



# ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DE UM VOLANTE DE INÉRCIA PARA APLICAÇÃO EM UM SISTEMA MECÂNICO DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA CINÉTICA (MKERS) EM UMA MOTOCICLETA ONROAD

Joyce Ingrid Venceslau de Souto<sup>1</sup>  
Renato Alexandre Costa de Santana<sup>2</sup>

## RESUMO

Um volante de inércia é um elemento de máquina utilizado há muito tempo, constituindo uma das primeiras formas existentes de se armazenar energia cinética. O presente artigo objetiva, a partir de um modelo inicial genérico, criar circunstâncias que condicionem melhoria de desempenho e de custo desse objeto de estudo, voltando seu desenvolvimento para um sistema mecânico de regeneração de energia cinética (MKERS) com aplicação em uma motocicleta *onroad*. Pensando nisso, o processo de otimização foi possível a partir do estudo aprofundado da teoria existente sobre o tema proposto, utilização de softwares CAD – Autodesk Inventor - para auxiliar no refino da geometria e, também, da análise de elementos finitos, que possibilitou a análise de tensão e a determinação do fator de segurança. Todo esse processo se constitui como otimização tendo em vista que ele não foi levado em consideração no desenvolvimento do modelo inicial e os resultados obtidos têm por finalidade auxiliar a construção desse componente e, futuramente, embasar o desenvolvimento dos demais componentes constituintes do sistema MKERS em questão.

**Palavras-chave:** Volante, Inércia, Energia, Recuperação.

## INTRODUÇÃO

Um volante de inércia basicamente é uma peça em formato cilíndrico vazado que é capaz de armazenar energia cinética através da restauração da quantidade de movimento angular. Sabe-se que, durante uma frenagem, há uma notória percentagem da energia presente nas rodas que é transformada em energia térmica e sonora. A função de um volante de inércia nesse tipo de aplicação é armazenar essa energia que seria perdida e restaurá-la ao motor, produzindo um torque momentâneo. (BROWN; CHVALA, 2005) As suas aplicações se estendem desde a roda Potter e a roca de fiar, objetos utilizados desde os tempos antigos, até os módulos de volante de inércia que constituem o KERS da *Flybrid* utilizado na Fórmula 1, sendo uma das formas mecânicas mais simples e, ao mesmo tempo, atuais de se armazenar energia e dar incremento de potência ao motor. (HEDLUND *et al.*, 2015) Atualmente, essa forma de armazenamento ganha espaço e notoriedade em pesquisas científicas em relação às demais, a exemplo das baterias de lítio, pelo fato de não poluir o meio ambiente, ser mais

---

<sup>1</sup> Graduanda do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, joyceingrid.cg@gmail.com;

<sup>2</sup> Professor orientador: Doutor, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, renatoacs@ufcg.edu.br.



barato e ter grande potencial com relação à eficiência e a redução do consumo de combustível. Seus modelos mais sofisticados são fabricados a partir de materiais compósitos com complexas especificações, com alta densidade de energia, possuem rolamentos magnéticos capazes de reduzir perdas energéticas advindas do funcionamento em altas rotações, dentre outros elementos que potencializam a eficiência dos volantes de inércia.

O momento de inércia de um volante de inércia, bem como sua energia armazenada, se relaciona com a sua massa e o quadrado dos raios da face circular do cilindro. Sendo assim, o processo de otimização envolve aumentar a dimensão dos raios, que aumenta a quantidade de energia cinética armazenada, mas, ao mesmo tempo, diminuir a espessura e modificar a geometria de forma que o modelo do volante de inércia tenha maior densidade energética, ou seja, seja capaz de armazenar mais energia por unidade de massa. (RAO *et al.*, 2017) Os efeitos disso são maior aproveitamento do espaço teoricamente dedicado ao volante de inércia e menor custo teórico com relação ao material, ao mesmo tempo em que isso possibilita o incremento na quantidade de energia armazenada no volante de inércia. Especificamente, serão calculados todos os parâmetros referentes ao projeto, com base em valores pré-estabelecidos ou tabelados de acordo com determinada aplicação. Feito isso, então será possível realizar o refino do design do volante de inércia no Autodesk Inventor, bem como a análise estática através da análise de elementos finitos para assegurar os cálculos realizados a priori, e comparar a massa/energia armazenada dos modelos avaliados com relação ao modelo genérico utilizado inicialmente, sendo possível escolher o mais eficiente dentre eles.

