



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

ROBSON LUZ DE CARVALHO

**ANÁLISE DINÂMICA DA POTÊNCIA REQUERIDA PARA O MOTOR DE UM
MOINHO PARA PLÁSTICO DE UMA EMPRESA ESPECIALIZADA NA
PRODUÇÃO DE SACOS PARA LIXO LOCALIZADA NA CIDADE DE TERESINA-PI**

TERESINA

2020

ROBSON LUZ DE CARVALHO

ANÁLISE DINÂMICA DA POTÊNCIA REQUERIDA PARA O MOTOR DE UM
MOINHO PARA PLÁSTICO DE UMA EMPRESA ESPECIALIZADA NA PRODUÇÃO
DE SACOS PARA LIXO LOCALIZADA NA CIDADE DE TERESINA-PI

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Engenharia Mecânica do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Piauí- Campus Teresina Central.

Orientador: Prof. Me. Ricardo Cardoso Soares.
Coorientador: Prof. Me. Luis Henrique dos Santos
Silva Sousa.

TERESINA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Carvalho, Robson Luz de

C331a Análise dinâmica da potência requerida para o motor de um moinho para plástico de uma empresa especializada na produção de sacos para lixo localizada na cidade de Teresina-PI / Robson Luz de Carvalho. - 2020.
49 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)
- Instituto Federal do Piauí, Campus Teresina Central, 2020.
Orientador : Prof. Me. Ricardo Cardoso Soares.

1. Dimensionamento. 2. Solução analítica. 3. Moinho para plástico. I. Título.

CDD - 620

Elaborado por Tanize Maria Sales CRB 3/1024

ROBSON LUZ DE CARVALHO

ANÁLISE DINÂMICA DA POTÊNCIA REQUERIDA PARA O MOTOR DE UM
MOINHO PARA PLÁSTICO DE UMA EMPRESA ESPECIALIZADA NA PRODUÇÃO
DE SACOS PARA LIXO LOCALIZADA NA CIDADE DE TERESINA-PI

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Engenharia Mecânica do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Piauí- Campus Teresina Central.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Ricardo Cardoso Soares (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Adivaldo Ferreira de Almeida
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Antônio Ítalo Rodrigues Pedrosa
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Dedico este trabalho ao meu pai Raimundo, minha mãe Leonísia, aos meus irmãos Roney e Rodney e a todos os meus familiares que direto ou indiretamente contribuíram com a minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao meu Deus, que me deu forças para ir em frente, abriu todas as portas e ofereceu o necessário para a concretização desse sonho.

Agradeço aos meus pais por serem os protagonistas na minha caminhada até aqui, pelo apoio e incentivo indispensáveis à minha formação. Aos meus irmãos Roney e Rodney pelo companheirismo, aos meus tios maternos, de forma especial ao meu tio José (Dedé) pela ajuda proporcionada, o incentivo e a assistência oferecidos, e ao tio Elisberto pela solicitude e apoio prestados. Também exponho minha gratidão ao meu primo Tarcísio pelo auxílio, atenção e prestatividade, aos meus primos Isaac, Anchieta e aos amigos que compartilharam comigo do mesmo teto nesses anos.

Não posso deixar de gratular a família Shalom por ser canal de muitas graças de Deus na minha vida. A todos os amigos irmãos que estiveram comigo nesse tempo e caminharam ao meu lado, e os quais pude partilhar da minha vida.

Gostaria também de agradecer ao IFPI (Instituto Federal do Piauí) pelas oportunidades a mim prestadas. Gratidão aos meus professores por facilitar o caminho do aprendizado e ao corpo administrativo da mesma instituição, em particular aos meus colegas de trabalho por terem sido bastante presentes na minha vida ao longo desses últimos cinco anos.

Por fim, meu muito obrigado aos amigos que comigo dividiram a mesma sala de aula. Gratidão pelo companheirismo, pelos aprendizados compartilhados e por terem tornado essa caminhada menos árdua, mais alegre e descontraída.

“Se a meta principal de um capitão fosse preservar seu barco, ele o conservaria no porto para sempre.”

Santo Tomás de Aquino

RESUMO

O presente trabalho realiza um estudo em um moinho de motor elétrico de indução de 75hp usado em uma fábrica de reciclagem para a produção de sacos para lixo localizada na cidade de Teresina-PI. O objetivo deste trabalho é verificar o dimensionamento da potência do motor do moinho a partir de uma solução analítica. Em vista disso, desenvolveu-se um modelo matemático a fim de encontrar a potência necessária para o motor em função de vários parâmetros inerentes à máquina, a exemplo da rotação do motor, a relação de transmissão entre eixos do motor e do rotor do moinho, o momento de inércia do rotor da máquina, dentre outras. Foi também implementado o uso de instrumentos para encontrar as variáveis envolvidas no resultado da solução analítica, como o arduino e seus módulos, bem como softwares de programação. Após a aquisição das variáveis, elas foram substituídas na equação resultante da solução analítica a fim de encontrar a potência mínima exigida pela máquina. A potência encontrada para o moinho foi de 73,6 hp. Portanto, a partir desse resultado pode-se constatar que o uso do modelo matemático apresentado como solução analítica para o presente trabalho pode ser bem sucedido dentro dos fins propostos deste estudo e sua aplicação limitada a modelos de moinhos semelhantes ao apresentado nessa pesquisa.

Palavras-chave: Dimensionamento. Solução analítica. Moinho para plástico.

ABSTRACT

The present work carries out a study in a mill with 75 *hp* induction electric motor used in a recycling factory for the production of garbage bags located in the city of Teresina-PI. The objective of this work is to verify the dimensioning of the mill's motor power from an analytical solution. In view of this, a mathematical model was developed in order to find the necessary power for the engine in function to various parameters inherent to the machine, such as the engine speed, the transmission ratio between the engine axes and the mill rotor, the moment of inertia of the machine rotor, among others. The use of instruments was also implemented to find the variables involved in the result of the analytical solution, such as the Arduino and its modules, as well as programming software. After the acquisition of the variables, all of them were substitute in the equation resulting from the analytical solution in order to find the minimum power required by the machine. The power found for the mill was 73.6 *hp*. Therefore, from this result it can be attest that the use of the mathematical model presented as an analytical solution in the present work can be successful within the suggested purposes of this study and its application limited to mill models similar to that presented in this research.

Keywords: Sizing. Analytical solution. Plastic mil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01	– Ilustração do moinho que foi estudado	15
Figura 02	– Ilustração para o cálculo do momento de inércia de uma área diferencial dA em um corpo rígido	19
Figura 03	– Torque produzido pelo vetor força capaz de girar o corpo em torno do eixo de rotação O perpendicular ao plano do papel	21
Figura 04	– Transmissão por correia entre duas polias de diâmetros diferentes	23
Figura 05	– Vista Isométrica do rotor do moinho esboçado no software <i>SpaceClaim</i>	30
Figura 06	– Propriedades geométricas do rotor do moinho	30
Figura 07	– Montagem do sistema placa/sensor/ ímã no torno mecânico	32
Figura 08	– Equação que corrige a medição efetuada pelo arduino em função da rotação	33
Figura 09	– Montagem do sistema placa/sensor/ímã no moinho	33
Figura 10	– Rotação do moinho (rpm) em função do tempo (s) sem triturar nenhum insumo	34
Figura 11	– Decréscimo da rotação (rpm) do moinho em função do tempo (s) a partir da rotação de 532 rpm	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados obtidos para N , Dm e Dmo	29
Tabela 2 – Tempo necessário para a máquina cessar a rotação do rotor após desligada.....	29
Tabela 3 – Relação entre a rotação no torno e os valores obtidos no arduino.....	32
Tabela 4 – Amostra da planilha de <i>excel</i> usada para encontrar $\Delta\theta$	35

LISTA DE SÍMBOLOS

T_c	Torque produzido pelo processo de trituração do plástico
T_μ	Torque das forças dissipativas de energia
T_m	Torque produzido pelo motor
D_m	Diâmetro da polia do motor
D_{mo}	Diâmetro da polia do eixo do moinho
P_m	Potência mínima do motor (<i>hp</i>)
N	Rotação do motor (<i>rpm</i>)
ΔN	Média da variação de rotação (<i>rpm</i>) do motor durante o processamento da matéria-prima (<i>rpm</i>)
N_o	Rotação no instante t_o
γ	Percentual médio de perda de velocidade angular do rotor do moinho provocada pelo processo de interação das facas rotativas com o material a ser triturado
$\Delta\theta$	Espaço angular médio necessário para o moinho recuperar a velocidade angular inicial, W_o , durante a trituração de uma remessa de plástico (<i>rad</i>)
α	Aceleração angular produzida pelo motor
W	Valor médio da velocidade angular do eixo do moinho durante a trituração do plástico
W_o	Velocidade angular do eixo do moinho antes da trituração do plástico
T_{dm}	Torque resultante das forças dissipativas envolvidas no processo de trituração
I	Momento de inércia do rotor da máquina
I_{cm}	Momento de inércia em relação ao eixo que passa pelo centro de massa do corpo
m	Massa do rotor do moinho
h	Distância perpendicular entre o eixo dado e o eixo que passa pelo centro de massa
Δt	Refere-se ao Intervalo de tempo entre o momento que a máquina é desligada até o rotor do moinho cessar sua energia cinética (<i>s</i>)
π	Número <i>pi</i>

μ	Desaceleração angular produzida pelas forças dissipativas de energia
I_x	Momento de inércia em relação ao eixo x
I_y	Momento de inércia em relação ao eixo y
J_o	Momento de inércia polar
I_p	Momento de inércia transladado
θ	Espaço angular
ω	Velocidade angular
I_{zz}	Momento de inércia do rotor em relação ao eixo z
I_{zc}	Momento de inércia em relação ao eixo z e passando pelo centroide do rotor
α	Aceleração angular
T_{res}	Torque resultante
T_e	Torque de entrada
T_s	Torque de saída
ω_e	Velocidade angular de entrada
ω_s	Velocidade angular de saída

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	15
1.2.1	Objetivo Geral.....	15
1.2.2	Objetivos Específicos.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	VELOCIDADE E ACELERAÇÃO ANGULAR	17
2.2	MOMENTO DE INÉRCIA	19
2.3	TEOREMA DOS EIXOS PARALELOS.....	20
2.4	TORQUE.....	20
2.5	POTÊNCIA.....	21
2.6	RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO EM CORREIAS.....	22
2.7	RENDIMENTO MECÂNICO.....	24
3	METODOLOGIA	25
3.1	SOLUÇÃO ANALÍTICA.....	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
4.1	AQUISIÇÃO DE VARIÁVEIS.....	29
4.1.1	Obtenção do momento de inércia.....	29
4.1.2	Obtenção das variáveis γ e $\Delta\theta$.....	31
4.1.2.1	Calibração do arduino.....	31
4.1.2.2	Montagem do circuito no moinho e coleta dos dados de rotação da máquina.....	33
4.1.3	Procedimento para encontrar os valores médios de γ e $\Delta\theta$	34

4.2	SUBSTITUIÇÃO DAS VARIÁVEIS NA SOLUÇÃO ANALÍTICA.....	36
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
	REFERÊNCIAS	38
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DE γ E $\Delta\theta$.....	39
	APÊNDICE B – CÓDIGO DO ARDUINO.....	41

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos é crescente a preocupação da sociedade com o destino dos resíduos plásticos, pois na proporção que crescem a quantidade de resíduos aumentam as ameaças ao meio ambiente e a saúde humana (DARSHAN R. et al, 2017).

