui-se então que o terno 35"x72" possui o rolo de pressão com velocidade angular de 0.6184 rad/s e rolo superior, de entrada e de saída com velocidade angular de 0.575928 rad/s.

Agora fazendo os mesmos cálculos para o terno 34"x66";

Calculando os raios dos rolos superior, de saída, de entrada e de pressão:

$$R = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_4 \end{bmatrix} \rightarrow R = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0.8636 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8636 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.8636 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.828 \end{bmatrix}$$

$$\rightarrow R = \begin{bmatrix} 0.4318 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4318 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4318 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4140 \end{bmatrix} \text{ metros}$$

Sendo a velocidade linear igual a todos os rolos, 0.2487m/s, uma vez que, estão em contato entre si externamente, tem-se:

$$(\pi R)^{-1} = \left[\begin{array}{cccc|cccc} 1.356 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.356 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.356 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.300 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \begin{array}{l} L1 = \frac{1}{1.356} L1 \\ L2 = \frac{1}{1.356} L2 \\ L3 = \frac{1}{1.356} L3 \\ L4 = \frac{1}{1.300} L4 \end{array}$$

$$(\pi R)^{-1} = \left[\begin{array}{cccc} 0.737 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.737 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.737 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.769 \end{array} \right]$$

Matriz velocidade linear;

$$V = \begin{bmatrix} 0.249 \\ 0.249 \\ 0.249 \\ 0.249 \end{bmatrix} \rightarrow 30V = \begin{bmatrix} 0.249 \\ 0.249 \\ 0.249 \\ 0.249 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 7.47 \\ 7.47 \\ 7.47 \\ 7.47 \end{bmatrix}$$

Calculando a rotação;

$$n = \begin{bmatrix} 0.737 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.737 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.737 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.769 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 7.47 \\ 7.47 \\ 7.47 \\ 7.47 \end{bmatrix} \rightarrow n = \begin{bmatrix} 5.5 \\ 5.5 \\ 5.5 \\ 5.7 \end{bmatrix} \text{ rpm}$$

Cálculo da velocidade angular;

$$\omega = R^{-1}V$$

Calculando a matriz inversa da matriz R;

$$R^{-1} = \left[\begin{array}{cccc|cccc} 0.4318 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4318 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4318 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4140 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \begin{array}{l} L1 = \frac{1}{0.4318} L1 \\ L2 = \frac{1}{0.4318} L2 \\ L3 = \frac{1}{0.4318} L3 \\ L4 = \frac{1}{0.4140} L4 \end{array}$$

$$R^{-1} = \left[\begin{array}{cccc} 2.3159 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.3159 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.3159 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.4155 \end{array} \right]$$

Multiplicando as matrizes $R^{-1}V$:

$$\begin{bmatrix} 2.3159 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.3159 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.3159 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.4155 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.249 \\ 0.249 \\ 0.249 \\ 0.249 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega 1 \\ \omega 2 \\ \omega 3 \\ \omega 4 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0.575961 \\ 0.575961 \\ 0.575961 \\ 0.6001 \end{bmatrix} \text{rad/s}$$

Pode-se dizer então que o terno 34" x66" possui o rolo de pressão com velocidade angular de 0.6001 rad/s e rolo superior, de entrada e de saída com velocidade angular de 0.575961 rad/s.

Cálculo dos Gastos de Energia, Produção em Litros por Dia e Lucro Bruto de um Terno

Para o gasto de energia diário considera-se quatro motores de potência igual a 294.6 KW, sendo que a moenda trabalha 24 horas por dia, calcula-se o consumo de energia em KWh pela formula:

$$E = 4P.t$$

Onde:

E = Consumo de energia (KWh)

P = Potência do motor (KW)

t = Tempo de funcionamento por dia (horas)

Para o gasto de energia diário em reais considera-se R\$0.60 KW

$$C_{\text{reais}} = EPKW$$

Onde:

C reais = Consumo de energia (R\$)

E = Consumo de energia (KW)

PKW = Preço do KW

Sabendo que se produz por dia 15000 litros de garapa e vende-se por R\$1,50 o litro de garapa tem-se receita diária que pode ser calculado pelo seguinte método:

$$L = PD \text{Plitro}$$

Onde:

L = Receita (R\$)

PD – Produção de garapa por dia (litros)

Plitros = Preço do litro de garapa (R\$/L)

Uma vez já sabendo disto pode-se construir uma matriz anexando todas informações:

$$\begin{bmatrix} 4P & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & PD \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ PKW \\ \text{Plitros} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ \text{Creais} \\ L \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 294.6 & 0 & 0 \\ 0 & 28281.6 & 0 \\ 0 & 0 & 15000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 24 \\ 0.6 \\ 0.8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ \text{Creais} \\ L \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 28281.6 \\ 16968.96 \\ 22500,00 \end{bmatrix} \begin{matrix} KW \\ R\$ \\ R\$ \end{matrix}$$

Conclui-se então que por dia tem-se um gasto por terno com energia de R\$ 16.968,96 e uma receita de R\$22.500,00.

APÊNDICE II

Integral para Cálculo da Reação Resultante Quando Não há Reabsorção

Segundo Hugot (1999) a carga hidráulica resultante determina a compressão do bagaço de modo que a soma das pressões em cada ponto PP' corresponda a carga hidráulica resultante. Kg/cm^2 foi adotado como unidade de pressão.

Poupano os cálculos que estabelece as integrais por ser muito extenso.

Considera-se uma sessão com espessura de 1cm a distância entre os rolos onde a camada de bagaço é comprimida.

A pressão em cada ponto P, a soma de todas as pressões representa a reação total exercida pelo bagaço sobre o rolo, reação igual e oposta a pressão exercida pelo rolo sobre o bagaço.

A reação total, ou a pressão total F, relativa a seção considerada de 1cm tem como valor:

$$F_1 = \int_0^L p \cdot dl$$

P= pressão no ponto P sobre o elemento com superfície dl (com comprimento dl de 1cm de profundidade).

Tem-se:

$$F_1 = \int_0^L p \cdot dl = \frac{88}{10^6 C^6} \cdot \int_0^L \frac{dl}{1 + \frac{D^2 e_A}{2(D - e_A)l^2}}$$

Valor de L. Procura-se a abscissa do ponto correspondendo à entrada do bagaço. Para $c=1$:

$$1 = C + \frac{2R}{H} - \frac{2 \cdot \sqrt{R^2 - L^2}}{H}$$

Onde:

$$L = \sqrt{\frac{H(1-C)}{2} \left[D - \frac{H(1-C)}{2} \right]}$$

Estabelece-se:

$$E = \frac{D^2 e_A}{2(D - e_A)} \qquad Z = \frac{1}{\sqrt{E}}$$

Tem-se:

$$dz = \frac{dl}{\sqrt{E}}$$

E:

$$F_1 = \frac{88}{10^6 C^6} \cdot \int_0^L \frac{dl}{\left(1 + \frac{l^2}{E}\right)^6} = \frac{88\sqrt{E}}{10^6 C^6} \int_0^L \frac{dz}{(Z^2 + 1)^6}$$

Estabelece-se:

$$y = \int_0^L \frac{dz}{(z^2 + 1)^6}$$

y= reação resultante;

z= variável;

F= carga total exercida pelo rolo sobre o bagoço é calculada em kg;

L= largura dos rolos (cm);

D= diâmetro médio dos rolos (cm);

e_a = abertura média entre os rolos em atividade (cm);

C= compressão do bagoço no plano axial dos rolos.