## METODOLOGIA

Antes de se fazer possível a realização de uma otimização de geometria juntamente com a análise estática do modelo 3D do volante de inércia, é imprescindível entender um pouco mais do estado de arte do modelo de partida, alguns conceitos que estão por trás do princípio de funcionamento do volante de inércia e alguns cálculos que são feitos para se chegar aos parâmetros utilizados como valores de entrada quando se submete a peça no formato CAD à análise de elementos finitos.

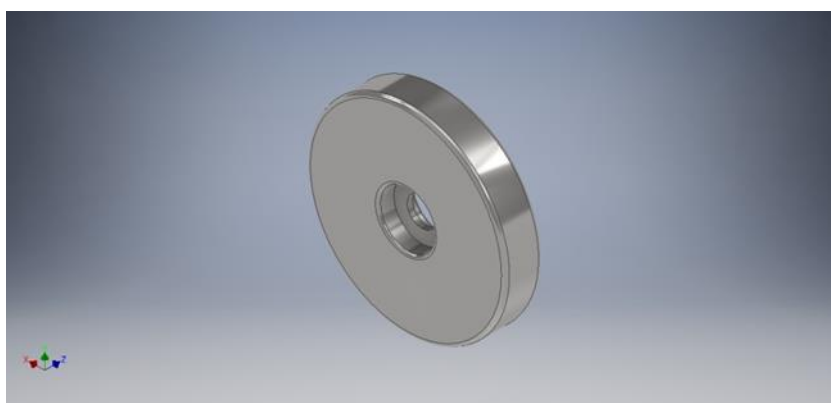
Primeiramente, sobre seu funcionamento, é preciso entender que o seu princípio básico envolve dois princípios básicos, são eles: trabalho e variação de energia cinética. O conceito e a aplicabilidade do trabalho, no caso dos volantes de inércia, são de suma importância porque é o seu resultado, calculado a partir do torque e da velocidade angular de



entrada e saída, que vai definir se a existência do volante no sistema em questão vai ser benéfica ou não. Para exemplificar, se, supostamente, o valor de trabalho for negativo, isso indica que a carga usa menos energia do que a que foi transferida ao volante, logo a velocidade angular final é maior que a inicial, ou seja, houve uma aceleração positiva no ciclo de carga-descarga do volante de inércia, o que propõe que o trabalho transferido pelo volante é inferior ao trabalho introduzido a ele. (KHURMI; GUPTA, 2005)

Do mesmo modo, a mudança de energia cinética traduz, quantitativamente, a capacidade de armazenamento do volante de inércia. Sabe-se que ela é medida através do momento de inércia polar da peça em questão e da variação da sua velocidade angular ao quadrado. A partir disso, é possível estimar a energia armazenada pelo volante de inércia em uma dada rotação, no caso em análise, os cálculos são estimados tendo em vista a rotação máxima do motor. Em particular, o modelo inicial ou de partida do volante de inércia, que será tomado como parâmetro para o processo de otimização, foi o designado para ser desenvolvido e fabricado como parte de um sistema MKERS aplicado a uma motocicleta onroad, com finalidade de constituir o Projeto de Inovação Tecnológica da equipe Galo de Campina – UFCG, durante o processo da 5ª edição da competição internacional MotoStudent 2017-2018. Em particular, esse modelo foi fabricado a partir de um tarugo de aço ao carbono SAE 1050 e o seu modelo 3D pode ser visualizado na Fig. 1, logo abaixo.

**Figura 1 - Modelo inicial do volante de inércia, desenhado no Autodesk Inventor 2018**



Fonte: (Autoria própria, 2018)

Além disso, outras informações importantes sobre esse projeto e que serão utilizadas no presente estudo são sobre o motor utilizado, que é o da KTM RC 250, entregando 23 KW de potência em 9000 rpm, e a relação de transmissão utilizada na motocicleta foi de 33:13. Sendo um volante de inércia, simplifiadamente, um anel rotativo, existe a tensão de tração



devido à força centrífuga que é atuante nele. Sabe-se que a energia armazenada no volante de inércia é delimitada pelo seu limite de deformação, ou, tecnicamente falando, seu limite de escoamento. Pelo fato da tensão de tração ser uma grande responsável disso, é de primordial importância que ela esteja nas considerações de um projeto de um volante de inércia. Essa tensão pode ser determinada pela relação abaixo:

$$\sigma_t = \rho R^2 \omega^2 \quad (1)$$

Onde " $\rho$ " é a densidade de massa do material, " $R$ " é o raio médio do volante de inércia e " $\omega$ " é a velocidade angular média durante um ciclo de carga. Note também que existe uma discussão sobre tensões térmicas e em anéis rotativos num volante de inércia, mas que não será abordada no presente artigo. (BUDYNAS; NISBETT, 2008) Como se pode observar, a análise de tensões térmicas que, em outras palavras, são deformações que podem surgir num corpo quando ele tem restrições em alguma(s) extremidade(s) e é submetido a uma variação constante de temperatura, só faz sentido ser tratada se existir, especificadamente, o espaço restrito que será introduzido o volante, o que não abrange as circunstâncias do atual estudo, uma vez que os outros componentes do sistema MKERS só seriam dimensionados num momento posterior.