Estima-se que são consumidas cerca de 500 bilhões a 1 trilhão de sacolas plásticas em todo o mundo anualmente. No Brasil esse número chega a 1,5 milhão de sacolas por hora (BRASIL, [20--]). Assim, a reciclagem torna-se uma das alternativas para o tratamento de resíduos sólidos, tanto do ponto de vista social quanto ambiental (MMA, MEC, 2005).

As máquinas necessárias para o bom funcionamento de uma empresa de reciclagem de plástico devem contar pelo menos com um conjunto básico formado de moinho, lavadora, tanque separador, secadora, aglutinador, extrusora e granulador (MUNDO DO PLÁSTICO, 2016).

Este trabalho pretende fazer uma análise dinâmica em um moinho a partir de uma solução analítica que seja capaz de calcular a potência necessária para o motor do moinho em função de vários parâmetros da máquina. O objeto de estudo e aquisição de dados foi um moinho para plástico, com motor elétrico de indução com 75 *hp*, de uma fábrica de reciclagem para a produção de sacos de lixo. A máquina possui um rotor com cinco facas rotativas acopladas e duas facas fixas na estrutura da máquina. O rotor é acionado por uma redução conectada ao motor com 1720 *rpm*.

Um dos principais problemas deste moinho é sua baixa eficiência energética. Uma das muitas justificativas para isto é o fato dele ser bastante antigo e possuir um motor de baixa eficiência. Nota-se também que algumas facas responsáveis pelo processo de retalhamento do plástico têm elevado desgaste sendo obrigatória a afiação das suas facas fixas todos os dias. Estas condições, juntas, acarretam em uma eficiência menor que a esperada para a máquina.

Figura 01: Ilustração do moinho que foi estudado



Fonte: Autoria própria (2020).

1.1 JUSTIFICATIVA

Na tentativa de reduzir os custos com energia elétrica, foi realizada uma pesquisa no moinho com o intuito de verificar a possibilidade de utilizar um motor com uma potência inferior a 75 *hp*. Para isso, foi realizada uma análise dinâmica na máquina buscando por uma solução analítica que calcule a potência do motor levando em consideração a inércia das partes móveis, as perdas de energia inerentes a máquina, bem como as forças envolvidas no processamento dos insumos.

1.2 OBJETIVOS

- **Objetivo Geral**

- Desenvolver uma solução analítica capaz de verificar o dimensionamento da potência do motor de um moinho para plástico de uma empresa especializada na fabricação de sacos de lixo localizada na cidade de Teresina-PI.

- **Objetivos Específicos**

- Esboçar uma solução analítica que relacione a potência necessária ao moinho em função de vários parâmetros inerentes a estrutura e a forma de funcionamento da máquina;

- Implementar o uso de ferramentas específicas para encontrar algumas variáveis envolvidas no resultado da solução analítica;
- Avaliar o resultado da potência encontrada para a máquina a partir da solução analítica e propor possíveis mudanças em vista de consequentes melhorias para o moinho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 VELOCIDADE E ACELERAÇÃO ANGULAR

O movimento de um corpo rígido em torno de um eixo pode ser conhecido em função de sua coordenada angular θ e do tempo t . No entanto, com bastante frequência as condições de movimento são especificadas pelo tipo de aceleração angular do corpo. Dessa forma:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}, \quad (01)$$

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}. \quad (02)$$

Em que:

ω – Velocidade angular;

α – Aceleração angular;

Ou ainda, por meio das equações (1) e (2), pode-se encontrar:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{d\omega}{d\theta}\right)\left(\frac{d\theta}{dt}\right) = \omega \frac{d\omega}{d\theta}. \quad (03)$$

Beer (2009) destaca dois casos particulares de rotação angular. São eles:

- 1) Rotação Uniforme- É definido para a aceleração angular nula, e portanto, a velocidade angular constante. Logo:

$$\theta = \theta_0 + \omega t. \quad (04)$$

Sendo:

θ – Espaço angular (*rad*);

θ_0 – Espaço angular inicial (*rad*);

ω – Velocidade angular (*rad/s*);

t – Tempo (*s*).

Nessa situação, a velocidade angular pode ser expressa (MELCONIAN, 2010):

$$\omega = \frac{\pi N}{30}. \quad (05)$$

Assim:

ω – Velocidade angular (*rad/s*);

N – rotação (*rpm*).

- 2) Rotação Uniformemente Acelerada- É definida para a aceleração angular constante. Assim:

$$\omega = \omega_0 + \alpha t, \quad (06)$$

$$\theta = \theta_o + \omega_o t + \frac{1}{2} \alpha t^2, \quad (07)$$

$$\omega^2 = \omega_o^2 + 2\alpha(\theta - \theta_o). \quad (08)$$

Com:

θ – Espaço angular (*rad*);

θ_o – Espaço angular inicial (*rad*);

ω – Velocidade angular (*rad/s*);

ω_o – Velocidade angular inicial (*rad/s*);

α – Aceleração angular (*rad/s²*);

t – Tempo (*s*).

Agora, pela definição de derivada, a equação (2) pode ser apresentada como:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t}. \quad (09)$$

Logo, para um intervalo de tempo muito curto, é possível, com uma boa aproximação, escrever:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \cong \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{(\omega - \omega_o)}{(t - t_o)}. \quad (10)$$

A equação acima também é válida para o caso de aceleração constante. É possível ainda formular a equação (10) em função da rotação da máquina. Substituindo (5) em (10), têm-se:

$$\alpha = \frac{(\omega - \omega_o)}{(t - t_o)} = \frac{(\frac{\pi N}{30} - \frac{\pi N_o}{30})}{(t - t_o)} = \frac{\pi(N - N_o)}{30(t - t_o)}. \quad (11)$$

Sendo:

α – Aceleração angular (*rad/s²*);

N – Rotação no instante t (*rpm*);

N_o – Rotação no instante t_o (*rpm*).

Seguindo o mesmo raciocínio da equação anterior e isolando o espaço angular no primeiro termo, a equação (08) pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} (\theta - \theta_o) = \Delta\theta &= \frac{(\omega^2 - \omega_o^2)}{2\alpha} = \frac{(\frac{\pi N}{30})^2 - (\frac{\pi N_o}{30})^2}{2\alpha} \Leftrightarrow \\ \Delta\theta &= \frac{\frac{\pi^2}{900}(N^2 - N_o^2)}{2\alpha} = \frac{\pi^2}{1800} \frac{(N^2 - N_o^2)}{\alpha}. \end{aligned} \quad (12)$$

Assim:

$\Delta\theta$ – Espaço angular (rad);

N – Rotação no instante t (rpm);

N_0 – Rotação no instante t_0 (rpm);

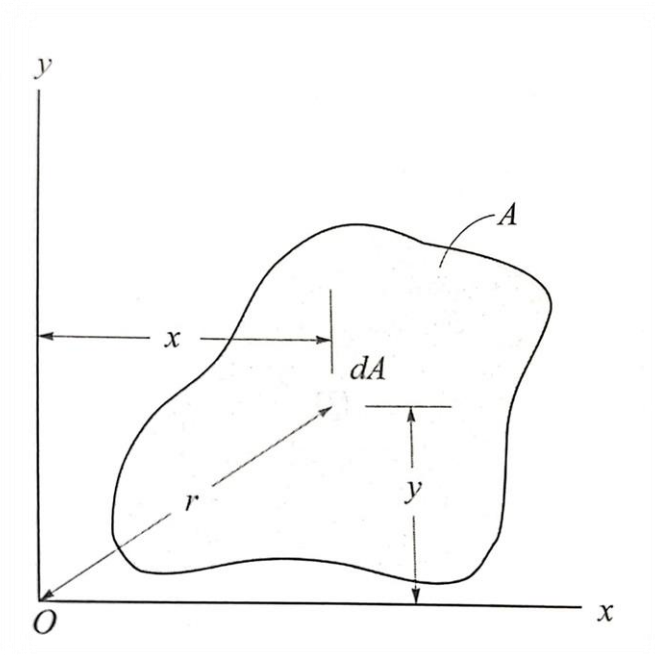
α – Aceleração angular (rad/s^2).

2.2 MOMENTO DE INÉRCIA

“O momento de inércia de um objeto em relação à um eixo é a propriedade do objeto que o faz resistir a uma variação em sua velocidade vetorial angular em relação àquele eixo.” (KELLER F., et al, 1993, p. 321).

Segundo Hibeller (2011), pode-se expressar o momento de inércia em uma área diferencial dA em relação aos eixos x e y como sendo $dI_x = y^2 dA$ e $dI_y = x^2 dA$ como na Figura 2.

Figura 02: Ilustração para o cálculo do momento de inércia de uma área diferencial dA em um corpo rígido



Fonte: HIBELLER (2011).

Da mesma forma, para a área inteira, será (HIBELLER, 2011):

$$I_x = \int_A y^2 dA, \quad (13)$$

$$I_y = \int_A x^2 dA. \quad (14)$$

Também pode-se expressar a quantidade dA em relação ao polo O ou eixo z como também é possível verificar na Figura 02. Isso é chamado momento de inércia polar que pode ser definido como $dJ_o = r^2 dA$, onde r é a distância perpendicular ao polo (eixo z) até o elemento dA . Assim, para a área inteira, tem-se (HIBELLER, 2011):

$$J_o = \int_A r^2 dA = I_x + I_y. \quad (15)$$

A relação entre J_o , I_x e I_y torna-se possível porque $r^2 = x^2 + y^2$, como pode-se observar na Figura 02. Além disso, as unidades para o momento de inércia para todos os casos mostrados acima serão sempre positivos pelo fato de envolverem distância ao quadrado e área.

2.3 TEOREMA DOS EIXOS PARALELOS

Através do teorema de Steiner, também conhecido como o Teorema dos Eixos Paralelos é possível encontrar o momento de inércia de um corpo em relação a um eixo paralelo a qualquer eixo que passa pelo centro de massa do mesmo corpo (SEARS, 1985).

