

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO COMPARATIVO DO GASTO ENERGÉTICO NO USO DE VOLANTE DE INÉRCIA
EM UM MOTOR ELÉTRICO

por

Eric do Prado Valladares

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2010.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO COMPARATIVO DO GASTO ENERGÉTICO NO USO DE VOLANTE DE INÉRCIA
EM UM MOTOR ELÉTRICO

por

Eric do Prado Valladares

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Rafael Antonio C. Laranja

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Flávio J. Lorini

Prof. Dr. Ivan G. Machado

Prof. Me. Marcelo S. de Mello

Porto Alegre, 26 de novembro de 2010.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por toda liberdade oferecida para que meu caminho seja trilhado e conquistado da forma que me convém.

Meus sinceros agradecimentos ao Professor Doutor Rafael Antonio C. Laranja pelas orientações necessárias para que este trabalho fosse desenvolvido.

Agradeço também à minha mãe Beatriz, ao meu pai Antônio e à minha avó Erica por tudo que fizeram por mim nesta caminhada, me dando todo o auxílio quando necessário.

Gostaria de agradecer à minha namorada Cíntia, que com paciência e carinho soube me auxiliar para mais esta conquista.

Agradeço à toda família, amigos, colegas e professores da universidade, colegas de trabalho, que sempre estiveram presentes e desejaram o melhor para mim.

Muito obrigado a todos.

VALLADARES, E.P. **Estudo Comparativo do Gasto Energético no Uso de Volante de Inércia em um Motor Elétrico**. 2010. 36 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RESUMO

O presente trabalho tem por finalidade o estudo comparativo do consumo e do ganho de energia quando se utiliza um volante de inércia para armazená-la. Na abordagem, utilizou-se um aparato experimental onde foram medidas as rotações do volante de inércia no decorrer do tempo e assim avaliar a variação energética do sistema. Com isso, foi possível concluir que para o sistema composto por motor e volante quando ligado por mais tempo que desligado, o consumo energético foi grande. Para os casos onde se optou por um sistema intermitente de ligamento e desligamento do motor, o consumo de energia mecânica se equivaleu ou permaneceu próximo ao ganho de energia.

PALAVRAS-CHAVE: volante de inércia, consumo energético, variação de inércia, sistema intermitente.

VALLADARES, E.P. **Comparative Study of Energetic Waste in the Use of Flywheel in an Electric Motor.** 2010. 36 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ABSTRACT

The present work aims a comparative study of a consumption and gain of energy when it uses a flywheel to store the energy. Therefore, it has been used an experimental apparatus where flywheel rotations were measured in the course of time, so the energetic variation of the system could be evaluated. As a result, it was possible to conclude that systems when turned on for a longer time than turned off, showed the high energetic consumption. In the cases in which it was chosen an intermittent system of turning on and off the engine, the mechanical energy consumption was equivalent or remained near the gain of energy.

KEYWORDS: flywheel, energy consumption, inertia variety, intermittent process.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	1
2.1. Objetivo geral.....	1
2.2. Objetivos Específicos.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1. Conceitos Básicos.....	2
3.2. Movimento Rotacional.....	3
3.3. Equacionamento do Trabalho e Energia.....	4
4. INCERTEZAS.....	4
5. METODOLOGIA.....	5
5.1. Material Utilizado.....	5
5.2. Montagem do Experimento.....	6
5.3. Técnicas Experimentais e Resultados.....	7
6. CONCLUSÕES	14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
Apêndice I	16
Apêndice II	20
Apêndice III	21
Apêndice IV	23
Apêndice V	28

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o desenvolvimento sustentável, diminuição em consumo de qualquer tipo de energia, e diminuição de custos de qualquer gênero têm aumentado ao longo dos anos. A partir disso o mercado vem aumentando a demanda por sistemas que possuem uma autonomia maior com o menor consumo energético possível, e para que isso aconteça, estão sendo desenvolvidos os mais diversos tipos de pesquisas na área, incluindo o interesse pelo uso de volantes de inércia para armazenar energia (Munhoz, 2010).

Neste trabalho se analisa o uso de um volante de inércia para verificar o consumo final de energia desenvolvido pelo sistema verificando a sua eficiência. Segundo Khurmi e Gupta, 2006, o volante de inércia funciona como reservatório de energia, armazenando-a quando um motor gera energia em excesso para efetuar o trabalho imposto pelo sistema, e no momento em que esse trabalho é maior que o motor pode suprir, o volante de inércia libera energia ao sistema para inteirar a falta de energia necessária imposta. De forma análoga, o volante de inércia ajuda a controlar a variação de velocidade e rotação de um motor causada pela flutuação do torque do motor durante cada ciclo de operação.

Em sistemas que possuem movimentos intermitentes como prensas, máquinas trituradoras, máquinas de rebitagem, máquinas de corte, o volante de inércia armazena energia na maior parte do tempo, ou seja, durante quase todo o ciclo, e libera essa energia armazenada em um curto período de tempo, fazendo com que a energia fornecida ao motor do equipamento seja praticamente constante durante todo o ciclo de operação, sempre lembrando que o volante de inércia simplesmente reduz a flutuação de velocidade de um motor [Khurmi e Gupta, 2006].

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento de um sistema composto por um motor elétrico e um volante com inércia variável quanto à sua relação energética no que diz respeito a energia mecânica consumida e armazenada.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- 1- elaborar um experimento capaz de medir e comparar energia fornecida ao sistema, e energia dissipada pelo sistema;
- 2- verificar quanto ao uso do volante em um sistema intermitente e outro não;
- 3- analisar os resultados obtidos;
- 4- comparar os resultados do experimento variando a inércia do volante através de massas que serão acopladas ao mesmo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CONCEITOS BÁSICOS

Tão importante quanto às leis de movimento são as equações básicas necessárias para fazer o estudo que relaciona movimento e força, que são utilizadas no experimento.

Sabe-se que o trabalho é composto por [Hibbeler, 2005]:

$$U_{1 \rightarrow 2} = \int_{S_1}^{S_2} (F \cos \phi) dS \quad (3.1)$$

$U_{1 \rightarrow 2}$ representa o trabalho [J] de todas as forças que agem sobre um determinado corpo de um tempo inicial até um tempo final, F é a força aplicada [N], ϕ é o ângulo entre a força e o movimento da partícula ou corpo envolvido [rad], S a posição da partícula ou corpo [m].

Esta mesma equação pode ser escrita de uma forma mais simples [Hibbeler, 2005]:

$$U = FS \cos \phi \quad (3.2)$$

Segundo Beer et alli, 2006, a energia cinética é formada por uma parcela de movimento devido à translação do corpo e uma segunda parcela devido à rotação do mesmo corpo:

$$E_C = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 + \frac{1}{2} \bar{I} \omega^2 \quad (3.3)$$

Sendo E_C a energia cinética [J], m a massa do corpo [kg], v a velocidade representada de forma vetorial [m/s], I o momento de inércia de massa do corpo [kgm²] e ω a velocidade angular do corpo [rad/s].

Já a potência mecânica pode ser representada por [Hibbeler, 2005]:

$$P = \frac{dU}{dt} \quad (3.4)$$

Onde P é a potência [W], dU [J] é a parcela de trabalho obtido numa faixa de tempo dt [s].

A mesma equação resumida numa forma mais simples:

$$\bar{P} = \frac{U}{t} \quad (3.5)$$

Sendo \bar{P} representado pela potência média em uma determinada variação de tempo.

Outra forma de representar a potência é através de energia elétrica, onde a relação principal consiste em [Norton, 2008]:

$$P = Vi \quad (3.6)$$

Sendo V a tensão nominal [V] e i a corrente [A].

Por último a potência pode ser representada por [Hibbeler, 2005]:

$$P = Fv \quad (3.7)$$

Sendo v a velocidade escalar de um corpo ou uma partícula [m/s].

3.2. MOVIMENTO ROTACIONAL

Assim como mostrado anteriormente, as equações de movimento podem ser representadas em sua forma devido a um movimento de giro, que é o foco principal da pesquisa a ser desenvolvida. O texto a seguir mostra os conceitos básicos apresentados por Khurmi e Gupta, 2006.

Sabe-se que o trabalho é composto por:

$$U = \int_{\theta_1}^{\theta_2} Frd\theta \quad (3.8)$$

U representa o trabalho, r é o raio [m], θ é o deslocamento angular [rad]. Esta mesma equação pode ser escrita de uma forma mais simples:

$$U = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \tau d\theta \quad (3.9)$$

τ é o torque [Nm].

A energia cinética assume apenas uma parte de sua expressão para um movimento rotacional [Norton, 2008]:

$$E_c = \frac{1}{2} \bar{I} \omega^2 \quad (3.10)$$

Da equação anterior, é importante conhecer como se obtém o momento de inércia que é a medida de resistência de um corpo a uma aceleração angular [Hibbeler, 2005]:

$$I = \int_m r^2 dm \quad (3.11)$$

Sendo m a representação da massa do corpo sujeito à rotação, e r do raio.

Em sua forma mais simples, o momento de inércia também é posto como [Norton, 2008]:

$$I = mr^2 \quad (3.12)$$

O mesmo momento de inércia é também representado por [Norton, 2008]:

$$\tau = I\alpha \quad (3.13)$$

Sendo α a aceleração angular do corpo.

Já a potência, para o caso de movimento rotacional, pode ser representada por [Shigley e Mischke, 2001]:

$$P = \frac{dU}{dt} = \tau \frac{d\theta}{dt} = \tau\omega \quad (3.14)$$

3.3. EQUACIONAMENTO DO TRABALHO E ENERGIA

Como citado anteriormente, as leis de Newton trazem junto o princípio de impulso e quantidade de movimento, os quais de forma análoga definem as relações de trabalho e energia que são relevantes para a trabalho abordado. As equações de trabalho e energia podem ser relacionadas, segundo Hibbeler, 2005:

$$E_{C1} + \Sigma U_{1 \rightarrow 2} = E_{C2} \quad (3.15)$$

E_{C1} e E_{C2} representam respectivamente os valores inicial e final da energia cinética total. $\Sigma U_{1 \rightarrow 2}$ representa o somatório do trabalho de todas as forças que agem sobre um determinado corpo de um tempo inicial até um tempo final. Por outro lado, a Equação 3.12 pode ser apresentada em sua forma mais geral, adicionando o termo devido a perdas que podem ser interpretadas na forma de calor e atrito entre outras:

$$U - C_{alor} = \Delta E \quad (3.16)$$

C_{alor} representa a parcela de perda [J] devido ao atrito ou calor e ΔE representa a variação de energia cinética [J].

No caso estudado relacionam-se as potências, uma vez que a potência de entrada é adquirida em forma de energia elétrica, então, por comparação, a equação de conservação de energia pode ser reescrita da seguinte forma:

$$P_U - P_C = P_E \quad (3.17)$$

4. INCERTEZAS

A equação geral para a propagação de incertezas utilizada neste trabalho, segundo Taylor, 1997, é:

$$X = \bar{X} \pm \Delta X \quad (4.1)$$

Sendo ΔX :

$$\Delta X = \sqrt{\left(\frac{dx}{da} \Delta a\right)^2 + \left(\frac{dx}{db} \Delta b\right)^2 + \left(\frac{dx}{dc} \Delta c\right)^2 + \dots + \left(\frac{dx}{dz} \Delta z\right)^2} \quad (4.2)$$

A partir disso, a Equação 4.2 pode ser aplicada na determinação da incerteza da inércia, da energia mecânica e da variação do trabalho. Como exemplo, segue a Equação 4.3 para o cálculo de incerteza do momento de inércia:

$$\Delta I = \sqrt{\left(\frac{dI}{dm} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{dI}{dR} \Delta R\right)^2} \quad (4.3)$$

Sendo ΔI a incerteza relacionada ao momento de inércia, Δm a incerteza da massa, e ΔR a incerteza relacionada ao raio medido.