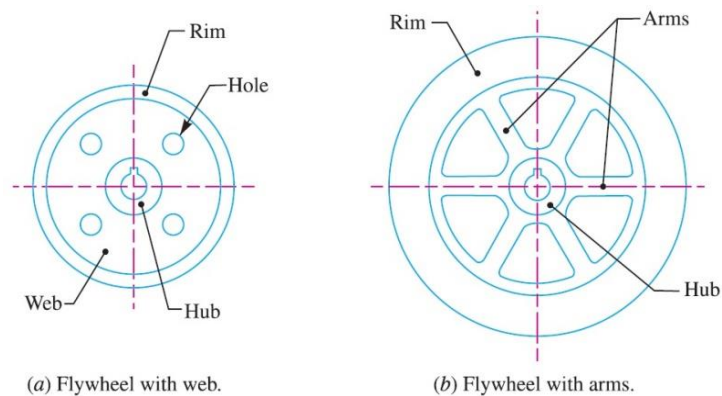
Da mesma maneira, é natural que apareçam tensões radiais e tangenciais ao longo da peça, oriundas das forças inerciais que agem em cada partícula dela. É evidente que o ponto de maior interesse quando se trata do cálculo de tensões devido a forças inerciais é o raio interno, posto que a tensão é máxima nessa localidade sendo, potencialmente, a tensão tangencial a origem de alguma falha que, se propagada, pode causar danos muito perigosos tendo em vista que o ciclo de operação dos volantes de inércia, geralmente, se dão em altas rotações. Essa análise não é abordada no presente estudo porque as condições de projeto não cumprem o requisito para o cálculo dessas tensões, que seria o raio externo " $r$ " ser muito maior que a espessura " $t$ " do volante de inércia, da ordem de  $r \geq 10t$ . (KHURMI; GUPTA, 2005)

Sabe-se que a geometria de um volante de inércia é, essencialmente, um disco cilíndrico feito com material sólido e resistente. Assim, basicamente, a configuração da geometria do volante sofre determinadas mudanças, dependendo do seu tamanho e aplicação específica. Especificadamente, é fato que os volantes de inércia de maior tamanho, com mais de 2,5m de diâmetro, necessitam de uma configuração mais sofisticada, como a mostrada na



Fig. 3b. Não obstante, quanto menor o tamanho e necessidade energética do volante de inércia, a sua geometria se volta mais para o modelo mais simples, caracterizado como sendo um disco sólido com seção transversal circular oca, o qual consiste no aro externo ligado ao cubo interno através de uma rede com furos, para fins de manuseio. Essa geometria pode ser visualizada na Fig. 2a.

**Figura 2 - Diferentes configurações de geometria de um volante de inércia.**



Fonte: (KHURMI; GUPTA, 2005)

Tendo em vista o modelo inicial do volante, bem como as necessidades do projeto, é mais viável e coerente a escolha do volante de inércia com uma rede interna de furos distribuídos circularmente. A partir de algumas restrições dimensionais, o novo modelo será gerado na forma mais simples e as novas geometrias serão avaliadas posteriormente. Encontra-se uma vasta gama de materiais não perigosos, a partir do quais se pode fabricar os volantes de inércia. Sua escolha depende diretamente da aplicação e, secundariamente, de fatores como custo, confiabilidade, usinabilidade, velocidade de rotação, dentre outros. Além disso, os materiais comumente utilizados são o ferro, as ligas de aço ou de alumínio e os materiais compósitos com matriz de fibra de vidro ou de carbono. Diante da análise dos resultados desse estudo comparativo, e também levando em consideração fatores como aplicação, fabricação e custo, a melhor escolha para o material seria um aço de alta resistência e baixa liga.