Segundo Halliday (2012), o teorema dos eixos paralelos pode ser definido como:

$$I_p = I_{cm} + mh^2. \quad (16)$$

Em que:

I_p – Momento de inércia transladado;

I_{cm} – Momento de inércia em relação ao eixo que passa pelo centro de massa do corpo;

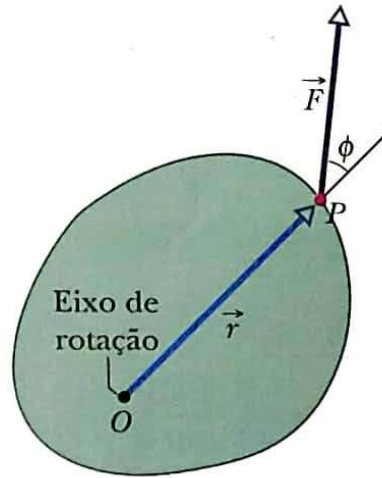
m – Massa do corpo;

h – Distância perpendicular entre o eixo dado e o eixo que passa pelo centro de massa;

2.4 TORQUE

O torque, momento angular, ou simplesmente momento pode ser definido como a tendência de rotação de um corpo em torno de um ponto que não está na linha de ação da força (HIBELLER, 2011). Segundo Halliday (2012) o torque é uma ação de girar um corpo em torno de um eixo de rotação, produzida por uma força F em um ponto dado pelo vetor posição r em relação ao eixo.

Figura 03: Torque produzido pelo vetor força capaz de girar o corpo em torno do eixo de rotação O perpendicular ao plano do papel



Fonte: HALLIDAY (2012).

O módulo do torque pode ser escrito:

$$T = F r \sin(\phi). \quad (17)$$

Sendo:

T – Torque;

r – Distância entre o eixo de rotação e o ponto de ação da força F ;

ϕ – Ângulo entre o vetor r e F .

A unidade do SI correspondente ao módulo do Torque é $N.m$.

É possível ainda expressar o torque a partir da segunda Lei de Newton para rotações (HALLIDAY, 2012):

$$T_{res} = I\alpha. \quad (18)$$

Em que:

T_{res} – Torque resultante que age sobre o corpo rígido ou a partícula;

I – Momento de inércia do corpo rígido ou da partícula;

α – Aceleração angular correspondente a rotação em torno do eixo.

Essa equação é válida para quando o centro de massa do corpo rígido coincide com algum ponto ao longo do seu eixo de rotação. Nesse caso, afirma Hibeller (2005, p. 321), “a soma dos torques de todas as forças externas calculadas em relação ao centro de massa G é igual ao produto do momento de inércia do corpo, em relação a um eixo que passa por G , pela aceleração angular desse corpo.”

2.5 POTÊNCIA

A potência pode ser definida como razão da quantidade de trabalho por unidade

de tempo. Portanto ela pode ser produzida por uma máquina ou motor que realiza um trabalho dU em um intervalo de tempo dt (HIBELLER, 2008):

$$P = \frac{dU}{dt}. \quad (19)$$

Pode-se considerar o trabalho dU como $dU = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$. Assim:

$$P = \frac{dU}{dt} = \frac{\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{F} \cdot \frac{d\mathbf{r}}{dt} \leftrightarrow P = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} \quad (20)$$

em que $\mathbf{v}$ é a velocidade na qual o ponto de aplicação da força $\mathbf{F}$ se desloca.

É possível definir a potência em relação ao momento M , também chamado por alguns autores como Torque. Segundo Beer (2009) a potência pode ser expressa como:

$$P = \frac{dU}{dt} = \frac{M d\theta}{dt} = M\omega. \quad (21)$$

Essa equação é válida para a situação em que um corpo rígido com velocidade angular ω é sujeito a um binário de um momento M paralelo ao eixo de rotação.

Segundo Melconian (2010) é possível escrever a potência como uma função do torque. Reescrevendo a fórmula apresentada pelo autor com outra simbologia, tem-se:

$$P = \frac{\pi NT}{30}. \quad (22)$$

Em que:

P – Potência (W);

T – Torque (Nm);

N – rotação (rpm).

A unidade de potência no sistema SI deve ser expressa em J/s ; essa unidade é denominada *watt*, (W) (BEER, 2009). Dessa forma:

$$1 W = 1 \frac{J}{s} = 1 N \cdot \frac{m}{s}. \quad (23)$$

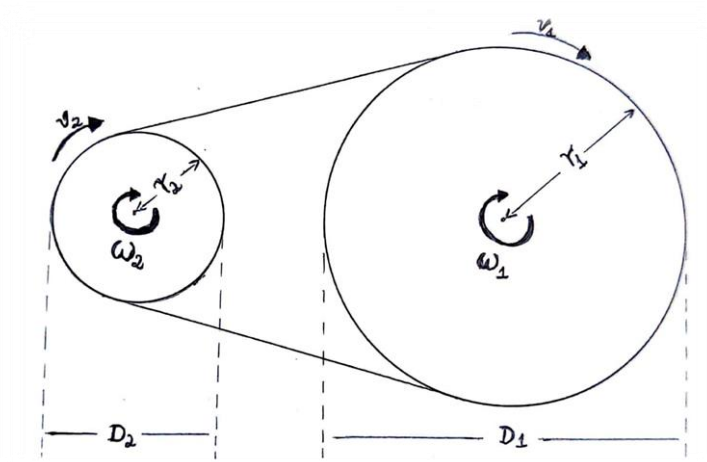
Comumente a potência é expressa em *hp* (*cavalo-potência*). Então:

$$1hp = 746W = 0,746W. \quad (24)$$

2.6 RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO EM CORREIAS

A velocidade de uma correia é a mesma, considerando que não haja escorregamento, em todos os pontos periféricos (LINO, 2013).

Figura 04: Transmissão por correia entre duas polias de diâmetros diferentes



Fonte: Autoria própria (2020).

Assim,

$$v_1 = v_2 \Leftrightarrow \omega_1 r_1 = \omega_2 r_2 \text{ ou} \quad (25)$$

$$\omega_1 D_1 = \omega_2 D_2$$

Substituindo (05) em (25), pode-se concluir que:

$$\frac{\pi N_1}{30} D_1 = \frac{\pi N_2}{30} D_2 \Leftrightarrow N_1 D_1 = N_2 D_2. \quad (26)$$

Em que:

- N_1 – Rotação da polia 1;
- N_2 – Rotação da polia 2;
- D_1 – Diâmetro da polia 1;
- D_2 – Diâmetro da polia 2;

Pela equação (21) pode-se concluir que, para a mesma potência de saída, o momento ou torque é inversamente proporcional a rotação. Nesse caso, em um sistema de transmissão por correias, ao passo que é aumentada a velocidade angular em uma polia, o torque na mesma polia é diminuído na mesma proporção e vice-versa. Portanto, é possível concluir que:

$$P_e = P_s \Leftrightarrow (T_e)(\omega_e) = (T_s)(\omega_s) \quad (27)$$

$$T_s = \left(\frac{\omega_e}{\omega_s} \right) T_e \quad (28)$$

Em que:

- P_e – Potência de entrada;
- P_s – Potência de saída;

T_e – Torque de entrada;

T_s –Torque de saída;

ω_e –Velocidade angular de entrada;

ω_s –Velocidade angular de saída.

2.7 RENDIMENTO MECÂNICO

Segundo (BEER, 2009) o rendimento de uma máquina pode ser tido como a razão entre a potência útil de saída e a potência de entrada, respectivamente, produzida e fornecida pela máquina. Então:

$$\rho = \frac{\text{Potência de saída}}{\text{Potência de entrada}}. \quad (29)$$

O autor ainda enfatiza que o rendimento de uma máquina é sempre menor do que 1, pois as partes móveis de uma máquina produzem forças de atrito, o que se faz necessário o uso de energia ou potência extra para vencer as dissipações provocadas por essas forças.

3 METODOLOGIA

3.1 SOLUÇÃO ANALÍTICA

No desenvolvimento da solução analítica foi considerado que o torque produzido pelo motor do moinho deverá maior ou igual aos torques das forças que se opõem ao movimento de rotação da máquina. Dessa forma, tem-se:

$$T_m \geq T_c + T_\mu. \quad (30)$$

Em que:

T_m – Torque do motor;

T_c – Torque produzido pelo processo de trituração do plástico;

T_μ – Torque das forças dissipativas de energia (atrito, resistência do ar, torque dissipativo resultante de perdas devido ao rendimento dos mancais do rotor, da transmissão por polias entre o motor e o rotor da máquina, etc.).

Assim, pelas equações (28) e (30), o torque do motor deverá ser:

$$T_m \geq \left(\frac{D_m}{D_{mo}} \right) (|T_c| + |T_\mu|). \quad (31)$$

Em que:

T_m – Torque produzido pelo motor;

D_m – Diâmetro da polia do motor;

D_{mo} – Diâmetro da polia do rotor da máquina.

A partir das equações (22), (24) e (31) encontra-se a potência necessária para o motor:

$$P_m \geq \left(\frac{1}{746} \right) \left(\frac{\pi N}{30} \right) (T_m) \Leftrightarrow$$

$$P_m \geq \left(\frac{1}{746} \right) \left(\frac{\pi N}{30} \right) \left(\frac{D_m}{D_{mo}} \right) (|T_c| + |T_\mu|). \quad (32)$$

Em que:

P_m – Potência mínima do motor (hp);

N – Rotação do motor em regime normal de trabalho (rpm).

Na equação (32) pode-se constatar que se faz necessário encontrar o torque (T_c) e o torque dissipativo (T_μ), ambos tidos na referida equação como funções modulares, já que o interesse está voltado apenas para os valores absolutos dos torques. Com o objetivo de encontrá-los, foram usados os métodos apresentados a seguir.

Para o cálculo do torque (T_c) produzido pelo processo de trituração do plástico,

sabe-se a partir da equação (18), que:

$$Tc = (\alpha)(I). \quad (33)$$

Neste caso, o momento de inércia (I) representa a resistência do rotor do moinho ao movimento de rotação em relação ao seu eixo de rotação e a aceleração angular (α) pode ser encontrada tomando-se as seguintes considerações:

- Estimou-se que a rotação do rotor do moinho é constante quando a máquina está em funcionamento sem triturar nenhum plástico;
- Existe um decréscimo percentual da rotação γ do motor produzido pelo momento binário de sentido contrário ao de rotação da máquina no instante do encontro das facas fixas com as rotativas no qual ocorre o cisalhamento do plástico. Portanto, fez-se necessário encontrar o valor médio do decréscimo da rotação da máquina nesta situação;
- A máquina recupera a frequência de rotação perdida pelo processo de corte do plástico após um determinado tempo e percorrendo um certo espaço angular. Logo, foi necessário calcular o valor médio deste espaço angular.