Resolvendo-se a equação, tem-se a nova forma:

$$\Delta I = \sqrt{\left(\frac{R^2}{2} \Delta m\right)^2 + (mR\Delta R)^2} \quad (4.4)$$

Lembrando que as incertezas utilizadas foram obtidas segundo a aferição dos instrumentos. Para o cálculo de incerteza do trabalho, foram utilizados os desvios dos dados obtidos no próprio experimento, uma vez que este era muito maior que a incerteza dos instrumentos adquiridos. Esse caso pode ser visto segundo a equação de incerteza da energia mecânica e incerteza do trabalho. A Equação 4.5 modela a incerteza da energia cinética do sistema e a Equação 4.6 modela a do trabalho:

$$\Delta E_c = \sqrt{(\omega^2 \Delta I)^2 + (2\omega I \Delta \omega)^2} \quad (4.5)$$

$$\Delta T = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \Delta I (\omega_2^2 - \omega_1^2)\right)^2 + (-I\omega_1 \Delta \omega_1)^2 + (I\omega_2 \Delta \omega_2)^2} \quad (4.6)$$

Sendo ΔT a incerteza do trabalho, $\Delta \omega_1$ a incerteza da velocidade angular e $\Delta \omega_2$ a incerteza da velocidade angular.

Cabe salientar que o cálculo de $\Delta \omega$ foi obtido através da média dos valores de ω e de seu desvio, e pode ser visto na Tabela 1 do Apêndice I que mostra apenas o caso estudado do volante de inércia sem massas acopladas. Em algumas situações onde não foi possível obter uma média e um desvio dos valores, a incerteza utilizada foi a do instrumento, neste caso o tacômetro, sendo a mesma de uma rotação por minuto (RPM). Para as outras situações as quais fornecem dados referentes ao volante de inércia com massas, ver Apêndice I Tabelas 2 a 4.

5. METODOLOGIA

5.1. MATERIAL UTILIZADO

Os materiais utilizados para a realização dos experimentos foram:

1. Um motor elétrico de corrente alternada, fixo em uma bancada com isolamento de vibrações através de molas, com tensão de entrada de $116,3 \pm 3,8$ V, com um circuito elétrico para controle da velocidade de rotação do motor.

2. Um disco de aço SAE1020 fixo ao eixo do motor elétrico através de parafusos, que caracteriza o volante de inércia. Esse disco tem massa de 221 ± 1 g e possui diâmetro de $140 \pm 0,05$ mm.

3. Massas retangulares de 20 ± 1 g de aço SAE1020, para serem acrescentadas ao volante de inércia com função de aumentar o momento de inércia do disco.

4. Parafusos com porcas e contra-porcas com 13 ± 1 g de massa total para fixação das massas ao volante de inércia.

5. Uma balança de 5 kg, marca SF-400, com incerteza de ± 1 g, conforme pode ser visualizada na figura 5.1.

6. Um tacômetro digital foto/contato da marca Minipa modelo MDT-2238A com incerteza de ± 1 RPM com fita reflexiva que vai colada ao corpo que se quer obter medidas de rotação.

7. Um cronômetro digital da Technos com incerteza de $\pm 0,01$ segundos.

8. Uma câmera digital (Canon S95) acoplada a um tripé para registrar os dados simultaneamente em vídeo de 30 quadros por segundo.

A seguir, a Figura 5.1 representa os materiais utilizados no experimento: da esquerda para direita e abaixo, volante de inércia, tacômetro digital e balança SF-400; acima, parafusos e massas, multímetro para medir tensão e multímetro para medir corrente; mais acima, chave alien, alicate, estabilizador e motor.



Figura 5.1. Representação dos equipamentos utilizados no experimento.

5.2 MONTAGEM DO EXPERIMENTO

A metodologia utilizada neste trabalho consiste em caracterizar um volante de inércia, que se trata de um disco de aço com furos simetricamente radiais acoplado a um motor elétrico. Este por sua vez, possui a função de transformar energia elétrica em energia mecânica, que é transferida ao volante de inércia em movimento de rotação. A presença de furos no disco têm como uma de suas finalidades a fixação das massas para variar a inércia do mesmo e poderem ser feitas comparações para diferentes situações.

A Figura 5.2 ilustra o motor com o volante de inércia com duas massas acopladas.

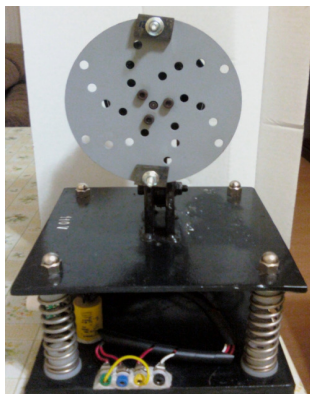


Figura 5.2. Volante de inércia com duas massas.

5.3 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS

Para realizar o trabalho a respeito do estudo comparativo do gasto energético foi instalado um tacômetro digital em posição previamente definida, junto ao cronômetro (Figura 5.3). Acima deles, colocou-se a câmera digital para fazer a filmagem. Desta forma foi possível realizar a medição da rotação do volante de inércia e do tempo num mesmo instante, e esses valores foram anotados através de visualização do vídeo em um computador.



Figura 5.3. Aquisição de dados experimentais através de vídeo.

Essas medições foram obtidas no decorrer do tempo com intervalos de aproximadamente três segundos. Nas primeiras aquisições de dados, manteve-se o motor ligado até o momento em que o volante de inércia atingisse uma rotação constante, e após alcançar a situação descrita, o sistema foi desligado para que energia mecânica fosse dissipada até a parada completa do volante. A variação do tempo e da rotação no momento em que se desligou o motor até sua parada também foi obtida para se verificar a energia dissipada no processo.

Este mesmo procedimento foi repetido três vezes para quatro montagens do volante de inércia no que diz respeito à variação de sua inércia. Essas repetições tiveram a finalidade de obter valores médios e desvios para posterior cálculo de incertezas.

Os diferentes modelos de volante de inércia se resumiram a: volante de inércia sem massas acopladas; volante de inércia com duas massas acopladas; volante de inércia com quatro massas e volante de inércia com seis massas. A título de exemplo, os valores médios dos dados adquiridos, bem como seus desvios são indicados na Tabela 5.1, cujas informações

referem-se ao volante de inércia sem massas acopladas, onde a faixa demarcada indica o momento de desligamento do motor.

Tabela 5.1. Dados obtidos para o volante de inércia sem massa acopladas.

1ª Tomada de Valores						MÉDIA	
t (s)	N (RPM)	t (s)	N (RPM)	t (s)	N (RPM)	t (s)	N (RPM)
3,05	261,9	3,19	268,8	3,15	212,0	3,13	247,6
6,05	897,1	6,09	770,9	6,00	989,8	6,05	885,9
9,05	1332,0	9,09	1267,0	9,00	1404,0	9,05	1334,3
12,05	1581,0	12,05	1565,0	12,05	1582,0	12,05	1576,0
15,09	1580,0	15,03	1588,0	15,13	1594,0	15,08	1587,3
18,15	1586,0	18,05	1592,0	17,97	1599,0	18,06	1592,3
21,00	1589,0	21,15	1596,0	21,05	1602,0	21,07	1595,7
24,05	1592,0	24,15	1598,0	24,05	1603,0	24,08	1597,7
27,05	1596,0	27,07	1601,0	27,03	1605,0	27,05	1600,7
30,19	1597,0	30,05	1602,0	30,13	1606,0	30,12	1601,7
33,19	1600,0	33,05	1603,0	33,09	1607,0	33,11	1603,3
36,14	1609,0	36,25	1604,0	36,00	1609,0	36,13	1607,3
39,19	1606,0	39,03	1604,0	38,96	1610,0	39,06	1606,7
42,05	1610,0	42,05	1607,0	42,00	1611,0	42,03	1609,3
45,05	1613,0	45,05	1608,0	45,05	1614,0	45,05	1611,7
48,13	1613,0	48,09	1610,0	48,03	1616,0	48,08	1613,0
51,19	1615,0	51,00	1611,0	51,03	1617,0	51,07	1614,3
54,19	1616,0	54,05	1613,0	54,05	1618,0	54,10	1615,7
57,15	1607,0	57,15	1613,0	57,05	1618,0	57,12	1612,7
60,20	1605,0	60,18	1604,0	60,14	1618,0	60,17	1609,0
63,00	1149,0	63,05	1202,0	63,25	1126,0	63,10	1159,0
66,05	698,0	66,05	764,1	66,09	702,1	66,06	721,4
69,09	344,0	69,13	291,8	69,05	342,7	69,09	326,2
72,09	132,4	72,08	189,9	72,17	134,0	72,11	152,1
72,51	0,0	72,65	0,0	72,65	0,0	72,60	0,0

A tabela é composta por quatro grupos de valores, sendo que cada grupo possui uma coluna contendo o tempo em segundos medido pelo cronômetro, outra contendo o número de rotações por minuto medidos no tacômetro digital. Em seguida calcula-se o tempo médio e a rotação média conforme apresentado na Tabela 1 e subsequentes tabelas do Apêndice I.

Os dados obtidos e cálculos de desvios são indicados na Tabela 5.2 que fornece valores da variação de energia mecânica para os instantes médios. Esta tabela refere-se ao volante de inércia sem massas e esses valores foram obtidos através da Equação 3.10 e os desvios obtidos a partir da Equação 4.5. Para casos de volante com duas, quatro e seis massas, ver Tabelas 2 a 4 do Apêndice II.

Tabela 5.2. Cálculo de energia mecânica e seu desvio obtidos no eixo do motor para diferentes intervalos de tempos.

t (s)	Em do Sistema (J)	{Em (J)}
	$Em = 1/2.I.w^2$	
3,13	0,182	0,070
6,05	2,330	0,807
9,05	5,286	0,737
12,05	7,374	0,148
15,08	7,480	0,108
18,06	7,528	0,101
21,07	7,559	0,102
24,08	7,578	0,092
27,05	7,607	0,082
30,12	7,616	0,082
33,11	7,632	0,074
36,13	7,670	0,072
39,06	7,664	0,072
42,03	7,689	0,065
45,05	7,711	0,075
48,08	7,724	0,070
51,07	7,737	0,072
54,10	7,750	0,068
57,12	7,721	0,093
60,17	7,686	0,128
63,10	3,988	0,396
66,06	1,545	0,244
69,09	0,316	0,089
72,11	0,069	0,046
72,60	0,000	0,000

A partir da Tabela 5.2 construiu-se o gráfico de variação de energia mecânica em função do tempo. A Figura 5.4 mostra o comportamento da curva para o caso do volante de inércia sem massas. Para casos em que o volante de inércia tem massas acopladas ver figuras do Apêndice III.

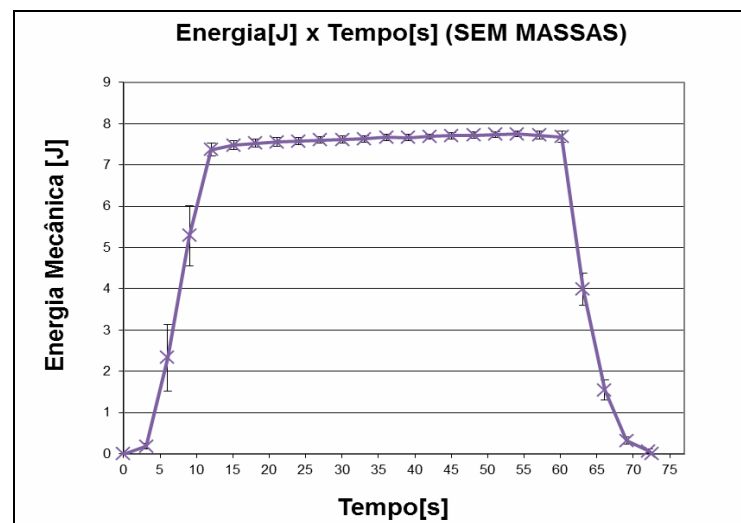


Figura 5.4. Variação de energia mecânica do volante de inércia sem massas.