Resolvendo a integral:

$$\int \frac{dz}{(z^2 + 1)^6}$$

Sabendo que $\sec^2\theta - \operatorname{tg}^2\theta = 1$, e usando substituição trigonométrica:

$$\operatorname{tg}\theta = z \rightarrow dz = \sec^2\theta d\theta$$

$$(\operatorname{tg}^2\theta + 1)^6 = (\sec^2\theta)^6$$

Substituindo na integral:

$$\int \frac{\sec^2\theta d\theta}{\sec^{12}\theta} \rightarrow \int \frac{d\theta}{\sec^{10}\theta} \rightarrow \int \cos^{10}\theta d\theta$$

Aplicando a fórmula da recorrência para calcular a integral:

$$\int \cos^{10}\theta d\theta = \frac{1}{10} \cos^9\theta \operatorname{sen}\theta + \frac{9}{10} \int \cos^8\theta d\theta$$

$$\int \cos^8\theta d\theta = \frac{1}{8} \cos^7\theta \operatorname{sen}\theta + \frac{7}{8} \int \cos^6\theta d\theta$$

$$\int \cos^6\theta d\theta = \frac{1}{6} \cos^5\theta \operatorname{sen}\theta + \frac{5}{6} \int \cos^4\theta d\theta$$

$$\int \cos^4\theta d\theta = \frac{1}{4} \cos^3\theta \operatorname{sen}\theta + \frac{3}{4} \int \cos^2\theta d\theta$$

$$\int \cos^2\theta d\theta = \frac{1}{2} \cos\theta \operatorname{sen}\theta + \frac{1}{2} \int d\theta$$

$$\int d\theta = \theta$$

Agregando as partes:

$$\int \cos^{10}\theta d\theta = \frac{1}{10} \cos^9\theta \operatorname{sen}\theta + \frac{9}{10} \left(\frac{1}{8} \cos^7\theta \operatorname{sen}\theta + \frac{7}{8} \left(\frac{1}{6} \cos^5\theta \operatorname{sen}\theta + \frac{5}{6} \left(\frac{1}{4} \cos^3\theta \operatorname{sen}\theta + \frac{3}{4} \left(\frac{1}{2} \cos\theta \operatorname{sen}\theta + \frac{\theta}{2} \right) \right) \right) \right)$$

Voltando para variável z:

$$\int \frac{dz}{(z^2 + 1)^6} =$$

$$\frac{1}{10} \left(\frac{1}{\sqrt{z^2 + 1}} \right)^9 \left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + 1}} \right)$$

$$+ \frac{9}{10} \left(\frac{1}{8} \left(\frac{1}{\sqrt{z^2 + 1}} \right)^7 \left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + 1}} \right) \right)$$

$$+ \frac{7}{8} \left(\frac{1}{6} \left(\frac{1}{\sqrt{z^2 + 1}} \right)^5 \left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + 1}} \right) \right)$$

$$+ \frac{5}{6} \left(\frac{1}{4} \left(\frac{1}{\sqrt{z^2 + 1}} \right)^3 \left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + 1}} \right) \right)$$

$$+ \frac{3}{4} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{z^2 + 1}} \right) \left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + 1}} \right) + \frac{\arctg z}{2} \right) \right) \right) \right)$$

Simplificando, obtém-se;

$$y = \frac{9.7.5.3}{10.8.6.4.2} \left[\arctg z + \frac{z}{1+z^2} + \frac{2}{3} \frac{z}{(1+z^2)^4} + \frac{2.4.6.8}{3.5.7.9} \frac{z}{(1+z^2)^5} \right] L$$

Não foi dado continuidade no cálculo por ser muito extenso, e o aprofundamento do mesmo levaria a um maior tempo de estudo.