Sendo o intervalo de tempo na ordem de centésimos de segundo, pode-se aproximá-lo para o caso de uma desaceleração constante no eixo do moinho. Então, a partir da equação (8) tem-se:

$$W^2 = W_o^2 + 2(\alpha)(\Delta\theta) \Leftrightarrow \alpha = \frac{W^2 - W_o^2}{2(\Delta\theta)}. \quad (34)$$

Pelas considerações feitas e pelas equações (05) e (25), encontra-se:

$$W = \gamma \left(\frac{\pi N}{30} \right) \left(\frac{Dm}{Dmo} \right), W_o = \left(\frac{\pi N}{30} \right) \left(\frac{Dm}{Dmo} \right) \quad (35)$$

Em que:

W – Valor médio da velocidade angular do eixo do moinho durante a trituração do plástico;

W_o – Velocidade angular do eixo do moinho antes da trituração do plástico;

γ – Percentual decimal médio de perda de velocidade angular do rotor do moinho provocada pelo processo de interação das facas rotativas com o material a ser triturado;

$\Delta\theta$ – Espaço angular médio necessário para o moinho recuperar a velocidade angular inicial, W_o , durante a trituração do plástico.

Considerando as equações (33), (34) e (35), têm-se:

$$T_c = \left(\frac{W^2 - W_o^2}{2(\Delta\theta)} \right) I = \frac{\left[\left(\gamma \frac{\pi N}{30} \right) \left(\frac{Dm}{Dmo} \right) \right]^2 - \left(\left(\frac{\pi N}{30} \right) \left(\frac{Dm}{Dmo} \right) \right)^2}{2\Delta\theta} I \Leftrightarrow$$

$$T_c = \left[\frac{(\gamma^2 - 1)}{2\Delta\theta} \right] \left[\left(\frac{\pi N}{30} \right) \left(\frac{Dm}{Dmo} \right) \right]^2 I. \quad (36)$$

A fim de encontrar o torque produzido pelas forças dissipativas (T_μ), seguiu-se um raciocínio semelhante ao usado para encontrar T_c . Todas as forças dissipativas de energia produzirão trabalho negativo, ou seja, estas forças atuarão no sentido contrário ao movimento de rotação da máquina. A soma dessas forças produzem um torque resultante que por sua vez é responsável por fazer o moinho parar de girar após um tempo depois que a máquina é desligada. Esse mesmo torque age quando a máquina está em funcionamento. Para estimá-lo também foi usada a equação (18), assim:

$$T_\mu = (\mu)(I). \quad (37)$$

De posse do valor da rotação do rotor imediatamente antes do moinho ser desligado e medindo o tempo até o repouso, é possível mensurar o valor da “desaceleração” que o moinho sofre em virtude das forças resistentes ao movimento de rotação da máquina. Portanto, aproximando o comportamento desse movimento como uniformemente desacelerado (ou seja, sendo μ constante) e sendo μ o valor dessa desaceleração, pela equação (10) obtêm-se:

$$\mu = \frac{\omega_f - \omega_o}{\Delta t} \quad (38)$$

$$\omega_f = 0 \text{ e } \omega_o = \left(\frac{\pi N}{30} \right) \left(\frac{Dm}{Dmo} \right) \quad (39)$$

Nesse caso, Δt refere-se ao intervalo de tempo entre o momento que a máquina é desligada até o rotor do moinho cessar sua energia cinética.

Dessa forma, tomando as equações (37), (38) e (39), têm-se:

$$T_\mu = \frac{\left(0 - \left(\frac{\pi N}{30} \right) \left(\frac{Dm}{Dmo} \right) \right)}{\Delta t} I = \left[- \frac{\left(\frac{\pi N}{30} \right) \left(\frac{Dm}{Dmo} \right)}{\Delta t} \right] I. \quad (40)$$

Agora pelas equações (32), (36) e (40), encontra-se:

$$Pm \geq \left\{ \left(\frac{1}{746} \right) \left(\frac{\pi N}{30} \right) \left(\frac{Dm}{Dmo} \right) \left[\left| \frac{(\gamma^2 - 1)}{2\Delta\theta} \left(\left(\frac{\pi N}{30} \right) \left(\frac{Dm}{Dmo} \right) \right)^2 \right| \right. \right. \\ \left. \left. + \left| - \left(\frac{\pi N}{30} \right) \left(\frac{Dm}{Dmo} \right) \left(\frac{1}{\Delta t} \right) \right| \right] I \right\}.$$

Reorganizando,

$$Pm \geq \left\{ \left(\frac{1}{746} \right) \left[\left(\frac{\pi N}{30} \right) \left(\frac{Dm}{Dmo} \right) \right]^2 \left[\frac{(1 - \gamma^2)}{2\Delta\theta} \left(\frac{\pi N}{30} \right) \left(\frac{Dm}{Dmo} \right) + \left(\frac{1}{\Delta t} \right) \right] I \right\}. \quad (41)$$

Em que:

Pm – Potência mínima do motor (hp);

N – Rotação do motor (rpm);

Dm – Diâmetro da polia do motor (mm);

Dmo – Diâmetro da polia do eixo do rotor do moinho (mm);

γ – Percentual médio de perda de velocidade angular do rotor do moinho provocada pelo processo de interação das facas rotativas com o material a ser triturado;

$\Delta\theta$ – Espaço angular médio necessário para o moinho recuperar a velocidade angular inicial, Wo , durante a trituração de uma remessa de plástico (rad).

Δt – Refere-se ao Intervalo de tempo entre o momento que a máquina é desligada até o rotor do moinho cessar sua energia cinética (s);

I – Momento de inércia em relação ao eixo de rotação do rotor da máquina ($kg.m^2$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico foram apresentadas as diversas técnicas usadas para encontrar as variáveis que solucionam o cálculo analítico apresentado na seção anterior. Em seguida, todas as variáveis encontradas foram substituídas na equação (41) e foram encontrados os resultados da solução analítica.

4.1 AQUISIÇÃO DAS VARIÁVEIS

A Tabela 1 apresenta os valores encontrados para algumas variáveis da equação (41):

Tabela 1: Resultados obtidos para N , Dm e Dmo

Variável	Valor
N	1720 <i>rpm</i>
Dm	180 <i>mm</i>
Dmo	600 <i>mm</i>

Fonte: Autoria própria (2020).

Para alcançar uma razoável confiabilidade no resultado do tempo Δt foram cronometradas duas medições. Os resultados de cada teste e a média aproximada estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Tempo necessário para a máquina cessar a rotação do rotor após desligada

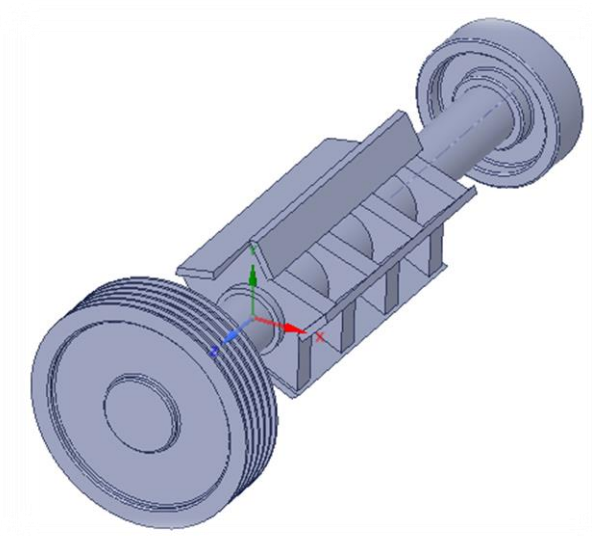
Tempo (s)
29,23
28,33
Média: 29s

Fonte: Autoria própria (2020).

4.1.1 Obtenção do momento de inércia

Para a aquisição do momento de inércia foram utilizados os recursos do desenho assistido por computador. O rotor do moinho foi desenhado no software *SpaceClaim*. O CAD foi feito de forma simplificada e ilustrado em algumas partes com cotas aproximadas, visto que seria necessário desmontar a máquina para efetuar algumas medições com boa precisão. A Figura 05 mostra o resultado do CAD em uma vista isométrica.

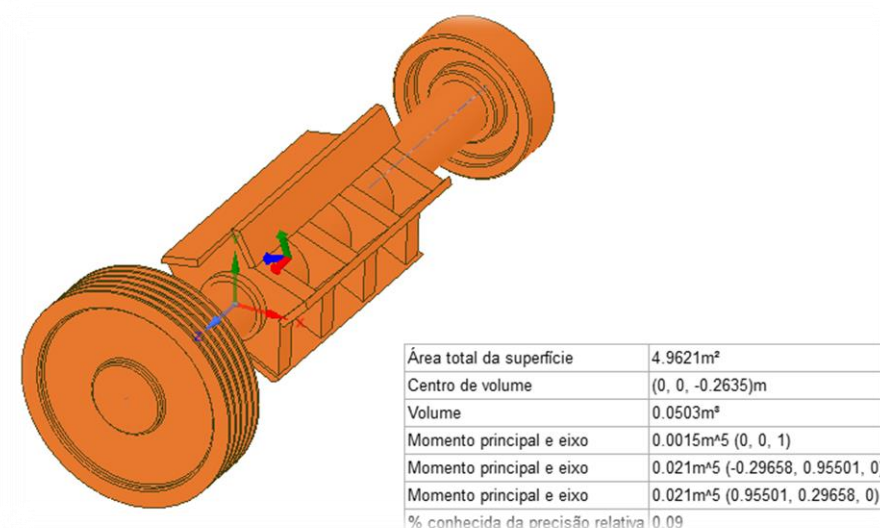
Figura 05: Vista Isométrica do rotor do moinho



Fonte: Autoria própria (2020).

Através do software foi possível extrair as propriedades de massa do desenho incluindo os momentos de inércia principais do rotor. A Figura 06 mostra os dados de massa obtidos a partir do software.

Figura 06: Propriedades geométricas do rotor do moinho



Fonte: Autoria própria (2020).

De posse dos dados fornecidos pela Figura 06 foram calculados a massa, o momento de inércia no centroide do rotor, bem como o momento de inércia em relação ao eixo de rotação da máquina (os dois últimos em função do eixo z).

- Massa (densidade média do aço igual a $d = 7800 \frac{kg}{m^3}$):

$$m = (d)(v) \Leftrightarrow m = (7800 \frac{kg}{m^3})(0,0503 m^3) \Leftrightarrow$$

$$m = 392,3 kg. \quad (42)$$

- Momento de inércia I_{zc} (no centroide):

$$I_{zc} = (0,021m^5)(7800 \frac{kg}{m^3})$$

$$I_{zc} = 163,8 kg.m^2. \quad (43)$$

- Momento de inércia I_{zz} (em relação ao eixo de rotação do rotor):

Com a finalidade de “transferir” o momento de inércia do centroide (ou centro de volume) para o eixo de rotação z será utilizado o teorema dos eixos paralelos, como apresentado na seção 2.3. Pela equação (16), têm-se:

$$I_{zz} = I_{zc} + mh^2. \quad (44)$$

Sendo h a cota z do centro de volume mostrado na figura 06, ou seja, $h = -0,2635 m$. Então, de (42), (43) e (44), encontra-se:

$$I_{zz} = 163,8 + (392,3)(-0,2635)^2 \Leftrightarrow$$

$$I_{zz} = 191,0 kg.m^2. \quad (45)$$

4.1.2 Obtenção das variáveis γ e $\Delta\theta$

Foi necessário pensar uma forma simples, prática, pouco onerosa e que garantisse resultados apreciáveis para obter o valor das variáveis γ e $\Delta\theta$. Dessa forma, foi escolhido trabalhar com o arduino, pois preenche os requisitos acima citados.