Desta forma, pode-se observar que para a inércia aplicada, o ganho de energia mecânica se deu de forma muito rápida chegando a aproximadamente 7,5 J, depois permaneceu de forma quase constante numa faixa entre 7,5 e 8 J. Ao chegar a aproximadamente 60 segundos, o motor foi desligado para verificação de energia mecânica devolvida ao sistema.

O interesse do presente trabalho está em comparar energia gasta ou consumida por energia mecânica fornecida ou devolvida ao sistema. Considerou-se que todo o tempo em que o motor foi mantido ligado, havia um gasto de energia, então a área sob a curva que representa a potência consumida é muito maior que a potência devolvida pelo sistema, a qual é representada apenas pela curva posterior a 60 segundos. Dessa forma foi possível verificar que se o motor for mantido ligado até alcançar seu limite de rotação, demanda-se muito tempo e o consumo de energia é grande quando comparado à energia mecânica devolvida após o momento em que o motor é desligado. Isso também vale para os gráficos construídos a partir dos valores obtidos para volantes de inércia com duas, quatro e seis massas acopladas encontrados no Apêndice III.

A fim de melhorar o aproveitamento de energia diminuiu-se o intervalo de tempo com o motor ligado, por outro lado, tentou-se analisar o comportamento ligando e desligando o motor três vezes durante esse novo grupo de experimentos, sendo estimado que os novos religamentos por teste seriam feitos em torno do valor médio da rotação máxima atingida pelo motor. Com este novo procedimento, novas tabelas de diferentes valores de rotação, velocidade angular e variação de energia mecânica e seus respectivos desvios foram obtidas para as situações com volante de inércia sem massas, com duas, quatro e seis massas. Estas tabelas podem ser vistas no Apêndice IV (tempo e rotação) e Apêndice V (energia mecânica). A partir destas tabelas, foi possível a construção dos gráficos a seguir, representados pelas Figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 no caso em que o motor foi ligado e desligado quatro vezes.

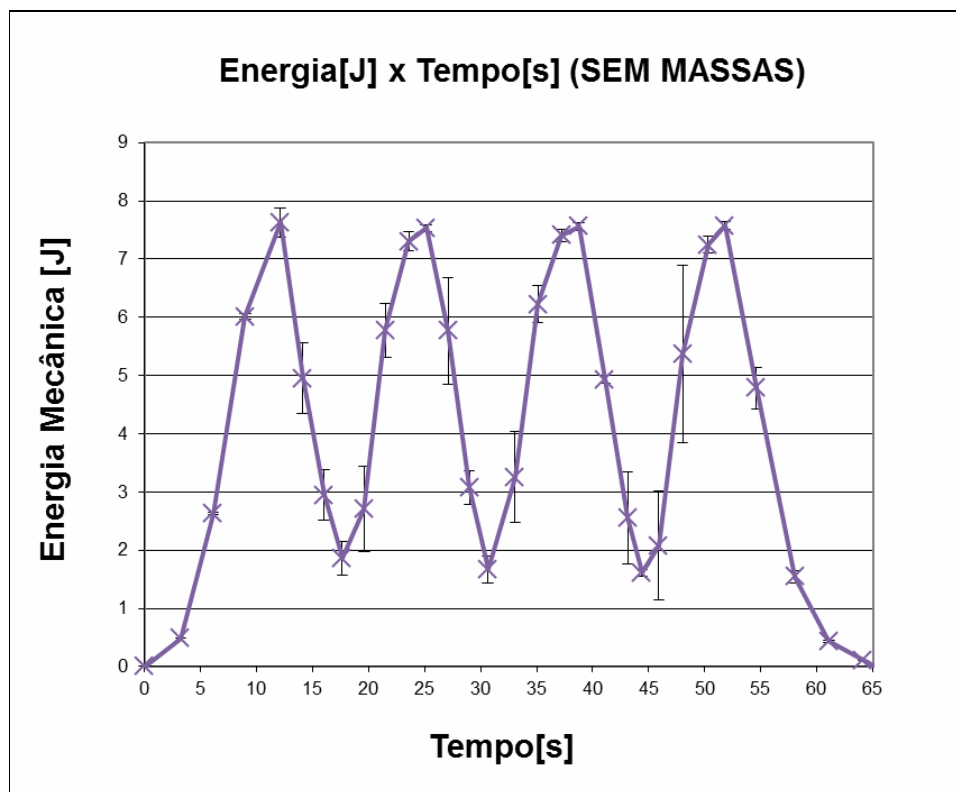


Figura 5.5. Variação de energia mecânica para o volante de inércia sem massas no segundo caso.

De acordo com a Figura 5.5, observa-se que o limite rotacional do motor para o estudo de um sistema intermitente ficou na margem dos 7,5J, assim como estudado no caso não intermitente, provando que não houve diminuição significativa na rotação. Para manter o sistema intermitente, os religamentos do motor foram feitos a aproximadamente o valor médio do limite rotacional como dito anteriormente, e isto representou em termos energéticos a faixa entre 1,5 e 2J para o sistema sem massas acompladas.

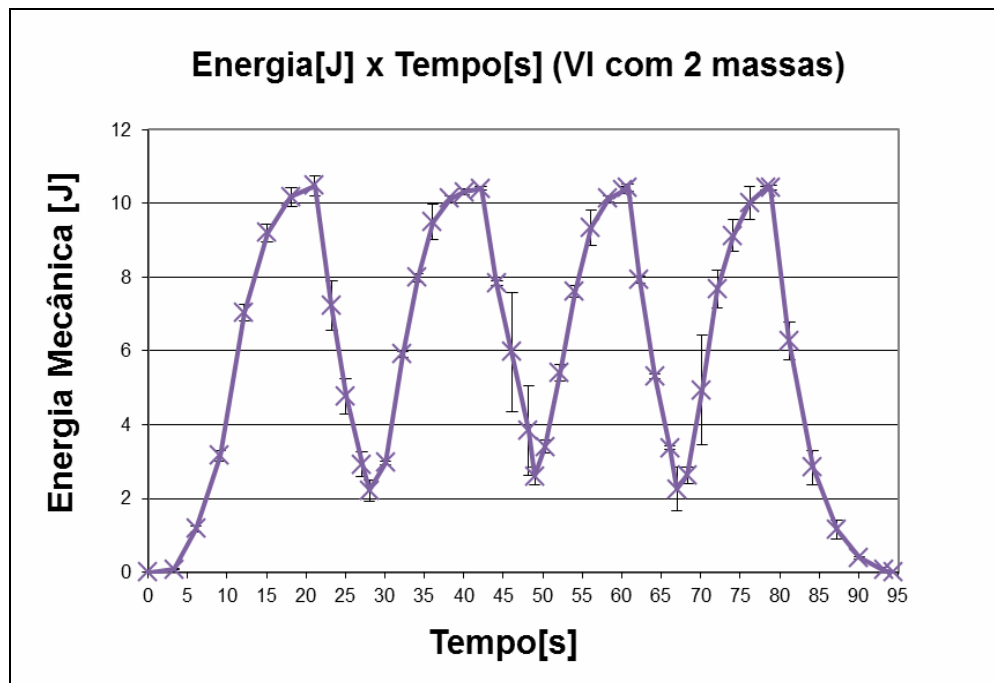


Figura 5.6. Variação de energia mecânica para um volante de inércia com duas massas.

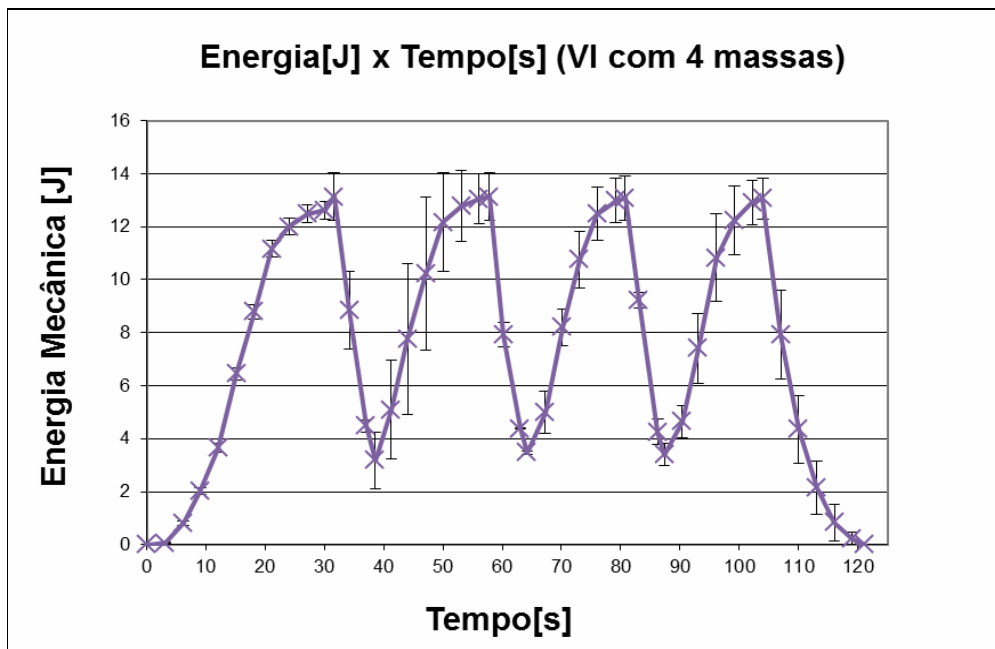


Figura 5.7. Variação de energia mecânica para um volante de inércia com quatro massas.

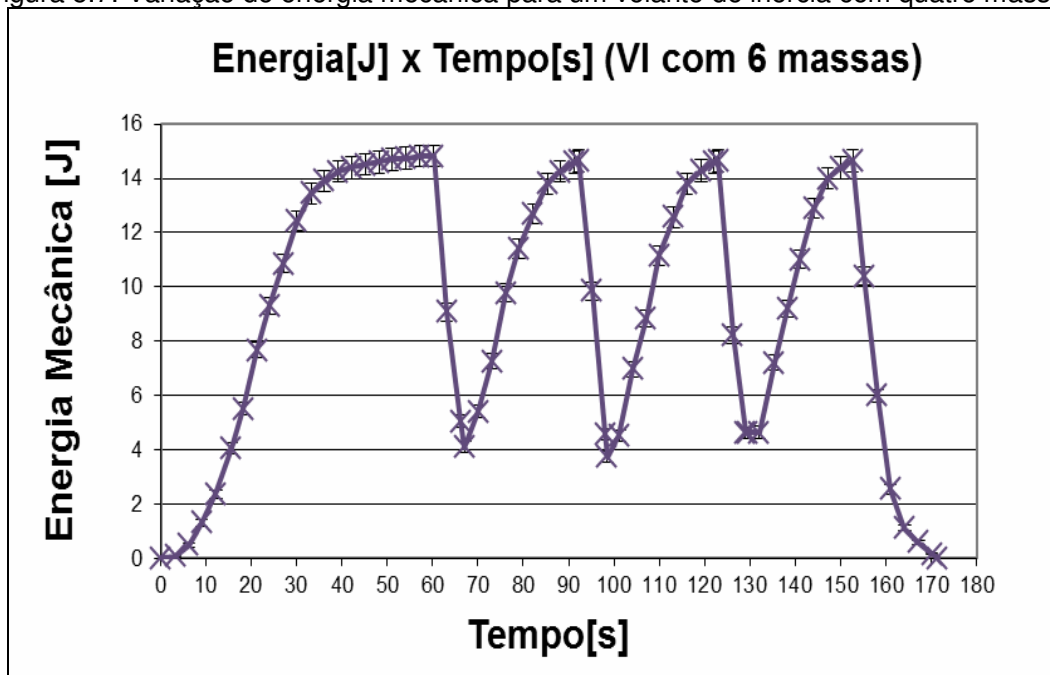


Figura 5.8. Variação de energia mecânica para um volante de inércia com seis massas.