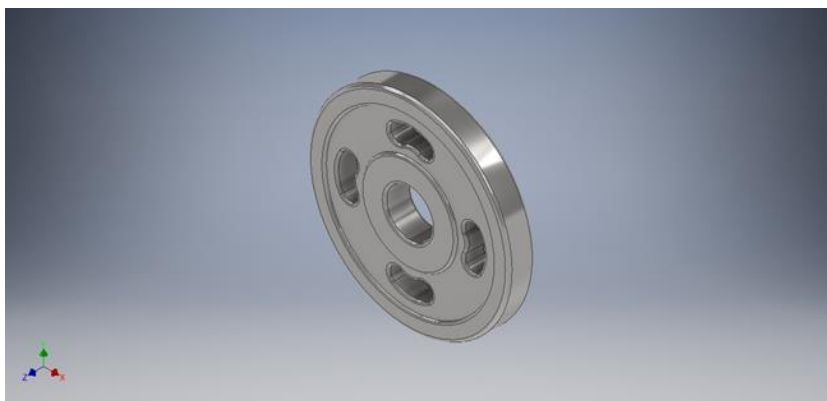
Para a modelagem do volante de inércia, durante a fase da prototipagem virtual, foi utilizado o software Autodesk Inventor 2018, que também foi utilizado para a análise de elementos finitos dos modelos desenvolvidos. Além do modelo de partida já apresentado, foram concebidos outros dois modelos, dimensionados em detrimento de todo o embasamento



teórico exposto e levado em conta, para avaliação de desempenho e legitimar o objetivo do presente artigo.

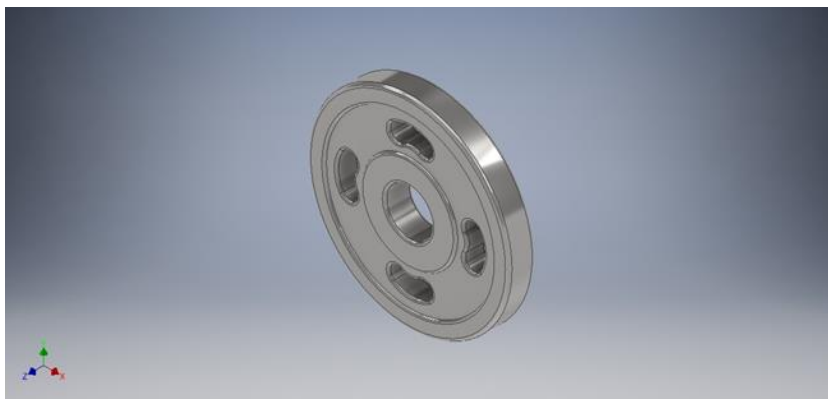
Primeiramente, o modelo inicial ou de partida foi nomeado de modelo I. A partir disso, o modelo II, mostrado na Fig. 3, foi obtido da seguinte maneira: de forma gradativa, o raio externo foi aumentado e se diminuiu a espessura, além de terem sido adicionados furos na peça, no intuito de aumentar a energia armazenada e manter a massa compatível com o modelo I, de forma que o incremento no armazenamento de energia cinética fosse percebido mais facilmente. De forma similar, desenvolveu-se o modelo III, mostrado na Fig. 4 abaixo, com a exceção de ter sido mantida a espessura do modelo II tendo em vista que, durante simulações, a deformação no volante se mostrou muito notória com uma espessura menor frente às restrições e tensões submetidas a ele. Mantendo a espessura e aumentando o raio, mesmo com a adição de furos, houve um incremento na massa então a análise comparativa não se daria diretamente pela energia armazenada, mas pela energia específica ou densidade de energia que, nesse caso, relaciona quantidade de energia por unidade de massa. Todas as informações específicas sobre esses modelos estão presentes na Tab. 1, situada abaixo.

**Figura 3 - Vista isométrica do modelo II.**



Fonte: (Autoria própria, 2019)

**Figura 4 - Vista isométrica do modelo III.**



Fonte: (Autoria própria, 2019)

**Tabela 1 - Dados especificados de dimensionamento e de propriedades de massa dos modelos avaliados.**

	<b>Modelo I</b>	<b>Modelo II</b>	<b>Modelo III</b>
<b>Material</b>	Aço SAE 1050	Aço ASTM A-572	Aço ASTM A-572
<b>Raio interno (mm)</b>	21	21	21
<b>Raio externo (mm)</b>	75	90	105
<b>Espessura (mm)</b>	28	24	24
<b>Massa (kg)</b>	3,6	3,767	4,794
<b>Momento de Inércia (kg.m<sup>2</sup>)</b>	0,010866	0,016577	0,024

Fonte: (Autoria própria, 2019)