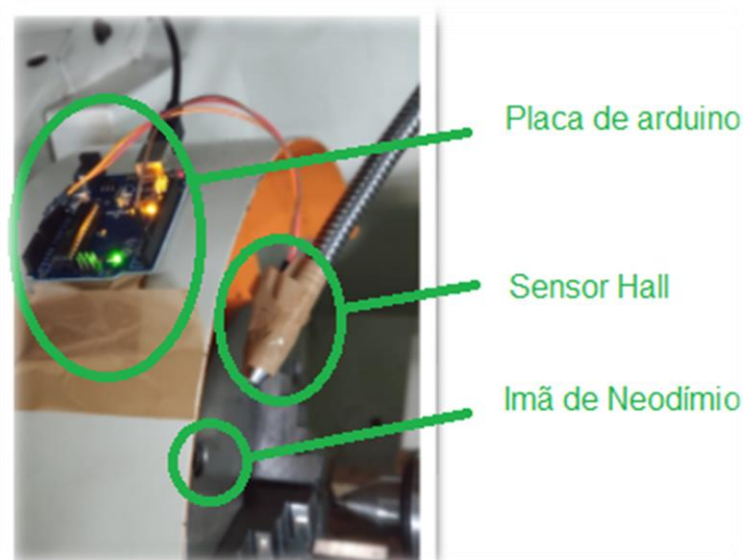
Então, foi escolhida uma placa de arduino UNO juntamente com o sensor de efeito Hall do tipo 44E 402. O sensor de efeito Hall responde com uma variação de tensão de saída quando sob a aplicação de um campo magnético. Com o intuito de armazenar adequadamente as informações da rotação do rotor do moinho foi utilizado o emulador TeraTerm que possibilita a leitura dos dados numa planilha de *excel*.

A placa UNO interage com o sensor hall e realiza os comandos enviados pelo software da plataforma do arduino cuja função é comunicar-se com a placa e lhe enviar instruções. O código do programa encontra-se no Apêndice 2.

4.1.2.1 Calibração do arduino

Depois do circuito e o programa prontos foi realizada a calibração do arduino com o objetivo de conferir a veracidade das medições utilizando dois tornos mecânicos devidamente ajustados. As medições feitas pelo arduino apresentaram os mesmos resultados nos dois casos. A Figura 07 ilustra como a placa de arduino, o sensor Hall e o(s) imã(s) foram dispostos em um dos tornos mecânicos.

Figura 07: Montagem do sistema placa/sensor/ imã no torno mecânico



Fonte: Autoria própria (2020).

Foram efetuados testes em várias velocidades diferentes com um imã de neodímio. Os resultados das medições da rotação [rpm] do torno estão mostradas na Tabela 3:

Tabela 3: Relação entre a rotação no torno e os valores obtidos no arduino

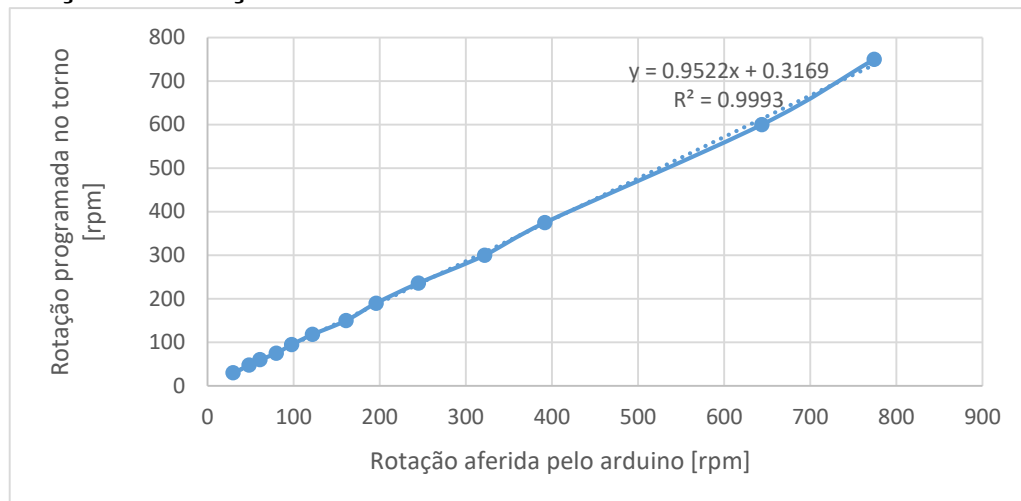
Rotação programada no torno [rpm]	Dados do Arduino [rpm]
30	30
47.5	48.5
60	61
75	80
95	98
118	122
150	161
190	196
236	245
300	322
375	392
600	644
750	774.5

Fonte: Autoria própria (2020).

As diferenças entre a rotação programada no torno e a rotação aferida pelo arduino seguem um padrão que podem ser aproximadas por uma equação de primeiro grau. A Figura 08 mostra a equação de tendência encontrada.

Portanto, com o auxílio da equação da Figura 08 é possível aferir os dados de rotação apresentados pelo arduino com uma de 0.9993.

Figura 08: Equação que corrige a medição efetuada pelo arduino em função da rotação



Fonte: Autoria própria (2020).

A equação da rotação corrigida é:

$$rpmCorrigido = (0.9522)(rpm) + 0.3169. \quad (46)$$

Em que:

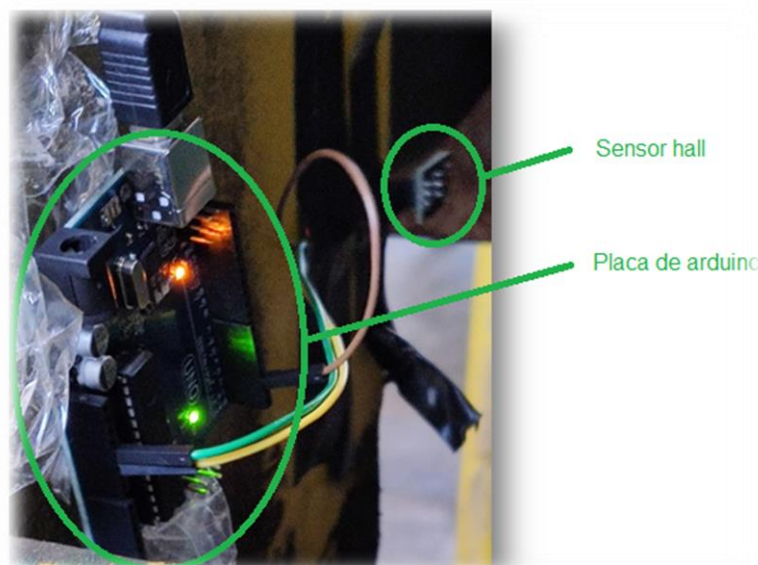
$rpmCorrigido$ – rpm corrigido pela equação de tendência encontrada após a calibragem do arduino;

rpm – Rotação (rpm) mostrada pelo arduino.

4.1.2.2 Montagem do circuito no moinho e coleta dos dados de rotação da máquina

O arduino com seus componentes foram montados no moinho como mostrado na Figura 09.

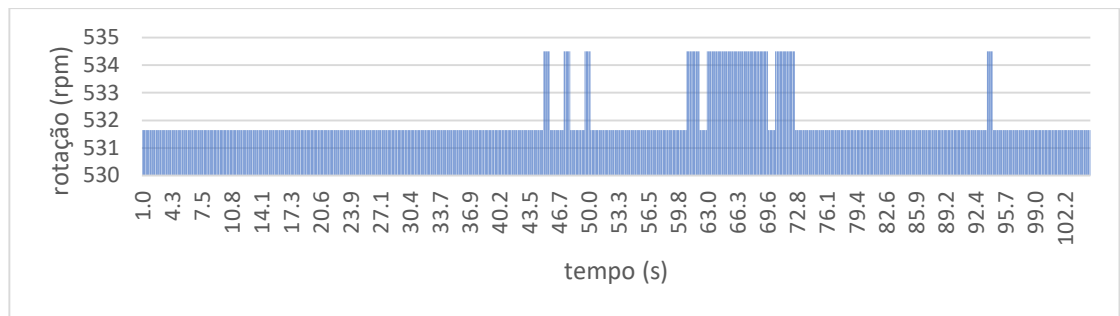
Figura 09: Montagem do sistema placa/sensor/ ímã no moinho



Fonte: Autoria própria (2020).

Com o auxílio do computador, o programa do arduino foi posto em funcionamento e o moinho ligado. A princípio a máquina foi colocada para funcionar por 1min45s sem triturar nenhum insumo. Desse modo foi possível conferir a uniformidade da rotação do moinho nesse estado, como ilustrado na Figura (10).

Figura 10: Rotação do moinho (rpm) em função do tempo (s) sem triturar nenhum insumo



Fonte: Autoria própria (2020).

A partir de uma rápida análise é possível perceber que a rotação dominante na máquina é de aproximadamente 532 *rpm*, com picos de rotação de curta duração. Estes, provavelmente são devido a uma variação de tensão na rede de energia e foram desconsiderados, pois não têm capacidade de causar grandes mudanças no valor das variáveis γ e $\Delta\theta$, ao passo que estas últimas foram obtidas estatisticamente.

Então, foi partido do pressuposto que a rotação do moinho, quando ligado, é constante. Dessa forma, todas as variações na sua rotação foram tidas como consequência da interação das facas rotativas com as facas fixas durante o processamento do plástico.

Posteriormente a matéria-prima foi colocada na esteira que as transporta até a máquina. Como resultado, foram efetuadas mais de 16 mil medições em um tempo de aproximadamente 19 min.

4.1.2.3 Procedimento para encontrar os valores médios de γ e $\Delta\theta$

O método usado para encontrar $\Delta\theta$ será explicado a partir da Tabela 4, que representa um amostra dos dados extraídos do arduino.