As Figuras 5.6, 5.7, 5.8 representam da mesma forma a variação de energia mecânica para o sistema intermitente, mas nestes casos observou-se que as curvas de ascensão se apresentaram de uma forma mais suave (menos inclinadas) a medida que foram aumentadas as inércias do volante de inércia, representando assim um maior esforço desempenhado pelo motor para o ganho de velocidade. Equivalentemente, isto representa uma maior potência consumida conforme suas inércias foram aumentadas. Nota-se que para os intervalos de desligamento do motor, as curvas descendentes continuaram mantendo um comportamento semelhante ao de um volante de inércia sem massas, ou seja, a energia mecânica devolvida ao sistema permaneceu sendo menor que a consumida.

A título de exemplo, procurou-se verificar a possibilidade de se obter um ganho de energia mecânica devolvida pelo sistema maior que o consumo de energia efetuada pelo mesmo. Para facilitar a interpretação foi mostrado através de gráficos editados apenas no eixo relacionado ao tempo como ficaria o comportamento da energia mecânica, Figura 5.9:

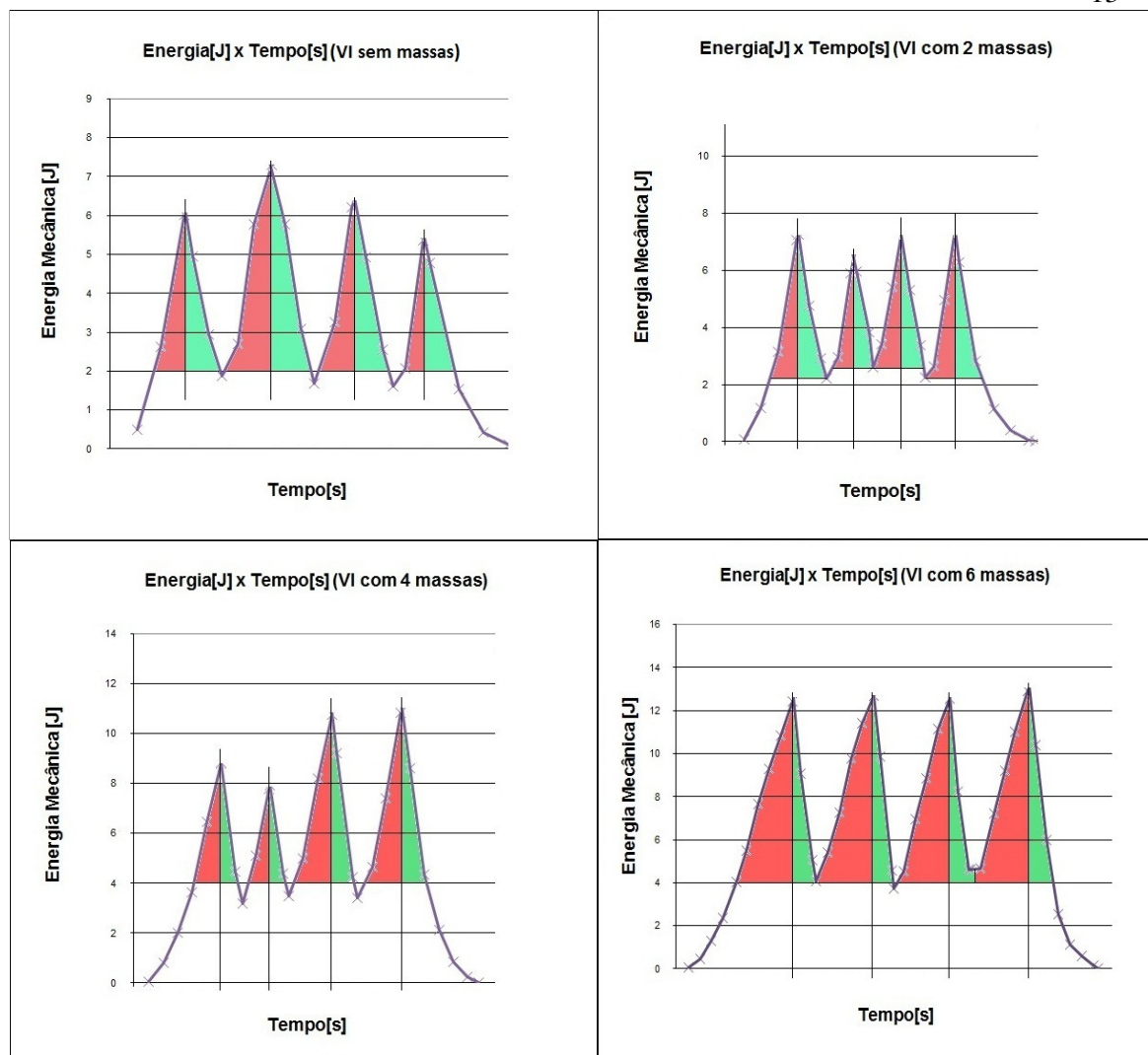


Figura 5.9. Representação de gráficos para bons intervalos de tempo quanto à relação de gasto por ganho de energia mecânica.

Para os gráficos representados na Figura 5.9, a área vermelha representa a parcela de potência referente ao gasto de energia e a área verde referente à parcela de ganho ou devolução de energia mecânica fornecida pelo sistema. Dessa forma, é possível notar que para o volante de inércia sem massas, o ganho de energia foi maior que o gasto de energia ao serem feitas as edições das curvas. De forma análoga, o volante de inércia com duas massas apresentou comportamento parecido, mostrando que se o sistema não está devolvendo mais energia que efetivamente foi gasta, pelo menos está devolvendo uma quantidade equivalente ao consumido. Para os casos de volante de inércia com quatro e seis massas, o consumo apresentado foi notavelmente maior que a energia devolvida pelo sistema.

6. CONCLUSÕES

Segundo os gráficos apresentados para um sistema funcionando de forma intermitente de acordo com as Figuras 5.5, 5.6, 5.7, e 5.8, percebe-se uma diferença em relação ao estudo feito para os casos em que o motor foi ligado até alcançar seu limite de rotação (Figura 5.4 e Apêndice III) e só então desligado para se medir energia mecânica devolvida pelo sistema. Observa-se que o consumo de potência ao ligar-se o motor, representado pela área sob a curva ascendente, é grande e demanda tempo não sendo assim favorável para aplicações que tenham por função uma relação de consumo por ganho energético. Isto ocorreu para todas inércias aplicadas ao volante.

Por outro lado, tratando-se de um sistema intermitente, percebeu-se um consumo menor quando comparado ao caso em que o volante permaneceu ligado por mais tempo. Para as análises feitas a respeito do volante de inércia sem massas e com duas massas, ajustando os níveis de rotação do motor e variando o tempo para efetuar os desligamentos e ligamentos do mesmo, o aproveitamento de energia pode ser considerado positivo pelo teste comparativo de consumo por ganho de energia segundo a Figura 5.9, e na pior das hipóteses, o gasto de energia ficou equivalente ao ganho. Todavia, mesmo para o estudo de sistemas intermitentes, quando analisado o volante de inércia com quatro e seis massas, mesmo tentando se fazer um ajuste, observou-se que a parcela de energia representada pela curva ascendente permaneceu maior que o ganho de energia representado pela curva descendente.

A partir disso, pode-se concluir que para casos em que a inércia do volante é mais alta do que o suposto pelo volante com duas massas, a relação energética no que diz respeito ao consumo de energia pelo ganho não é proveitosa. Isto acontece pelo fato de o rendimento do motor ser baixo e o mesmo não ter torque para alcançar níveis mais elevados de rotação em um curto período de tempo, fazendo com que a potência gasta seja alta. Atrelado a esse baixo rendimento, está o fato de o motor apresentar folgas em seus mancais.

Para futuras pesquisas, sugere-se um trabalho com curvas de potência do motor para fazer uma comparação energética a nível de consumo de energia elétrica em relação ao ganho de energia mecânica fornecido pelo volante de inércia. Outra ideia seria avaliar e definir os níveis de rotação para equiparar ou fazer superior o ganho de energia mecânica fornecido pelo volante de inércia em relação à energia consumida pelo mesmo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Beer, F.P; Johnston, E.R; Clausen, W.E.; **“Mecânica Vetorial para Engenheiros: Dinâmica”**, Mcgraw-Hill, 7ª edição, 2006.

Hibbeler, R.C.; **“Dinâmica: Mecânica para Engenharia”**, Pearson Prentice Hall, 10ª edição, 2005.

Khurmi, R.S.; Gupta J.K.; **“Theory of Machines”**, S.Chand and Company Ltd., 14th edition, 2006.

Meriam, J.L.; Kraige, L.G.; **“Mecânica Dinâmica”**, LTC, 5ª edição, 2004.

Munhoz, R.; **“Entenda como funciona o KERS”**, obtido em URL: <http://racing.terra.com.br/index.asp?codc=1343> , acessado em 28 de setembro de 2010.

Norton, R. L.; **“Design of Machinery : an Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines”**, McGraw-Hill Higher Education, 4th edition, 2008.

Shames, I. H.; **“Dinâmica – Mecânica para Engenharia”**, Pearson Prentice Hall, 4ª edição, 2003.

Shigley, J.E; Mischke,C.R.; **“Mechanical Engineering Design”**, McGraw-Hill, 6th edition, 2001.

Taylor, J.R.; **“An Introduction to Error Analysis: ‘The Study of Uncertainties in Physical Measurements’”**, University Science Books, 1st edition, 1997.

APÊNDICE I

As Tabelas 1 a 4 referem-se à aquisição dos dados experimentais incluindo o cálculo de desvio para o número de rotações e para a velocidade angular.

Tabela 1. Valores obtidos para o estudo do volante de inércia sem massas acopladas com o cálculo do desvio da velocidade angular.