APÊNDICE III

Cálculo da Velocidade Angular dos Rolos

```

d1=input('Entre com o diâmetro do rolo superior em metros: ');
disp(' ')
d2=input('Entre com o diâmetro do rolo de entrada em metros: ');
disp(' ')
d3=input('Entre com o diâmetro do rolo de saída em metros: ');
disp(' ')
d4=input('Entre com o diâmetro do rolo de pressão em m metros: ');
disp(' ')
r1=d1/2;
r2=d2/2;
r3=d3/2;
r4=d4/2;
n1=input('Entre com rpm do rolo superior: ');
disp(' ')
n2=input('Entre com rpm do rolo de entrada: ');
disp(' ')
n3=input('Entre com rpm do rolo de saída: ');
disp(' ')
n4=input('Entre com rpm do rolo de pressão: ');
disp(' ')
v1=(pi*n1*r1)/30;
v2=(pi*n2*r2)/30;
v3=(pi*n3*r3)/30;
v4=(pi*n4*r4)/30;
R=[r1 0 0 0; 0 r2 0 0; 0 0 r3 0; 0 0 0 r4];
IR=inv(R);
V=[v1; v2; v3; v4];
W=IR*V;
TW=W';

```

```
fprintf('A velocidade angular é: %f rad/s\n',TW)
```

Cálculo dos Gastos de Energia, Produção em Litros por Dia e Lucro de um Terno

```
P=input('Entre com a potência do motor em KW: ');
t=input('Entre com o tempo de funcionamento diário: ');
PW=input('Entre com o preço do KW em R$: ');
PD=input('Entre com a produção de garapa por dia: ');
PL=input('Entre com o preço por litro de garapa em R$: ');
E=4*P*t;
M=[P 0 0; 0 E 0; 0 0 PD];
m=[4*t; PW; PL];
R=M*m;
RT=R'
fprintf('Conclui-se então que por dia:\n Tem-se um gasto com energia em KW de: %f KW,\n
Tem-se um gasto com energia em R$ de: %f R$,\n Tem-se um lucro bruto de: %f R$\n',RT)
```

Cálculo da Pressão Hidráulica Máxima e Específica

```
dp=input('Entre com o diâmetro do pistão em mm: ')
fp=input('Entre com a força aplicada pelo pistão no mancal: ')
Dc=input('Entre com o diâmetro médio da camisa em mm: ')
Lc=input('Entre com o comprimento da camisa em mm: ')
Ph=(5688*fp)/(pi*dp^2);
Phe=(200*fp)/(Dc*Lc);
fprintf('A pressão hidraulica máxima é: %f lbf/in^2, a pressão específica é: %f
t/dm^2.\n',Ph,Phe)
```

Cálculo de Torque e Potência Mecânica

```
F=input('Entre com a carga aplicada, em N: ')
R=input('Entre com o raio do rolo, em mm: ')
W=input('Entre com a velocidade angular do rolo em rad/s: ')

```

$Mt=F*R;$

$P=W*Mt;$

`fprintf('Para um torque de %f N/m, a potência mecânica do terno será: %f Watts.\n',Mt,P)`

Gráfico Pizza

`horas=[55.8 26.65 16.03 9.74 4.15 3.28 1.67 0.8 0.5];`

`pie(horas);`

`title('Total horas paradas','fontsize',20)`

`legend('Chuva','Manutenção','Precesso','Manutenção automação','Manutenção mecânica','Transporte','Outras causas','Manutenção elétrica','Embuchamento');`

Gráfico Barras

`x = {'Óleo Gear 600 XP VG 150', 'Óleo Hidráulico AM 68', 'Óleo ISO VG 46', 'Óleo Mineral 600 XP VG 220', 'Óleo Mineral GEAR 600 XP VG 320', 'Óleo Sintético GEAR SHC 630 VG 220', 'Óleo Sintético GEAR SHC 632 VG 320', 'Óleo Sintético SM EP 16M VG 17000'}`

`y = [600, 300, 60, 200, 600, 200, 200, 400];`

`bar(y)`

`set(gca,'XTickLabel',x)`

`set(gca,'XTickLabelRotation',30)`

`ylabel('Litros de óleo')`

`xlabel('Tipo de óleo')`

`title('Consumo de óleo mensal')`