Tabela 4: Amostra da planilha de *excel* usada para encontrar $\Delta\theta$

Minutos	Segundos	Tempo (s)	<i>rpm</i> medido	<i>rpm</i> interpolado	α	$\Delta\theta$
4	46.47	286.47	552	526	0.00	0.00
4	46.53	286.53	552	526	4.82	3.26
4	46.59	286.59	555	529	4.75	3.28

4	46.66	286.66	558	532	0.00	0.00
4	46.72	286.72	558	532	0.00	0.00
4	46.78	286.78	558	532	0.00	0.00
4	46.84	286.84	558	532	0.00	0.00
4	46.91	286.91	558	532	0.00	0.00
4	46.95	286.95	558	532	0.00	0.00
4	47.02	287.02	558	532	0.00	0.00
4	47.08	287.08	558	532	0.00	0.00
4	47.14	287.14	558	532	0.00	0.00
4	47.20	287.20	558	532	0.00	0.00
4	47.27	287.27	558	532	0.00	0.00
4	47.31	287.31	558	532	-9.50	-6.54
4	47.38	287.38	552	526	-4.82	-3.24
4	47.44	287.44	549	523	0.00	0.00

Fonte: Autoria própria (2020).

Na quarta coluna estão os dados da rotação (*rpm*) aferidos a partir do arduino. Na horizontal é possível conferir em qual tempo cada medida de rotação (*rpm*) foi efetuada na máquina. Posteriormente foi realizada a interpolação da rotação (*rpm*) a partir da equação (46). Os dados das rotações por minuto interpoladas encontram-se na quinta coluna da Tabela 4.

A aceleração α foi calculada a partir da equação (12). Posteriormente foi efetuada a média das acelerações encontradas ao longo da planilha de *excel*, condicionadas as acelerações a restrição de somente os valores maiores que zero entrarem no cálculo da média, pois apenas as acelerações positivas dizem respeito ao torque desempenhado pelo motor do moinho. O valor médio da aceleração encontrada foi de $5,07\text{rad/s}^2$.

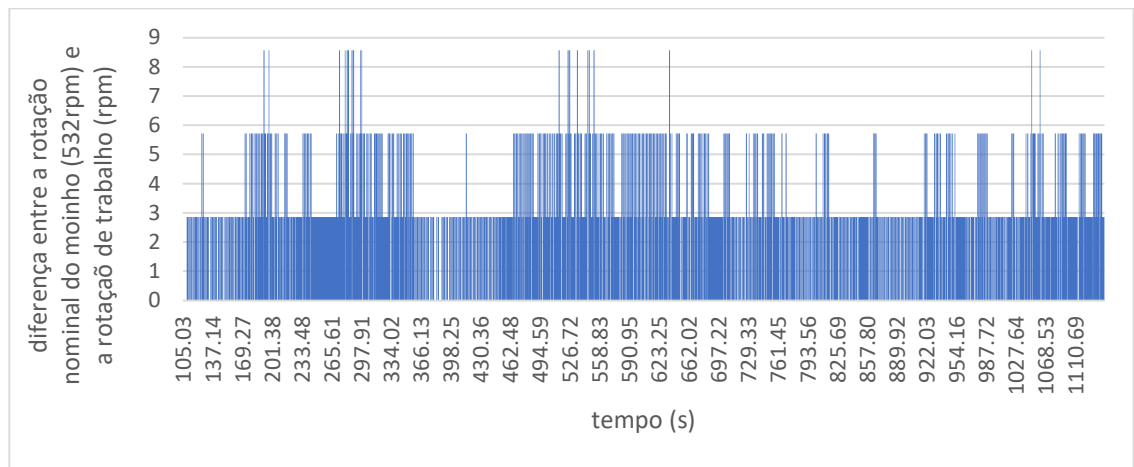
A variável $\Delta\theta$ foi calculada em cada célula da planilha a partir da equação (13), sendo em todos os casos a aceleração igual a $5,07\text{rad/s}^2$. Então, foi encontrado o valor médio do espaço angular calculando-se a média de todos os valores dos espaços angulares maiores que zero. O valor médio encontrado para o espaço angular foi de $3,40\text{ rad}$.

O valor de γ está diretamente relacionado com o grau de variação da rotação da máquina durante o processamento do plástico. Dessa forma, foi realizado o cálculo do desvio padrão amostral de todos os valores de rotação aferidos pelo arduino em relação a rotação de 532 rpm (rotação da máquina sem triturar nenhum insumo). Foi encontrado um desvio padrão amostral no valor de 2.144701168 . O valor de γ foi calculado como mostra a equação abaixo:

$$\gamma = \frac{532 - DESVPAD}{532} = \frac{532 - 2.144701}{532} = 0.995969 \quad (47)$$

Também é possível encontrar γ a partir do cálculo do centroide da Figura 11 em relação ao eixo das abscissas. Para isso, substitui-se o valor do centroide na equação (47) no lugar de *DESVPAD*. A Figura 11 representa o decréscimo da rotação (*rpm*) do moinho em função do tempo. A queda da rotação é baseada a partir da rotação de 532 *rpm*.

Figura 11: Decréscimo da rotação (*rpm*) do moinho em função do tempo (*s*) a partir da rotação de 532 *rpm*



Fonte: Autoria própria (2020).

O valor encontrado para o centroide foi $CGx = 2,1723$. Portanto:

$$\gamma = \frac{532 - 2,172284}{532} = 0.995917 \quad (48)$$

No Apêndice 1 encontra-se uma sequência de gráficos da rotação (*rpm*) do moinho em função do tempo (*s*) ao longo dos 19min que foram coletados pelo arduino e que subsidiaram o cálculo de γ e $\Delta\theta$.

4.2 SUBSTITUIÇÃO DAS VARIÁVEIS NA SOLUÇÃO ANALÍTICA

Em seguida, todas as variáveis foram substituídas na equação (41) a fim de encontrar a potência mínima exigida para a máquina. A potência encontrada para o moinho foi de 73,6 *hp*.

O resultado é coerente com a realidade, visto que a potência do motor do moinho é de 75 *hp*. Portanto, a partir desse resultado pode-se constatar que o uso do modelo matemático apresentado como solução analítica para o presente trabalho pode ser bem sucedido dentro dos fins propostos deste estudo e sua aplicação limitada a modelos de moinhos semelhantes ao apresentado nessa pesquisa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho verificou o dimensionamento do motor de um moinho através de uma solução analítica desenvolvida para esse fim, e obteve êxito no resultado. Portanto, pode-se afirmar que a pesquisa atingiu os objetivos propostos.

Especula-se que este modelo matemático também possa ser usado para fins de concepção de novos projetos de moinhos. Para isso, define-se previamente alguns parâmetros esperados para o projeto e aplica-os na solução analítica apresentada neste trabalho a fim de obter o dimensionamento do motor de um novo protótipo.

Vale ressaltar que tomadas de decisões baseadas a partir deste trabalho devem ser cautelosas e sugere-se uma anterior revisão do mesmo, principalmente no que tange a aquisição das variáveis γ e $\Delta\theta$, pois existem algumas limitações impostas pelo arduino na aquisição destes dados.

Para tanto, sugere-se em trabalhos futuros o uso de um sensor óptico no lugar do sensor magnético para a aquisição das variáveis γ e $\Delta\theta$. Tal recomendação justifica-se em função de uma maior velocidade de resposta e melhor confiabilidade que os sensores ópticos podem proporcionar.

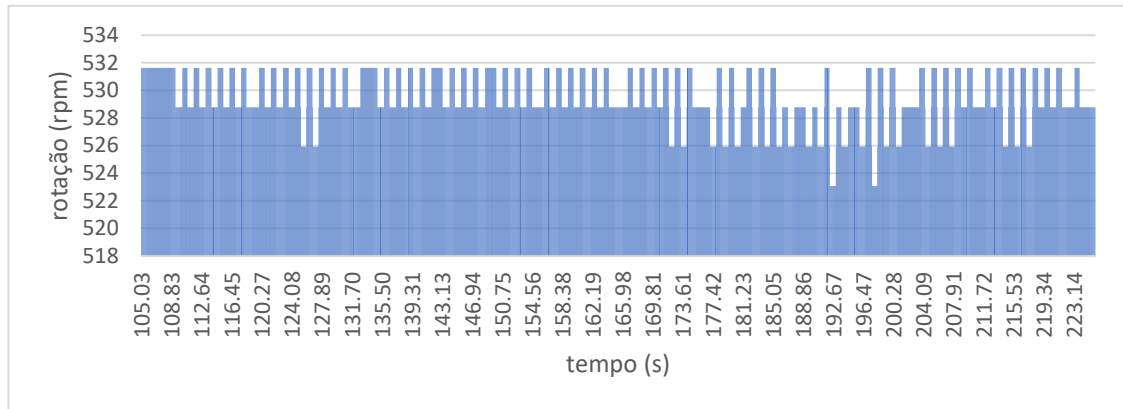
REFERÊNCIAS

- BEER, Ferdinand Pierre. **Mecânica vetorial para engenheiros: Dinâmica**. 9. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2009. **p. 767-768. p. 926. p. 1091**
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (org.). **O tamanho do problema**. [20-
-]. Disponível em:
<https://www.mma.gov.br/responsabilidadesocioambiental/producao-e-consumo-sustentavel/saco-e-um-saco/saiba-mais.html>. Acesso em: 16 mar. 2020.
- CONSUMO SUSTENTÁVEL: **Manual de educação**. Brasília: Consumers International/MMA/MEC/Idec, 2005. p. 118.
- Darshan R., and Gururaja S., (2017). **Design and Fabrication of Crusher Machine for Plastic Wastes**, **International Journal of Mechanical and Production Engineering**, 5(10): 55-58.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física: volume 1: mecânica**. 9. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. **p. 263 p. 367-369**.
- HIBBELER, R. C. **Estática: mecânica para engenharia**. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. XIX, p. 387-388.
- HIBBELER, R. C. **Dinâmica: mecânica para engenharia**. 10 ed. São Paulo: Pearson: Prentice-Hall, 2005. XIV, 572 p.
- HIBBELER, R. C. **Dinâmica: mecânica para engenharia**. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. p.85.
- KELLER, F. J.; GETTYS, W. E.; SKOVE, M. J. **Física - Volume 1**. 1º edição. São Paulo, SP: Makron Books, 1999. p. 321.
- LINO, Prof. Paulo Sérgio Costa. **Polias, Correias e Transmissão de Potência: blog fatos matemáticos**. Blog Fatos Matemáticos. 2013. Disponível em:
<https://docplayer.com.br/15797703-Polias-correias-e-transmissao-de-potencia.html>. Acesso em: 20 mar. 2020.
- MELCONIAN, Sarkis. **Elementos de máquinas**. 9 ed. Ver. São Paulo: Erica, 2010. **p. 19/ p. 31**.
- MUNDO DO PLÁSTICO (Brasil). **7 máquinas essenciais para começar uma linha de reciclagem do plástico**. 2016. Disponível em:
<https://mundodoplastico.plasticobrasil.com.br/reciclagem/7-m-quinas-essenciais-para-come-ar-uma-linha-de-reciclagem-do-pl-stico>. Acesso em: 16 mar. 2020.
- SEARS, F.; ZEMANSKY, M.W.; YOUNG, H.D. **Física: mecânica da partícula e dos corpos rígidos**, v.1, Rio de Janeiro: LTC, 1985. p. 219.