1ª Tomada de valores para VI sem massas acopladas						MÉDIA		Desvio de N (RPM)	w (rad/s)	Desvio de w (rad/s)
t (s)	N (RPM)	t (s)	N (RPM)	t (s)	N (RPM)	t (s)	N (RPM)			
0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00
3,05	261,9	3,19	268,8	3,15	212,0	3,13	247,6	23,7	25,93	2,48
6,05	897,1	6,09	770,9	6,00	989,8	6,05	885,9	76,7	92,77	8,03
9,05	1332,0	9,09	1267,0	9,00	1404,0	9,05	1334,3	46,4	139,73	4,86
12,05	1581,0	12,05	1565,0	12,05	1582,0	12,05	1576,0	7,3	165,04	0,77
15,09	1580,0	15,03	1588,0	15,13	1594,0	15,08	1587,3	4,9	166,23	0,51
18,15	1586,0	18,05	1592,0	17,97	1599,0	18,06	1592,3	4,4	166,75	0,47
21,00	1589,0	21,15	1596,0	21,05	1602,0	21,07	1595,7	4,4	167,10	0,47
24,05	1592,0	24,15	1598,0	24,05	1603,0	24,08	1597,7	3,8	167,31	0,40
27,05	1596,0	27,07	1601,0	27,03	1605,0	27,05	1600,7	3,1	167,62	0,33
30,19	1597,0	30,05	1602,0	30,13	1606,0	30,12	1601,7	3,1	167,73	0,33
33,19	1600,0	33,05	1603,0	33,09	1607,0	33,11	1603,3	2,4	167,90	0,26
36,14	1609,0	36,25	1604,0	36,00	1609,0	36,13	1607,3	2,2	168,32	0,23
39,19	1606,0	39,03	1604,0	38,96	1610,0	39,06	1606,7	2,2	168,25	0,23
42,05	1610,0	42,05	1607,0	42,00	1611,0	42,03	1609,3	1,6	168,53	0,16
45,05	1613,0	45,05	1608,0	45,05	1614,0	45,05	1611,7	2,4	168,77	0,26
48,13	1613,0	48,09	1610,0	48,03	1616,0	48,08	1613,0	2,0	168,91	0,21
51,19	1615,0	51,00	1611,0	51,03	1617,0	51,07	1614,3	2,2	169,05	0,23
54,19	1616,0	54,05	1613,0	54,05	1618,0	54,10	1615,7	1,8	169,19	0,19
57,15	1607,0	57,15	1613,0	57,05	1618,0	57,12	1612,7	3,8	168,88	0,40
60,20	1605,0	60,18	1604,0	60,14	1618,0	60,17	1609,0	6,0	168,49	0,63
63,00	1149,0	63,05	1202,0	63,25	1126,0	63,10	1159,0	28,7	121,37	3,00
66,05	698,0	66,05	764,1	66,09	702,1	66,06	721,4	28,5	75,54	2,98
69,09	344,0	69,13	291,8	69,05	342,7	69,09	326,2	22,9	34,16	2,40
72,09	132,4	72,08	189,9	72,17	134,0	72,11	152,1	25,2	15,93	2,64
72,51	0,0	72,65	0,0	72,65	0,0	72,60	0,0	0,0	0,00	0,00

Tabela 2. Valores obtidos para o estudo do volante de inércia com duas massas acopladas com o cálculo do desvio da velocidade angular.

1ª Tomada de valores para VI com 2 massas acopladas				MÉDIA		Desvio de N (RPM)	w (rad/s)	Desvio de w (rad/s)		
t (s)	N (RPM)	t (s)	N (RPM)	t (s)	N (RPM)					
0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00		
3,05	223,2	3,19	152,1	3,12	188,6	3,12	188,0	23,9	19,68	2,50
6,13	579,2	6,03	512,2	6,15	557,2	6,10	549,5	24,9	57,55	2,61
9,13	890,0	9,03	815,9	9,06	871,9	9,07	859,3	28,9	89,98	3,03
12,19	1268,0	11,96	1188,0	12,03	1171,0	12,06	1209,0	39,3	126,61	4,12
15,13	1438,0	15,15	1382,0	15,05	1429,0	15,11	1416,3	22,9	148,32	2,40
18,19	1518,0	18,05	1490,0	17,98	1501,0	18,07	1503,0	10,0	157,39	1,05
21,05	1529,0	21,06	1517,0	21,13	1529,0	21,08	1525,0	5,3	159,70	0,56
24,00	1535,0	24,13	1530,0	24,13	1537,0	24,09	1534,0	2,7	160,64	0,28
27,05	1539,0	27,05	1535,0	27,03	1543,0	27,04	1539,0	2,7	161,16	0,28
30,05	1543,0	30,03	1541,0	30,05	1547,0	30,04	1543,7	2,2	161,65	0,23
33,05	1544,0	33,03	1542,0	33,03	1551,0	33,04	1545,7	3,6	161,86	0,37
36,12	1547,0	36,12	1545,0	36,19	1555,0	36,14	1549,0	4,0	162,21	0,42
39,21	1550,0	39,06	1543,0	39,12	1558,0	39,13	1550,3	5,1	162,35	0,54
42,05	1552,0	42,12	1552,0	42,03	1560,0	42,07	1554,7	3,6	162,80	0,37
45,03	1555,0	45,05	1556,0	45,12	1563,0	45,07	1558,0	3,3	163,15	0,35
48,12	1561,0	47,97	1559,0	48,12	1565,0	48,07	1561,7	2,2	163,54	0,23
51,15	1566,0	51,05	1562,0	51,13	1567,0	51,11	1565,0	2,0	163,89	0,21
54,15	1567,0	54,05	1564,0	54,05	1571,0	54,08	1567,3	2,4	164,13	0,26
57,08	1567,0	57,16	1557,0	57,13	1571,0	57,12	1565,0	5,3	163,89	0,56
60,22	1568,0	60,15	1558,0	60,06	1568,0	60,14	1564,7	4,4	163,85	0,47
63,13	1156,0	63,05	1162,0	62,97	1269,0	63,05	1195,7	48,9	125,21	5,12
66,13	792,2	66,05	792,8	66,09	786,3	66,09	790,4	2,8	82,77	0,29
69,05	486,4	68,99	490,7	69,13	489,3	69,06	488,8	1,6	51,19	0,17
72,05	219,8	72,03	221,1	72,09	223,6	72,06	221,5	1,4	23,20	0,15
75,12	61,7	75,13	150,5	75,15	141,0	75,13	117,7	37,4	12,33	3,91
75,18	0,0	75,33	0,0	75,43	0,0	75,31	0,0	0,0	0,00	0,00

Tabela 3. Valores obtidos para o estudo do volante de inércia com quatro massas acopladas com o cálculo do desvio da velocidade angular.

1ª Tomada de valores para VI com 4 massas acopladas				MÉDIA		Desvio de N (RPM)	w (rad/s)	Desvio de w (rad/s)		
t (s)	N (RPM)	t (s)	N (RPM)	t (s)	N (RPM)					
0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00		
3,55	178,5	3,09	141,1	3,13	101,5	3,26	140,4	25,9	14,70	2,71
5,96	359,0	6,55	418,4	6,25	405,2	6,25	394,2	23,5	41,28	2,46
9,12	575,6	9,13	632,8	9,00	637,0	9,08	615,1	26,4	64,42	2,76
12,13	771,7	12,05	821,4	12,00	847,9	12,06	813,7	28,0	85,21	2,93
15,05	1009,0	15,03	1005,0	15,25	1105,0	15,11	1039,7	43,6	108,87	4,56
18,09	1171,0	18,05	1228,0	18,12	1277,0	18,09	1225,3	36,2	128,32	3,79
21,06	1341,0	21,13	1342,0	21,17	1400,0	21,12	1361,0	26,0	142,52	2,72
24,21	1399,0	24,13	1415,0	24,03	1439,0	24,12	1417,7	14,2	148,46	1,49
27,05	1437,0	27,05	1440,0	27,00	1458,0	27,03	1445,0	8,7	151,32	0,91
30,05	1448,0	30,05	1454,0	29,96	1470,0	30,02	1457,3	8,4	152,61	0,88
33,13	1455,0	33,31	1462,0	33,12	1477,0	33,19	1464,7	8,2	153,38	0,86
36,15	1458,0	35,96	1468,0	36,03	1478,0	36,05	1468,0	6,7	153,73	0,70
39,15	1460,0	39,05	1471,0	39,05	1479,0	39,08	1470,0	6,7	153,94	0,70
42,12	1462,0	42,19	1475,0	42,05	1479,0	42,12	1472,0	6,7	154,15	0,70
45,15	1466,0	45,06	1479,0	45,12	1483,0	45,11	1476,0	6,7	154,57	0,70
48,05	1467,0	48,00	1481,0	48,19	1486,0	48,08	1478,0	7,3	154,78	0,77
51,13	1465,0	51,19	1486,0	51,12	1490,0	51,15	1480,3	10,2	155,02	1,07
54,19	1467,0	54,13	1487,0	54,05	1493,0	54,12	1482,3	10,2	155,23	1,07
57,19	1472,0	57,05	1488,0	57,05	1495,0	57,10	1485,0	8,7	155,51	0,91
60,08	1478,0	60,21	1489,0	60,07	1498,0	60,12	1488,3	6,9	155,86	0,72
63,12	1131,0	63,19	1143,0	62,96	1200,0	63,09	1158,0	28,0	121,27	2,93
66,09	813,6	66,09	823,4	65,15	984,2	65,78	873,7	73,6	91,50	7,71
69,09	532,7	69,05	542,3	68,03	682,4	68,72	585,8	64,4	61,34	6,74
72,06	299,9	72,05	301,9	71,05	359,4	71,72	320,4	26,0	33,55	2,72
75,12	149,8	74,96	145,4	74,05	227,4	74,71	174,2	35,5	18,24	3,71
76,71	0,0	77,07	0,0	77,25	81,1	77,01	27,0	36,0	2,83	3,77
				77,50	0,0	77,50	0,0	0,0	0,00	0,00

Tabela 4. Valores obtidos para o estudo do volante de inércia com seis massas acopladas com o cálculo do desvio da velocidade angular.

1ª Tomada de valores para VI com 6 massas acopladas				MÉDIA		Desvio de N (RPM)	w (rad/s)	Desvio de w (rad/s)
t(s)	w (RPM)	t(s)	w (RPM)	t(s)	N (RPM)			
0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00
2,97	119,7	3,13	151,4	3,17	114,8	3,09	13,47	1,59
6,21	341,6	6,21	285,8	6,00	271,1	6,14	31,36	2,94
9,75	520,3	9,09	455,1	9,25	449,1	9,36	49,72	3,17
12,19	675,2	12,31	644,0	12,13	597,5	12,21	66,91	2,89
15,13	819,9	15,15	769,5	15,25	728,1	15,18	80,90	3,31
18,19	957,1	18,09	888,1	18,15	890,7	18,14	95,50	3,15
21,21	1118,0	21,31	1036,0	21,05	1010,0	21,19	110,44	4,42
24,25	1236,0	24,03	1134,0	24,13	1111,0	24,14	121,51	5,28
27,05	1331,0	27,19	1235,0	27,05	1244,0	27,10	132,99	4,26
30,00	1367,0	30,05	1309,0	30,09	1305,0	30,05	138,96	2,79
33,25	1396,0	33,15	1348,0	33,19	1342,0	33,20	142,63	2,37
36,05	1408,0	36,09	1360,0	36,07	1360,0	36,07	144,09	2,23
39,13	1425,0	39,03	1374,0	39,09	1379,0	39,08	145,84	2,26
42,25	1433,0	42,05	1389,0	42,03	1390,0	42,11	147,03	2,02
45,06	1436,0	45,15	1398,0	45,05	1401,0	45,09	147,83	1,70
48,15	1441,0	48,15	1406,0	48,03	1406,0	48,11	148,46	1,63
51,25	1443,0	51,04	1409,0	51,03	1412,0	51,11	148,84	1,51
54,05	1443,0	54,03	1413,0	54,19	1419,0	54,09	149,23	1,26
57,09	1447,0	57,47	1420,0	57,05	1425,0	57,20	149,82	1,14
60,25	1447,0	60,15	1421,0	60,06	1430,0	60,15	150,03	1,00
63,45	1141,0	63,31	1116,0	63,13	1155,0	63,30	119,10	1,49
65,95	864,7	66,05	831,8	66,15	785,5	66,05	86,64	2,92
68,13	688,6	69,03	583,7	69,12	529,6	68,76	62,90	6,14
71,21	458,0	72,25	374,3	72,15	318,8	71,87	40,18	5,19
74,15	255,5	75,03	178,1	75,15	193,2	74,78	21,88	3,25
77,31	142,7	78,08	117,9	78,09	137,3	77,83	13,89	1,03
79,33	0,0	78,43	0,0	78,35	0,0	78,70	0,00	0,00

APÊNDICE II

As Tabelas 1 a 3 mostram os dados referentes ao cálculo de energia mecânica do sistema e seu desvio em função do tempo.

Tabela 1. Volante de inércia com duas massas.