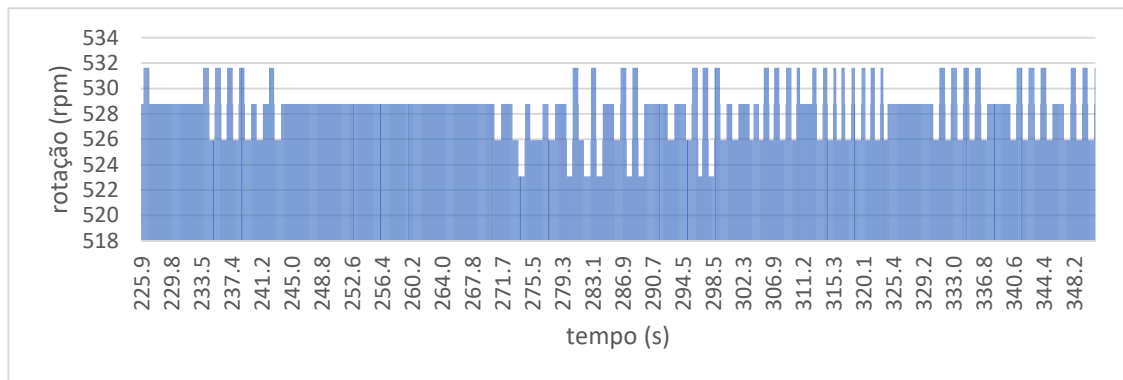
APÊNDICE A – GRÁFICOS DE γ E $\Delta\theta$

Rotação da máquina (rpm) em função do tempo (t) com a presença de insumos

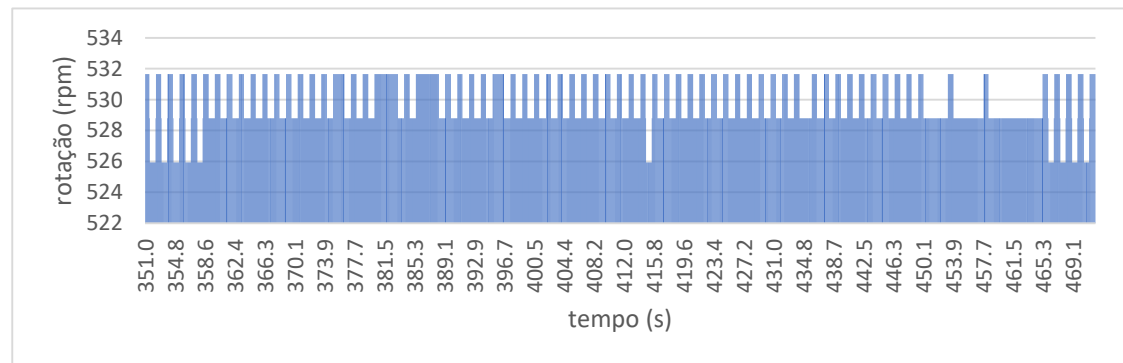
a)



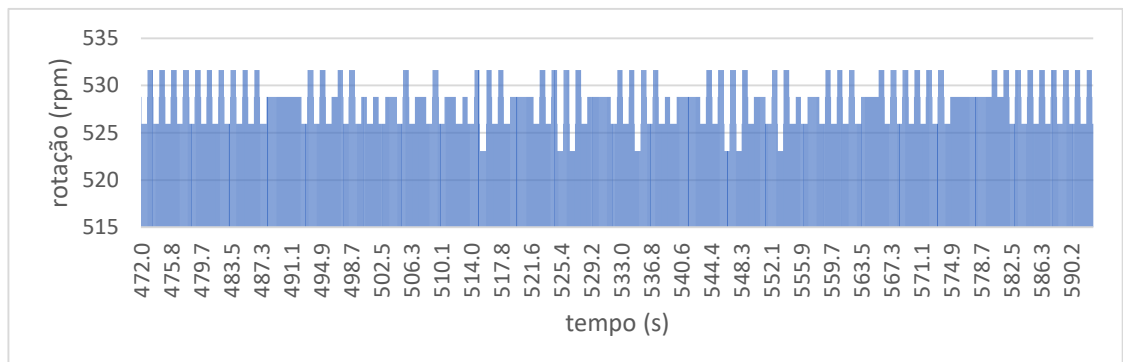
b)



c)

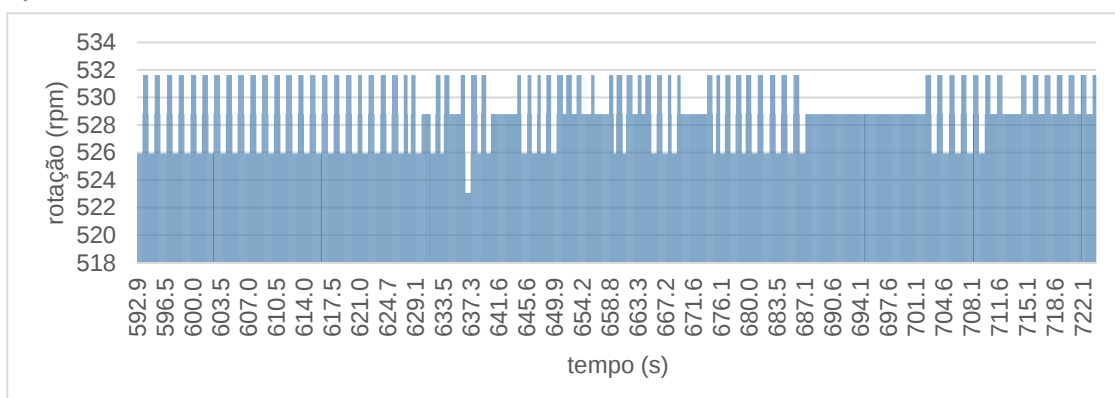


d)

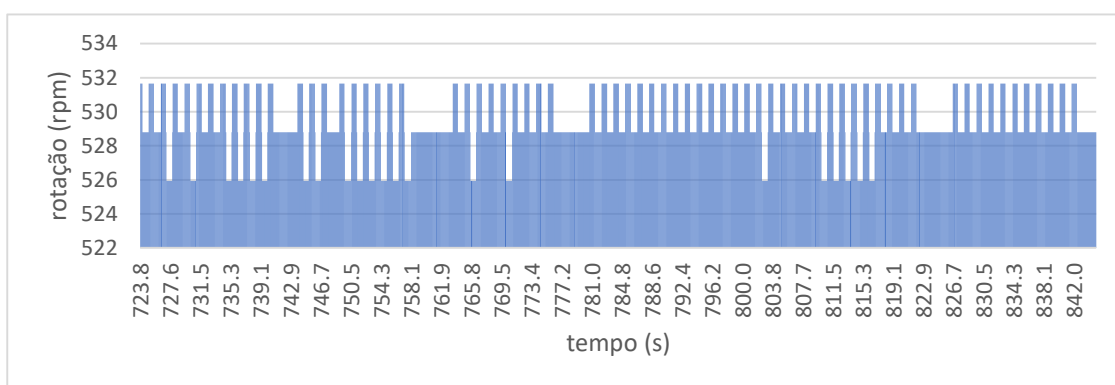


e)

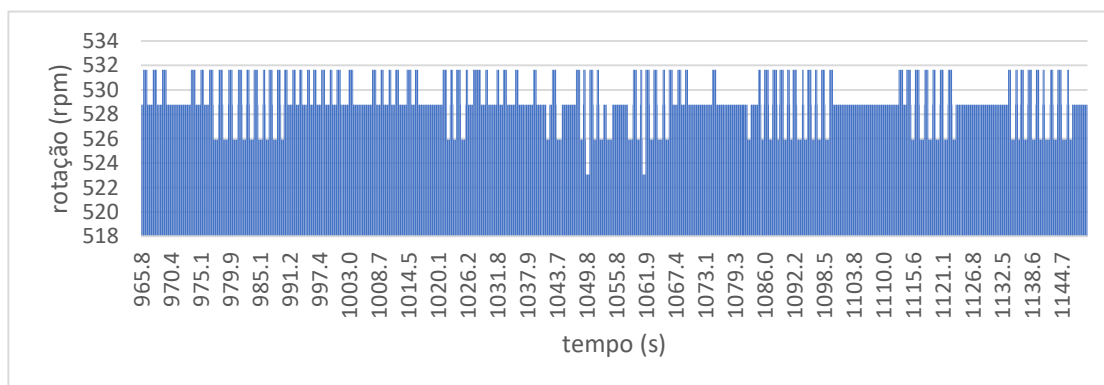
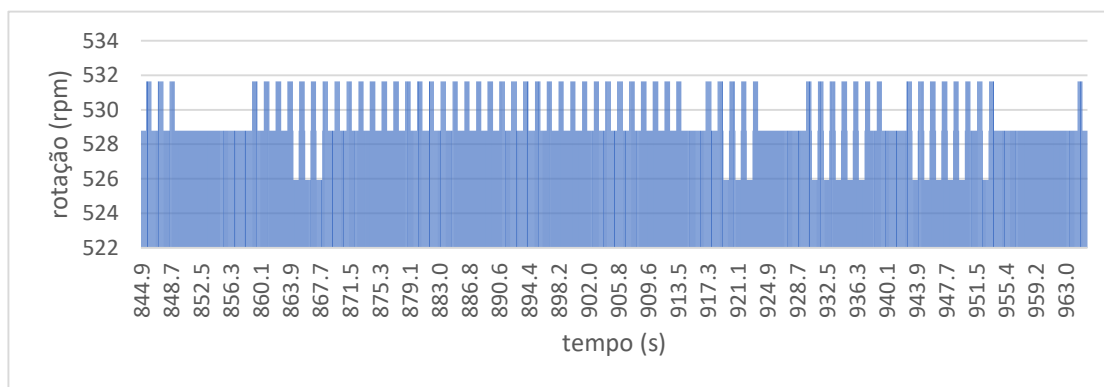
f)



g)



h)



Fonte: Autoria própria (2020).