VI com 2 massas		
t (s)	Em do Sistema (J)	ΔEm (J)
	$Em = 1/2.I.w^2$	
0,00	0,000	0,000
3,12	0,156	0,079
6,10	1,329	0,241
9,07	3,250	0,438
12,06	6,434	0,838
15,11	8,831	0,573
18,07	9,944	0,270
21,08	10,238	0,153
24,09	10,359	0,090
27,04	10,426	0,091
30,04	10,490	0,082
33,04	10,517	0,112
36,14	10,562	0,123
39,13	10,581	0,150
42,07	10,640	0,112
45,07	10,685	0,107
48,07	10,736	0,083
51,11	10,782	0,079
54,08	10,814	0,088
57,12	10,782	0,158
60,14	10,777	0,135
63,05	6,293	1,030
66,09	2,750	0,041
69,06	1,052	0,015
72,06	0,216	0,006
75,13	0,061	0,077
75,31	0,000	0,000

Tabela 2. Volante de inércia com quatro massas.

VI com 4 massas		
t (s)	Em do Sistema (J)	ΔEm (J)
	$Em = 1/2.I.w^2$	
0,00	0,000	0,000
3,26	0,116	0,086
6,25	0,913	0,218
9,08	2,224	0,381
12,06	3,891	0,535
15,11	6,353	1,065
18,09	8,825	1,044
21,12	10,887	0,833
24,12	11,812	0,477
27,03	12,272	0,299
30,02	12,483	0,294
33,19	12,609	0,288
36,05	12,666	0,236
39,08	12,701	0,236
42,12	12,735	0,237
45,11	12,804	0,237
48,08	12,839	0,260
51,15	12,880	0,360
54,12	12,915	0,360
57,10	12,961	0,307
60,12	13,019	0,247
63,09	7,881	0,763
65,78	4,487	1,513
68,72	2,017	0,887
71,72	0,603	0,196
74,71	0,178	0,145
77,01	0,004	0,023
77,50	0,000	0,000

Tabela 3. Volante de inércia com seis massas.

VI com 6 massas		
t (s)	Em do Sistema (J)	ΔEm (J)
	$Em = 1/2.I.w^2$	
0,00	0,000	0,000
3,09	0,120	0,057
6,14	0,652	0,244
9,36	1,639	0,418
12,21	2,967	0,513
15,18	4,338	0,710
18,14	6,045	0,798
21,19	8,085	1,295
24,14	9,786	1,702
27,10	11,723	1,502
30,05	12,799	1,030
33,20	13,484	0,899
36,07	13,762	0,855
39,08	14,098	0,874
42,11	14,328	0,791
45,09	14,485	0,668
48,11	14,608	0,643
51,11	14,684	0,599
54,09	14,760	0,500
57,20	14,877	0,456
60,15	14,919	0,401
63,30	9,402	0,471
66,05	4,975	0,671
68,76	2,622	1,024
71,87	1,070	0,553
74,78	0,317	0,189
77,83	0,128	0,038
78,70	0,000	0,000

APÊNDICE III

As Figuras 1 a 3 referem-se ao comportamento de variação de energia mecânica em função do tempo para os casos de volante de inércia com duas, quatro e seis massas.

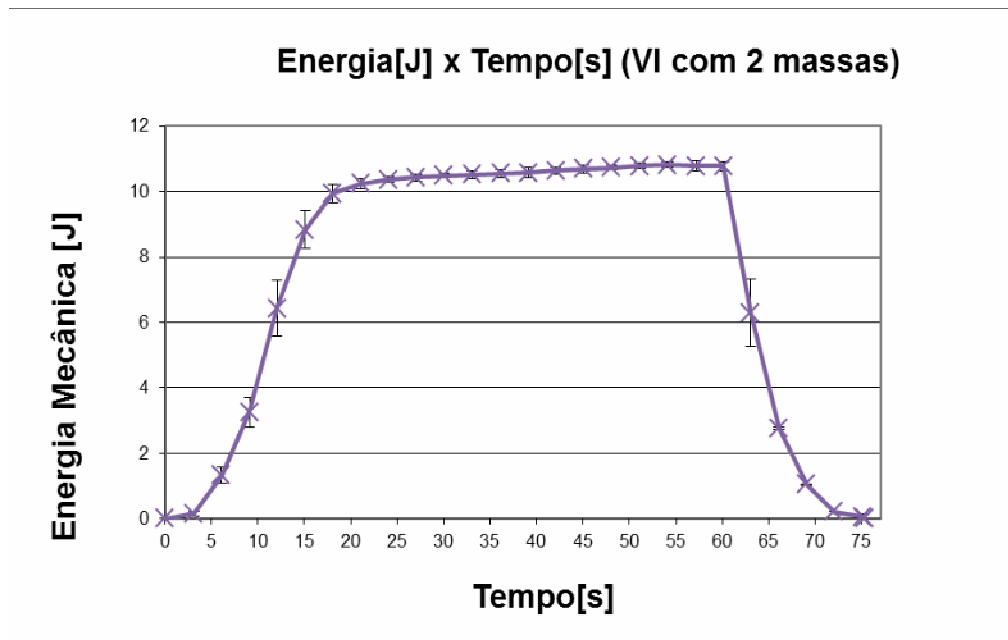


Figura 1. Variação de energia mecânica para um volante de inércia com 2 massas.

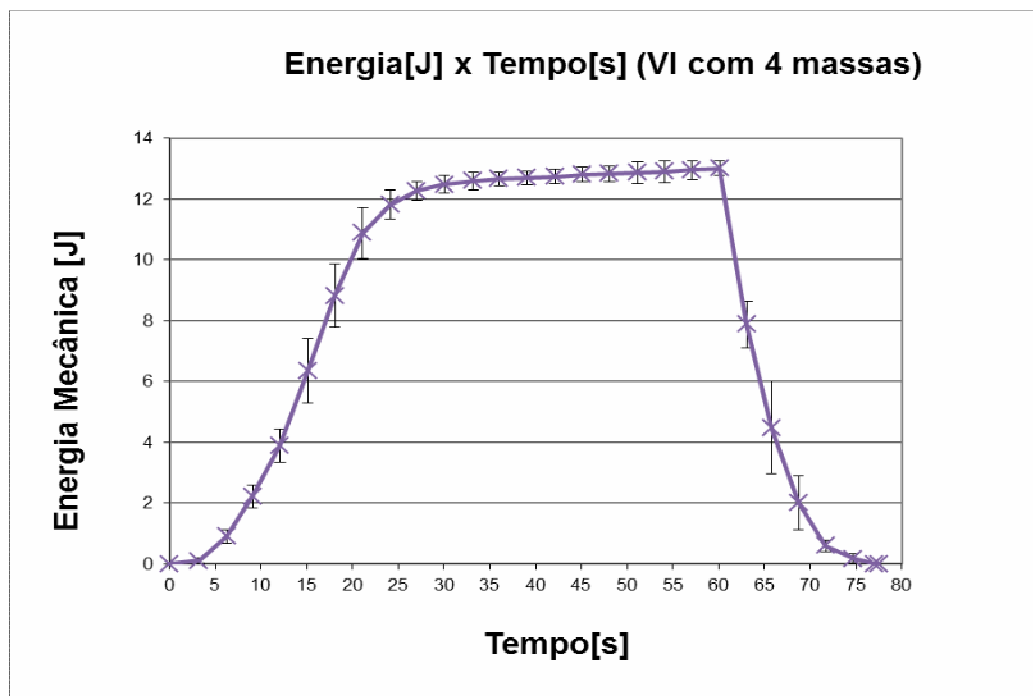


Figura 2. Variação de energia mecânica para um volante de inércia com 4 massas.

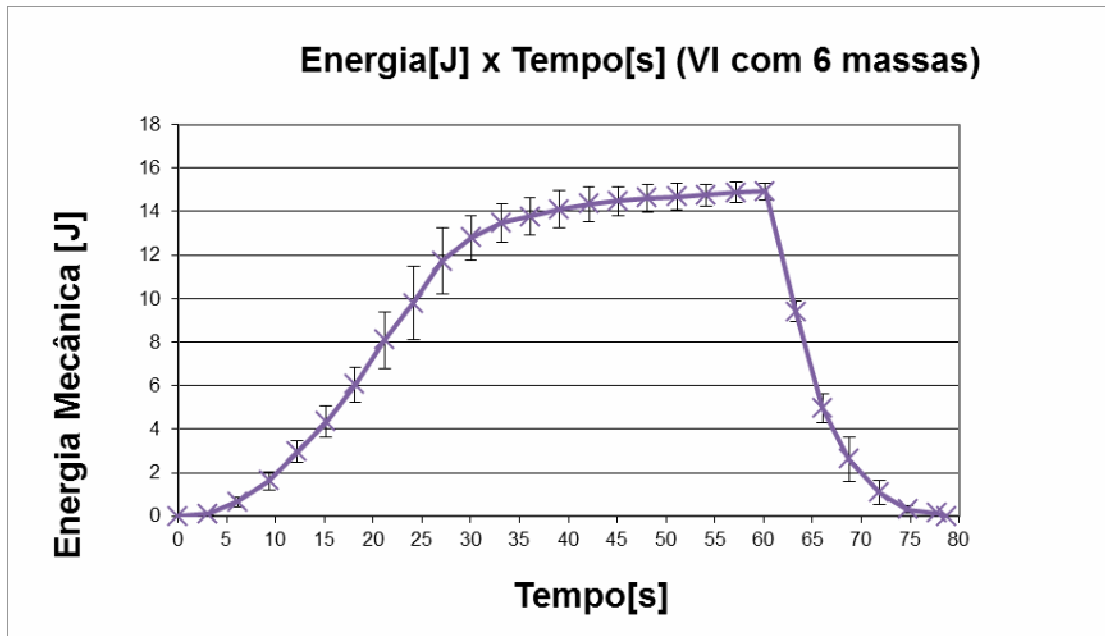


Figura 3. Variação de energia mecânica para um volante de inércia com 6 massas.

APÊNDICE IV

As Tabelas 1 a 4 referem-se à aquisição dos dados experimentais para o sistema estudado de forma intermitente, incluindo o cálculo de desvio para o número de rotações e para a velocidade angular.

Tabela 1. Valores obtidos para o estudo do volante de inércia sem massas acopladas com o cálculo do desvio da velocidade angular para o sistema intermitente.

2ª Tomada de valores para VI sem massas		MÉDIA				Desvio de N (RPM)	w (rad/s)	Desvio de w (rad/s)
t (s)	N (RPM)	t (s)	N (RPM)	t (s)	N (RPM)			
0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00
3,25	404,6	3,25	404,6	3,25	404,6	0,0	42,37	0,00
6,15	940,6	6,15	940,6	6,15	940,6	0,0	98,50	0,00
9,00	1423,0	9,00	1423,0	9,00	1423,0	0,0	149,02	0,00
12,13	1590,0	12,13	1616,0	12,13	1603,0	13,0	167,87	1,36
14,25	1252,0	14,01	1331,0	14,13	1291,5	39,5	135,25	4,14
16,13	958,4	15,93	1032,0	16,03	995,2	36,8	104,22	3,85
17,25	823,7	18,07	762,1	17,7	792,9	30,8	83,03	3,23
19,15	1019,0	20,07	889,9	19,61	954,5	64,6	99,95	6,76
21,05	1367,0	22,00	1423,0	21,53	1395,0	28,0	146,08	2,93
23,25	1577,0	23,93	1560,0	23,59	1568,5	8,5	164,25	0,89
24,34	1592,0	25,93	1594,0	25,14	1593,0	1,0	166,82	0,10
26,15	1449,0	28,07	1338,0	27,11	1393,5	55,5	145,93	5,81
28,19	994,2	29,84	1042,0	29,02	1018,1	23,9	106,62	2,50
29,76	724,4	31,53	776,4	30,6	750,4	26,0	78,58	2,72
32,03	983,9	34,13	1110,0	33,08	1047,0	63,1	109,64	6,60
34,25	1466,0	35,97	1429,0	35,11	1447,5	18,5	151,58	1,94
36,19	1575,0	38,22	1584,0	37,21	1579,5	4,5	165,40	0,47
38,05	1598,0	39,47	1594,0	38,76	1596,0	2,0	167,13	0,21
40,13	1285,0	42,07	1293,0	41,10	1289,0	4,0	134,98	0,42
42,05	1000,0	44,22	856,6	43,14	928,3	71,7	97,21	7,51
43,75	730,9	45,06	743,8	44,40	737,4	6,4	77,22	0,68
46,15	930,2	45,67	743,8	45,91	837,0	93,2	87,65	9,76
48,18	1440,0	47,91	1249,0	48,05	1344,5	95,5	140,80	10,00
50,48	1570,0	50,13	1555,0	50,31	1562,5	7,5	163,62	0,79
51,65	1600,0	51,93	1595,0	51,79	1597,5	2,5	167,29	0,26
54,25	1246,0	54,97	1293,0	54,61	1269,5	23,5	132,94	2,46
58,09	707,3	58,01	733,4	58,05	720,4	13,1	75,43	1,37
61,08	379,8	61,06	385,3	61,07	382,6	2,8	40,06	0,29
64,18	188,4	64,07	191,9	64,13	190,2	1,8	19,91	0,18
65,05	0,0	65,53	0,0	65,29	0,0	0,0	0,00	0,00

Tabela 2. Valores obtidos para o estudo do volante de inércia com 2 massas acopladas com o cálculo do desvio da velocidade angular para o sistema intermitente.

2ª Tomada de valores para VI com 2 massas				MÉDIA		Desvio de N (RPM)	w (rad/s)	Desvio de w (rad/s)
t (s)	N (RPM)	t (s)	N (RPM)	t (s)	N (RPM)			
0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00
3,31	127,3	3,31	127,3	3,31	127,3	0,0	13,33	1,00
6,09	516,5	6,09	516,5	6,09	516,5	0,0	54,09	1,00
9,12	846,8	9,12	846,8	9,12	846,8	0,0	88,68	1,00
12,19	1265,0	12,19	1265,0	12,19	1265,0	0,0	132,47	1,00
15,09	1446,0	15,09	1446,0	15,09	1446,0	0,0	151,42	1,00
18,12	1521,0	18,12	1521,0	18,12	1521,0	0,0	159,28	1,00
21,12	1534,0	21,12	1553,0	21,12	1543,5	9,5	161,63	0,99
23,25	1253,0	23,25	1312,0	23,25	1282,5	29,5	134,30	3,09
25,05	1015,0	25,05	1068,0	25,05	1041,5	26,5	109,07	2,78
27,09	792,7	27,09	838,4	27,09	815,6	22,9	85,40	2,39
28,05	686,4	28,05	732,7	28,05	709,6	23,2	74,30	2,42
30,12	823,7	30,12	816,8	30,12	820,3	3,5	85,90	0,36
32,25	1155,0	32,25	1162,0	32,25	1158,5	3,5	121,32	0,37
34,15	1343,0	34,15	1351,0	34,15	1347,0	4,0	141,06	0,42
36,05	1450,0	36,05	1487,0	36,05	1468,5	18,5	153,78	1,94
38,25	1515,0	38,25	1519,0	38,25	1517,0	2,0	158,86	0,21
40,05	1529,0	40,05	1533,0	40,05	1531,0	2,0	160,33	0,21
42,15	1537,0	42,15	1539,0	42,15	1538,0	1,0	161,06	0,10
44,19	1332,0	44,19	1337,0	44,19	1334,5	2,5	139,75	0,26
46,09	1086,0	46,09	1243,0	46,09	1164,5	78,5	121,95	8,22
48,19	858,4	48,19	1007,0	48,19	932,7	74,3	97,67	7,78
48,99	752,2	48,99	786,8	48,99	769,5	17,3	80,58	1,81
50,34	868,4	50,34	890,2	50,34	879,3	10,9	92,08	1,14
52,15	1097,0	52,15	1119,0	52,15	1108,0	11,0	116,03	1,15
54,06	1308,0	54,06	1321,0	54,06	1314,5	6,5	137,65	0,68
56,09	1439,0	56,09	1476,0	56,09	1457,5	18,5	152,63	1,94
58,29	1519,0	58,29	1515,0	58,29	1517,0	2,0	158,86	0,21
60,19	1537,0	60,19	1532,0	60,19	1534,5	2,5	160,69	0,26
60,74	1542,0	60,74	1537,0	60,74	1539,5	2,5	161,22	0,26
62,25	1338,0	62,25	1346,0	62,25	1342,0	4,0	140,53	0,42
64,19	1097,0	64,19	1103,0	64,19	1100,0	3,0	115,19	0,31
66,09	872,1	66,09	878,7	66,09	875,4	3,3	91,67	0,35
66,98	763,5	66,98	667,5	66,98	715,5	48,0	74,93	5,03
68,34	788,3	68,34	756,9	68,34	772,6	15,7	80,91	1,64
70,15	1139,0	70,15	980,4	70,15	1059,7	79,3	110,97	8,30
72,12	1342,0	72,12	1299,0	72,12	1320,5	21,5	138,28	2,25
74,13	1458,0	74,13	1423,0	74,13	1440,5	17,5	150,85	1,83
76,18	1525,0	76,18	1492,0	76,18	1508,5	16,5	157,97	1,73
78,25	1539,0	78,25	1538,0	78,25	1538,5	0,5	161,11	0,05
78,87	1539,0	78,87	1539,0	78,87	1539,0	0,0	161,16	0,00
81,21	1170,0	81,21	1219,0	81,21	1194,5	24,5	125,09	2,57
84,16	835,7	84,16	769,6	84,16	802,7	33,1	84,05	3,46
87,25	540,0	87,25	483,3	87,25	511,7	28,4	53,58	2,97
90,08	294,7	90,08	305,8	90,08	300,3	5,6	31,44	0,58
93,16	145,1	93,16	75,8	93,16	110,5	34,7	11,57	3,63
94,39	0,0	94,39	0,0	94,39	0,0	0,0	0,00	0,00

Tabela 3. Valores obtidos para o estudo do volante de inércia com 4 massas acopladas com o cálculo do desvio da velocidade angular para o sistema intermitente.

2ª Tomada de valores para VI com 4 massas				MÉDIA		Desvio de N (RPM)	w (rad/s)	Desvio de w (rad/s)
t (s)	N (RPM)	t (s)	N (RPM)	t (s)	N (RPM)			
0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00
3,09	99,6	3,09	99,6	3,09	99,6	0,0	10,43	1,00
6,18	375,1	6,18	375,1	6,18	375,1	0,0	39,28	1,00
9,03	585,5	9,03	585,5	9,03	585,5	0,0	61,31	1,00
12,05	788,3	12,05	788,3	12,05	788,3	0,0	82,55	1,00
15,12	1047,0	15,12	1047,0	15,12	1047,0	0,0	109,64	1,00
18,12	1223,0	18,12	1223,0	18,12	1223,0	0,0	128,07	1,00
21,15	1378,0	21,15	1378,0	21,15	1378,0	0,0	144,30	1,00
24,06	1429,0	24,06	1429,0	24,06	1429,0	0,0	149,64	1,00
27,09	1457,0	27,09	1457,0	27,09	1457,0	0,0	152,58	1,00
30,12	1466,0	30,12	1466,0	30,12	1466,0	0,0	153,52	1,00
31,59	1469,0	31,59	1521,0	31,59	1495,0	26,0	156,56	2,72
34,19	1175,0	34,19	1277,0	34,19	1226,0	51,0	128,39	5,34
37,05	862,5	37,05	884,1	37,05	873,3	10,8	91,45	1,13
38,58	674,3	38,58	796,1	38,58	735,2	60,9	76,99	6,38
41,25	846,8	41,25	1016,0	41,25	931,4	84,6	97,54	8,86
44,03	1044,0	44,03	1255,0	44,03	1149,5	105,5	120,38	11,05
47,12	1225,0	47,12	1412,0	47,12	1318,5	93,5	138,07	9,79
50,05	1384,0	50,05	1494,0	50,05	1439,0	55,0	150,69	5,76
53,09	1436,0	53,09	1513,0	53,09	1474,5	38,5	154,41	4,03
56,12	1463,0	56,12	1517,0	56,12	1490,0	27,0	156,03	2,83
57,84	1469,0	57,84	1520,0	57,84	1494,5	25,5	156,50	2,67
60,25	1178,0	60,25	1144,0	60,25	1161,0	17,0	121,58	1,78
63,03	863,5	63,03	862,0	63,03	862,8	0,8	90,35	0,08
64,21	765,9	64,21	772,2	64,21	769,1	3,2	80,53	0,33
67,21	958,4	67,21	884,6	67,21	921,5	36,9	96,50	3,86
70,18	1157,0	70,18	1207,0	70,18	1182,0	25,0	123,78	2,62
73,05	1319,0	73,05	1386,0	73,05	1352,5	33,5	141,63	3,51
76,06	1428,0	76,06	1487,0	76,06	1457,5	29,5	152,63	3,09
79,18	1463,0	79,18	1510,0	79,18	1486,5	23,5	155,67	2,46
80,69	1468,0	80,69	1516,0	80,69	1492,0	24,0	156,24	2,51
83,08	1242,0	83,08	1262,0	83,08	1252,0	10,0	131,11	1,05
86,25	826,8	86,25	874,2	86,25	850,5	23,7	89,06	2,48
87,37	736,3	87,37	785,2	87,37	760,8	24,5	79,67	2,56
90,38	859,8	90,38	918,5	90,38	889,2	29,4	93,11	3,07
93,05	1073,0	93,05	1172,0	93,05	1122,5	49,5	117,55	5,18
96,12	1305,0	96,12	1409,0	96,12	1357,0	52,0	142,10	5,45
99,19	1405,0	99,19	1481,0	99,19	1443,0	38,0	151,11	3,98
102,19	1459,0	102,19	1507,0	102,19	1483,0	24,0	155,30	2,51
103,96	1469,0	103,96	1513,0	103,96	1491,0	22,0	156,14	2,30
107,00	1099,0	107,00	1223,0	107	1161,0	62,0	121,58	6,49
110,05	798,1	110,05	923,9	110,05	861,0	62,9	90,16	6,59
113,05	531,1	113,05	672,9	113,05	602,0	70,9	63,04	7,42
116,06	300,4	116,06	456,4	116,06	378,4	78,0	39,63	8,17
119,00	149,9	119,00	247,4	119	198,7	48,8	20,80	5,11
121,21	0,0	121,21	0,0	121,21	0,0	0,0	0,00	0,00

Tabela 4. Valores obtidos para o estudo do volante de inércia com 6 massas acopladas com o cálculo do desvio da velocidade angular para o sistema intermitente.