APÊNDICE B – CÓDIGO DO ARDUINO

```
//      //
```

```
//CALIBRAÇÃO:
```

```
//      //
```

```
const byte PulsosPorRevolucão = 3; // Define o nº de Pulsos por revolução
```

```
const unsigned long MaxPeriodo = 1000000; // Valor correspondente ao período
máximo permitido. Para valores abaixo desse período será exibido o valor real da
rotação. Caso contrário, será exibido o valor 0.
```

```
//Calibração para suavizar o RPM
```

```
const byte NumLeitura = 2; //Número de leituras para suavizar. Quanto mais alto,
mais suave, no entanto reage mais devagar às mudanças. NumeroLeitura igual a 1:
Sem suavização; Padrão: 2.
```

```
// Calibração para zona morta do tacômetro:
```

```
const byte AmostrasZonaMorta = 2; //Quantidade de amostras para zona morta. A
zona morta evita quedas de áreas adjacentes mas diminui a precisão porque vai
ignorar pequenas alterações do valor atual.
```

```
//Um valor 1 significaria que não há zona morta.
```

```
//Com 2, a zona morta será +/- 1 do valor atual do medidor.
```

```
//Exemplo: se o medidor estiver mostrando 100 e a próxima leitura for 101, o medidor
```

```
//ainda mostrará 100. Se a próxima leitura for 102, o medidor irá mostra 101. Padrão:
2.
```

```
//  //  //
```

```
//Variáveis//
```

```
//  //  //
```

```
volatile unsigned long UltimoPulso; //Armazena a última vez que foi medido um pulso
para depois calcular o período.
```

```
volatile unsigned long PeriodoEntrePulsos = MaxPeriodo+1000; //Armazena o
período entre Pulsos em microssegundos. Ele tem um número grande e, portanto, não
começa com 0, o que seria interpretado como uma alta frequência.
```

`volatile unsigned long MediaPeriodo = MaxPeriodo+1000;` //Armazena o período entre pulsos em microssegundos no total, se estivermos recebendo vários Pulsos. Ele tem um número grande e, portanto, não começa com 0, o que seria interpretado como uma alta frequência.

`unsigned long FrequenciaComDecimais;` //Frequência calculada, com base no período. Isso tem muitos decimais extras sem o ponto decimal.

`unsigned long FrequenciaReal;` //Frequência sem decimais

`unsigned long RPM;` //RPM bruto sem qualquer processamento.

`unsigned int ContadorPulsos = 1;` //Conta a quantidade de leituras de Pulsos que fizemos, para que possamos calcular a média de múltiplos Pulsos antes de calcular o período.

`unsigned long SomaPeriodos;` //Armazena a soma de todos os períodos para fazer a média.

`unsigned long UltimoPulsoCiclo = UltimoPulso;` //Armazena a última vez que medimos um Pulso nesse ciclo. Precisamos de uma variável com um valor que não seja afetado pela interrupção porque vamos fazer cálculos e funções que vão atrapalhar se os valores mudarem no meio do ciclo.

`unsigned long ContadorTempo = micros();` //Armazena os micros nesse ciclo. Precisamos de uma variável com um valor que não seja afetado pela interrupção porque vamos fazer cálculos e funções que vão atrapalhar se os valores mudarem no meio do ciclo. Obtemos o RPM medindo o tempo entre 2 ou mais Pulsos, para que o seguinte defina quantos pulsos serão. Faça antes de calcular o RPM. 1 seria o mínimo, dando um resultado a cada Pulsos, o que pareceria muito responsivo mesmo em velocidades muito baixos, mas também será menos preciso em velocidades mais altas. Com um valor em torno de 10, você obterá um resultado muito preciso em altas velocidades, mas as leituras em velocidades mais baixas serão mais distantes um do outro, tornando-o menos "tempo real" nessas velocidades. Existe uma função que definirá o valor dependendo da velocidade, para que isso seja feito automaticamente.

`unsigned int QuantidadeDeLeitura = 1;`

`unsigned int ValorExtraMaxPeriodo;` //Armazena o valor extra adicionado ao MaxPeriodo para devolvê-lo. O MaxPeriodo precisa ser devolvido, portanto, quando o

valor estiver próximo do limite, não pula de 0 para o valor. Esse valor extra altera um pouco o limite quando mostramos o 0.

//Variáveis para suavizar o tacômetro:

unsigned long Leituras[NumLeitura]; // A entrada.

unsigned long PosicaoMatriz; // O índice da leitura atual.

unsigned long total; // O total em execução.

unsigned long Media; // O valor do RPM depois de efetuar a suavização.

//Variáveis para zona morta para medidor:

int TacometroComZonaMorta; //Armazena o valor do medidor após aplicar a zona morta.

int TacometroRemapeado; //Variável para armazenar o valor do medidor após remapeado.

void setup()

{

Serial.begin(1000000);

attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), Pulsos, RISING);

delay(500); //Às vezes, fazemos várias leituras do período como média. Como não temos leituras armazenadas, precisamos de um valor alto o suficiente em micros (), portanto, se dividido não fornecer valores negativos. O atraso permite que os micros () sejam altos o suficiente para os primeiros ciclos.

}

void loop()

{

//A seguir, vamos armazenar os dois valores que podem mudar no meio do ciclo. Vamos fazer cálculos e usar com esses valores e eles podem criar falhas se mudarem no meio do ciclo.

UltimoPulsoCiclo = UltimoPulso;

ContadorTempo = micros();

```

if(ContadorTempo < UltimoPulsoCiclo)
{
    UltimoPulsoCiclo = ContadorTempo;
}

//Calcula a frequência

FrequenciaComDecimais = 10000000000 / MediaPeriodo; // Calcula a frequência
usando o período entre os Pulsos.

//Detecta se os Pulsos pararam ou se a frequência está muito baixa, para que
possamos mostrar a Frequência:

if(PeriodoEntrePulsos > MaxPeriodo - ValorExtraMaxPeriodo || ContadorTempo -
UltimoPulsoCiclo > MaxPeriodo - ValorExtraMaxPeriodo) {

    //Se os Pulsos estiverem muito distantes, atingimos o tempo limite para zero:

    FrequenciaComDecimais = 0; // Define a frequência como 0.

    ValorExtraMaxPeriodo = 2000; // Muda um pouco o limite para que não salte.

}

else

{

    ValorExtraMaxPeriodo = 0; // Redefine o limite para o valor normal para que não salte
imediatamente para zero depois quando o período é maior que MaxPeriodo.

}

FrequenciaReal = FrequenciaComDecimais / 10000; //Obter frequência sem
decimais.

// Calcula o RPM:

RPM = FrequenciaComDecimais / PulsosPorRevolucão * 60; // A frequência dividida
pela quantidade de Pulsos por rotação multiplica por 60 segundos para obter em
minutos.

RPM = RPM / 10000; //remove os decimais.

// Suaviza o RPM:

```

```

total = total - Leituras[PosicaoMatriz]; // Avança para a próxima posição da Matriz

Leituras[PosicaoMatriz] = RPM; // Pega o valor que vamos suavizar.

total = total + Leituras[PosicaoMatriz]; // Adiciona a leitura ao total.

PosicaoMatriz = PosicaoMatriz + 1; // Avança para a próxima posição da Matriz.

if (PosicaoMatriz >= NumLeitura) // Se estamos no final da matriz:

{

PosicaoMatriz = 0; //Redefine o índice da Matriz

}

//Calcula a média:

Media = total / NumLeitura; // O valor médio é o resultado suavizado

//Imprime informações no monitor.

Serial.print("\tNº de Leituras: ");

Serial.print(QuantidadeDeLeitura);

Serial.print("\tRPM: ");

Serial.print(RPM);

Serial.print("\tMedia RPM: ");

Serial.println(Media);

delay(500);

//Zona morta para o tacômetro.Essa é outra camada de suavização do medidor. Ele
adiciona uma zona morta para que não volte e avance para os mesmos valores
adjacentes. Isso ocorre porque os sensores de RPM têm alguma faixa de erro e saltam
entre valores diferentes, mesmo em velocidades constantes.

TacometroComZonaMorta = TacometroComZonaMorta + ((TacometroRemapeado -
TacometroComZonaMorta)/AmostrasZonaMorta);

//Ao colocar um zona morta no tacômetro, os limites não podem mais ser atingidos.
Por isso, precisamos verificar os limites mínimo e máximo:

//Limite mínimo:

```

```

if (TacometroRemapeado == 0) // Se o RPM é 0:
{
    TacometroComZonaMorta = 0; // Mostra o tacômetro real como 0.
}

// Limite máximo:

if (TacometroRemapeado >= 208) // Se o RPM estiver acima ou igual ao limite
máximo:
{
    TacometroComZonaMorta = 208; // Mostra o tacômetro como limite máximo.
}
}

void Pulsos() //A interrupção executa isso para calcular o período entre Pulsos:
{
    PeriodoEntrePulsos = micros() - UltimoPulso; // "micros" atuais menos os "micros"
antigos quando o último Pulsos acontece. Isso resultará no período (microssegundos)
entre os dois Pulsos.

    UltimoPulso = micros(); // Armazena os micros atuais para que da próxima vez que
tivermos um pulso, tenhamos algo para comparar.

    if(ContadorPulsos >= QuantidadeDeLeitura) // Se o contador da quantidade de
leituras atingir o limite definido:
    {
        MediaPeriodo = SomaPeriodos / QuantidadeDeLeitura; // Calcula o período final
dividindo a soma de todas as leituras pelo quantidade de leituras para obter a média.

        ContadorPulsos = 1; // Redefine o contador para começar de novo. O valor de
redefinição é 1 porque é a configuração mínima permitida (1 leitura).

        SomaPeriodos = PeriodoEntrePulsos; // Redefine SomaPeriodos para iniciar uma
nova operação de média. Altera a quantidade de leituras dependendo do período entre
Pulsos. Para ser muito responsivo, idealmente devemos ler todos os Pulsos. O
problema é que, em velocidades mais altas, o período fica muito baixo, diminuindo a

```

precisão. Para obter leituras mais precisas em velocidades mais altas, devemos obter vários Pulsos e calcular a média do período, mas se fizermos isso em velocidades mais baixas, teremos leituras muito distantes (atrasadas ou lentas). Para ter vantagens nas duas velocidades diferentes, alteraremos a quantidade de leituras, dependendo do período entre Pulsos.

//Remapeia o período para a quantidade de leituras:

```
int QuantidadeDeLeituraRemapeado = map(PeriodoEntrePulsos, 400000, 5000, 1, 10); // Remapeia o intervalo do período para o intervalo de leitura. O primeiro valor é o que vamos remapear. Nesse caso, é o PeriodoEntrePulsos. O segundo valor corresponde ao período em que teremos apenas 1 leitura. Quanto maior, menor o RPM para atingir 1 leitura. O terceiro valor é o valor do período em que teremos 10 leituras. Quanto maior, menor o RPM para atingir 10 leituras. Os valores 4 e 5 são a quantidade de leituras.
```

```
QuantidadeDeLeituraRemapeado = constrain(QuantidadeDeLeituraRemapeado, 1, 10); // Restrição do valor para que ele fique dentro do limite especificado
```

```
QuantidadeDeLeitura = QuantidadeDeLeituraRemapeado; // Define a quantidade de leituras como o valor feito.
```

```
}
```

```
else
```

```
{
```

```
ContadorPulsos++; // Aumenta o contador da quantidade de leituras em 1.
```

```
SomaPeriodos = SomaPeriodos + PeriodoEntrePulsos; // Soma os períodos para que possamos calcular a média.
```

```
}
```

```
}
```