2ª Tomada de valores para VI com 6 massas				MÉDIA		Desvio de N (RPM)	w (rad/s)	Desvio de w (rad/s)
t (s)	w (RPM)	t (s)	w (RPM)	t (s)	N (RPM)			
0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00
3,19	96,1	3,19	96,1	3,19	96,1	0,0	10,06	1,00
6,19	257,5	6,19	257,5	6,19	257,5	0,0	26,97	1,00
9,05	425,3	9,05	425,3	9,05	425,3	0,0	44,54	1,00
12,19	570,0	12,19	570,0	12,19	570,0	0,0	59,69	1,00
15,59	747,2	15,59	747,2	15,59	747,2	0,0	78,25	1,00
18,25	870,9	18,25	870,9	18,25	870,9	0,0	91,20	1,00
21,21	1027,0	21,21	1027,0	21,21	1027,0	0,0	107,55	1,00
24,09	1132,0	24,09	1132,0	24,09	1132,0	0,0	118,54	1,00
27,05	1222,0	27,05	1222,0	27,05	1222,0	0,0	127,97	1,00
30,05	1307,0	30,05	1307,0	30,05	1307,0	0,0	136,87	1,00
33,15	1360,0	33,15	1360,0	33,15	1360,0	0,0	142,42	1,00
36,05	1384,0	36,05	1384,0	36,05	1384,0	0,0	144,93	1,00
39,15	1400,0	39,15	1400,0	39,15	1400,0	0,0	146,61	1,00
42,12	1407,0	42,12	1407,0	42,12	1407,0	0,0	147,34	1,00
45,12	1413,0	45,12	1413,0	45,12	1413,0	0,0	147,97	1,00
48,13	1417,0	48,13	1417,0	48,13	1417,0	0,0	148,39	1,00
51,05	1422,0	51,05	1422,0	51,05	1422,0	0,0	148,91	1,00
54,09	1424,0	54,09	1424,0	54,09	1424,0	0,0	149,12	1,00
57,19	1428,0	57,19	1428,0	57,19	1428,0	0,0	149,54	1,00
60,18	1428,0	60,18	1428,0	60,18	1428,0	0,0	149,54	1,00
63,16	1117,0	63,16	1117,0	63,16	1117,0	0,0	116,97	1,00
66,19	833,0	66,19	833,0	66,19	833,0	0,0	87,23	1,00
67,09	749,9	67,09	749,9	67,09	749,9	0,0	78,53	1,00
70,12	861,9	70,12	861,9	70,12	861,9	0,0	90,26	1,00
73,19	999,6	73,19	999,6	73,19	999,6	0,0	104,68	1,00
76,19	1160,0	76,19	1160,0	76,19	1160,0	0,0	121,47	1,00
79,03	1252,0	79,03	1252,0	79,03	1252,0	0,0	131,11	1,00
82,19	1322,0	82,19	1322,0	82,19	1322,0	0,0	138,44	1,00
85,31	1378,0	85,31	1378,0	85,31	1378,0	0,0	144,30	1,00
88,13	1400,0	88,13	1400,0	88,13	1400,0	0,0	146,61	1,00
91,31	1417,0	91,31	1417,0	91,31	1417,0	0,0	148,39	1,00
92,21	1420,0	92,21	1420,0	92,21	1420,0	0,0	148,70	1,00
95,13	1164,0	95,13	1164,0	95,13	1164,0	0,0	121,89	1,00
98,05	793,5	98,05	793,5	98,05	793,5	0,0	83,10	1,00
98,55	716,9	98,55	716,9	98,55	716,9	0,0	75,07	1,00
101,2	788,5	101,2	788,5	101,19	788,5	0,0	82,57	1,00
104,2	978,9	104,2	978,9	104,15	978,9	0,0	102,51	1,00
107,1	1104,0	107,1	1104,0	107,05	1104,0	0,0	115,61	1,00
110	1239,0	110	1239,0	110,03	1239,0	0,0	129,75	1,00
113,2	1315,0	113,2	1315,0	113,19	1315,0	0,0	137,71	1,00
116,1	1378,0	116,1	1378,0	116,06	1378,0	0,0	144,30	1,00
119,3	1402,0	119,3	1402,0	119,25	1402,0	0,0	146,82	1,00
122,13	1417,0	122,13	1417,0	122,13	1417,0	0,0	148,39	1,00
123	1419,0	123	1419,0	123,04	1419,0	0,0	148,60	1,00
126,2	1064,0	126,2	1064,0	126,21	1064,0	0,0	111,42	1,00

129,1	797,6	129,1	797,6	129,07	797,6	0,0	83,52	1,00
129,4	797,6	129,4	797,6	129,43	797,6	0,0	83,52	1,00
132,1	798,8	132,1	798,8	132,09	798,8	0,0	83,65	1,00
135,5	995,2	135,5	995,2	135,45	995,2	0,0	104,22	1,00
138,3	1124,0	138,3	1124,0	138,34	1124,0	0,0	117,71	1,00
141	1231,0	141	1231,0	141,03	1231,0	0,0	128,91	1,00
144,1	1332,0	144,1	1332,0	144,13	1332,0	0,0	139,49	1,00
147,1	1387,0	147,1	1387,0	147,14	1387,0	0,0	145,25	1,00
150	1407,0	150	1407,0	150,03	1407,0	0,0	147,34	1,00
152,74	1420,0	152,74	1420,0	152,74	1420,0	0,0	148,70	1,00
155,25	1196,0	155,25	1196,0	155,25	1196,0	0,0	125,24	1,00
158,15	907,2	158,15	907,2	158,15	907,2	0,0	95,00	1,00
161,05	590,8	161,05	590,8	161,05	590,8	0,0	61,87	1,00
164,2	391,3	164,2	391,3	164,16	391,3	0,0	40,98	1,00
167,2	283,8	167,2	283,8	167,21	283,8	0,0	29,72	1,00
170,2	150,0	170,2	150,0	170,15	150,0	0,0	15,71	1,00
171,4	0,0	171,4	0,0	171,42	0,0	0,0	0,00	1,00

APÊNDICE V

As Tabelas 1 a 4 mostram os dados referentes à energia mecânica do sistema e seu desvio em função do tempo para o caso de sistemas intermitentes.

Tabela 1 e 2. Volante de inércia sem massas acopladas e volante de inércia com duas massas.

Tabela 1 - VI sem massas		
t (s)	$E_m = 1/2.I.\omega^2$ (J)	ΔE_m (J)
0,00	0,000	0,000
3,25	0,486	0,046
6,15	2,627	0,108
9,00	6,012	0,168
12,13	7,629	0,254
14,13	4,952	0,607
16,03	2,940	0,435
17,66	1,866	0,290
19,61	2,705	0,732
21,53	5,777	0,466
23,59	7,304	0,168
25,14	7,534	0,060
27,11	5,765	0,919
29,02	3,077	0,290
30,65	1,672	0,232
33,08	3,254	0,784
35,11	6,220	0,321
37,21	7,407	0,101
38,76	7,562	0,068
41,10	4,933	0,072
43,14	2,558	0,791
44,41	1,614	0,058
45,91	2,080	0,927
48,05	5,367	1,525
50,31	7,248	0,150
51,79	7,576	0,074
54,61	4,785	0,356
58,05	1,541	0,112
61,07	0,434	0,013
64,13	0,107	0,004
65,29	0,000	0,000

Tabela 2 - VI com 2 massas		
t (s)	$E_m = 1/2.I.\omega^2$ (J)	ΔE_m (J)
0,00	0,000	0,000
3,31	0,071	0,021
6,09	1,174	0,087
9,12	3,157	0,143
12,19	7,044	0,216
15,09	9,204	0,248
18,12	10,184	0,261
21,12	10,487	0,264
23,25	7,241	0,667
25,05	4,775	0,487
27,09	2,928	0,329
28,05	2,216	0,289
30,12	2,962	0,052
32,25	5,908	0,078
34,15	7,987	0,104
36,05	9,493	0,481
38,25	10,130	0,076
40,05	10,318	0,077
42,15	10,413	0,061
44,19	7,840	0,072
46,09	5,969	1,610
48,19	3,829	1,220
48,99	2,607	0,235
50,34	3,404	0,170
52,15	5,404	0,217
54,06	7,606	0,156
56,09	9,351	0,477
58,29	10,130	0,076
60,19	10,366	0,087
62,25	7,928	0,103
64,19	5,327	0,065
66,09	3,373	0,054
66,98	2,254	0,605
68,34	2,628	0,214
70,15	4,943	1,480
72,12	7,676	0,502
74,13	9,134	0,446
76,18	10,017	0,441
78,25	10,420	0,057
78,87	10,426	0,055
81,21	6,281	0,516
84,16	2,836	0,467
87,25	1,152	0,255
90,08	0,397	0,029
93,16	0,054	0,067
94,39	0,000	0,000

Tabela 3. Volante de inércia com quatro massas acopladas no caso de um sistema intermitente.

VI com 4 massas		
t (s)	Em do Sistema (J)	{Em (J)}
	$Em = 1/2.I.w^2$	
0,00	0,000	0,000
3,09	0,058	0,022
6,18	0,827	0,084
9,03	2,015	0,132
12,05	3,652	0,178
15,12	6,443	0,237
18,12	8,791	0,277
21,15	11,161	0,313
24,06	12,002	0,325
27,09	12,477	0,331
30,12	12,632	0,333
31,59	13,136	0,915
34,19	8,834	1,470
37,05	4,482	0,223
38,58	3,177	1,053
41,25	5,099	1,853
44,03	7,766	2,851
47,12	10,218	2,899
50,05	12,171	1,861
53,09	12,778	1,336
56,12	13,049	0,947
57,84	13,127	0,898
60,25	7,922	0,465
63,03	4,375	0,024
64,21	3,476	0,059
67,21	4,991	0,800
70,18	8,212	0,696
73,05	10,751	1,066
76,06	12,486	1,012
79,18	12,987	0,823
80,69	13,084	0,844
83,08	9,213	0,297
86,25	4,251	0,474
87,37	3,402	0,438
90,38	4,647	0,614
93,05	7,406	1,307
96,12	10,823	1,660
99,19	12,238	1,290
102,19	12,926	0,838
103,96	13,066	0,773
107,00	7,922	1,693
110,05	4,357	1,273
113,05	2,130	1,003
116,06	0,842	0,694
119,00	0,232	0,228
121,21	0,000	0,000

Tabela 4. Volante de inércia com seis massas acopladas no caso de um sistema intermitente.

VI com 6 massas			VI com 6 massas		
t (s)	Em do Sistema (J)	{Em (J)}	t (s)	Em do Sistema (J)	{Em (J)}
0,00	0,000	0,000	129,07	4,624	0,222
3,19	0,067	0,027	129,43	4,624	0,222
6,19	0,482	0,072	132,09	4,638	0,222
9,05	1,315	0,118	135,45	7,199	0,277
12,19	2,362	0,158	138,34	9,183	0,314
15,59	4,058	0,208	141,03	11,015	0,344
18,25	5,513	0,243	144,13	12,896	0,373
21,21	7,666	0,286	147,14	13,983	0,388
24,09	9,314	0,316	150,03	14,389	0,394
27,05	10,854	0,341	152,74	14,656	0,398
30,05	12,417	0,365	155,25	10,397	0,334
33,15	13,444	0,381	158,15	5,982	0,253
36,05	13,923	0,387	161,05	2,537	0,164
39,15	14,246	0,392	164,16	1,113	0,109
42,12	14,389	0,394	167,21	0,585	0,079
45,12	14,512	0,396	170,15	0,164	0,042
48,13	14,595	0,397	171,42	0,000	0,000
51,05	14,698	0,398			
54,09	14,739	0,399			
57,19	14,822	0,400			
60,18	14,822	0,400			
63,16	9,069	0,312			
66,19	5,044	0,232			
67,09	4,087	0,209			
70,12	5,400	0,240			
73,19	7,263	0,279			
76,19	9,781	0,324			
79,03	11,394	0,350			
82,19	12,703	0,370			
85,31	13,802	0,386			
88,13	14,246	0,392			
91,31	14,595	0,397			
92,21	14,656	0,398			
95,13	9,848	0,325			
98,05	4,577	0,221			
98,55	3,736	0,199			
101,19	4,519	0,219			
104,15	6,965	0,273			
107,05	8,859	0,308			
110,03	11,158	0,346			
113,19	12,569	0,368			
116,06	13,802	0,386			
119,25	14,287	0,392			
122,13	14,595	0,397			
123,04	14,636	0,397			
126,21	8,229	0,297			