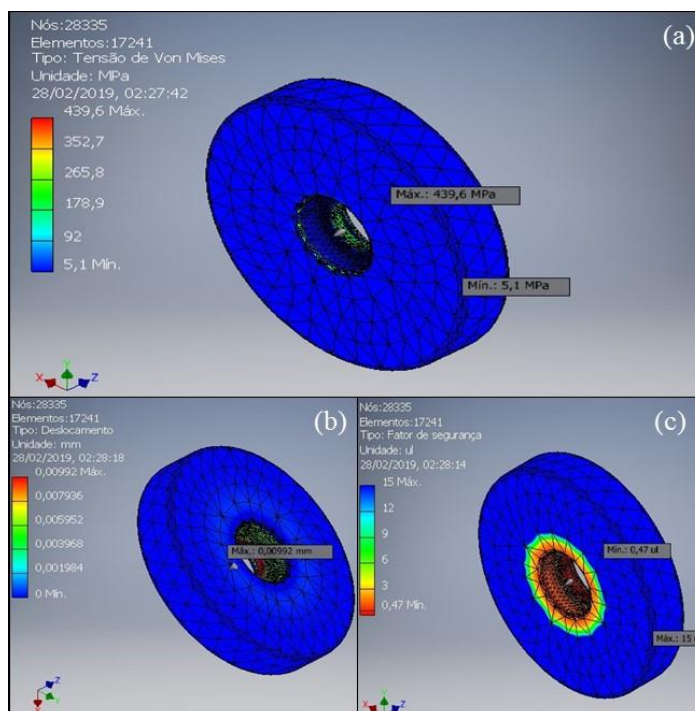
Ademais, é importante frisar que as dimensões de cada modelo foram convenientemente selecionadas levando em conta a aplicação do modelo I, sendo possível a aplicação dos outros modelos da mesma forma e de acordo com as necessidades do projeto utilizadas para o modelo inicial, com o adicional de que o objetivo desse estudo é, de fato, permitir um incremento na eficiência do volante de inércia. Para a análise de elementos finitos, na modalidade de análise estática, os modelos avaliados foram separadamente submetidos às tensões e cargas que teriam em sua operação. Cada modelo em específico possui distintos valores de carga e tensão, que foram calculados previamente e, diante do material selecionado e da simulação, pode-se prever o comportamento do modelo em relação à deformação e se essa assumiria valores permissíveis, assegurando a validade do modelo.

Um detalhe de importante destaque desse procedimento foi na configuração da malha para a simulação. Os softwares CAD, em geral, utilizados com essa finalidade dispõe da geração automática da malha, constituindo-se como tecnologia no que diz respeito ao tempo



gasto no projeto preliminar. Essa ferramenta foi utilizada no presente estudo, porém, nos casos que o tamanho dos elementos não satisfazia a necessidade do modelo, modificou-se a malha pontualmente. Os valores relativos à tensão de Von Misses, deslocamento e fator de segurança obtidos através da simulação dos modelos I, II e III individualmente podem ser visualizados, respectivamente, nas Figs. 5,6 e 7, localizadas logo abaixo.

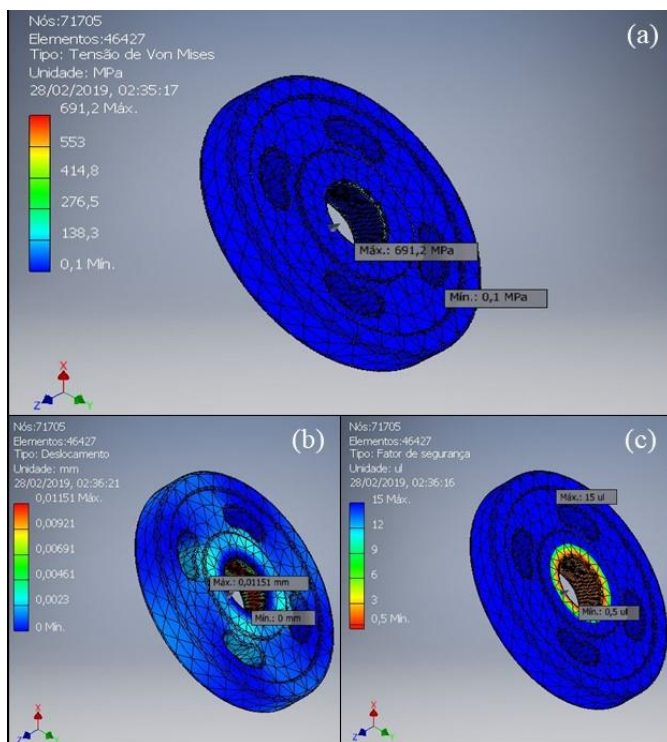
**Figura 5 - FEA do modelo I. a) Tensão de Von Mises b) Deslocamento c) Fator de segurança.**



Fonte: (Autoria própria, 2019)

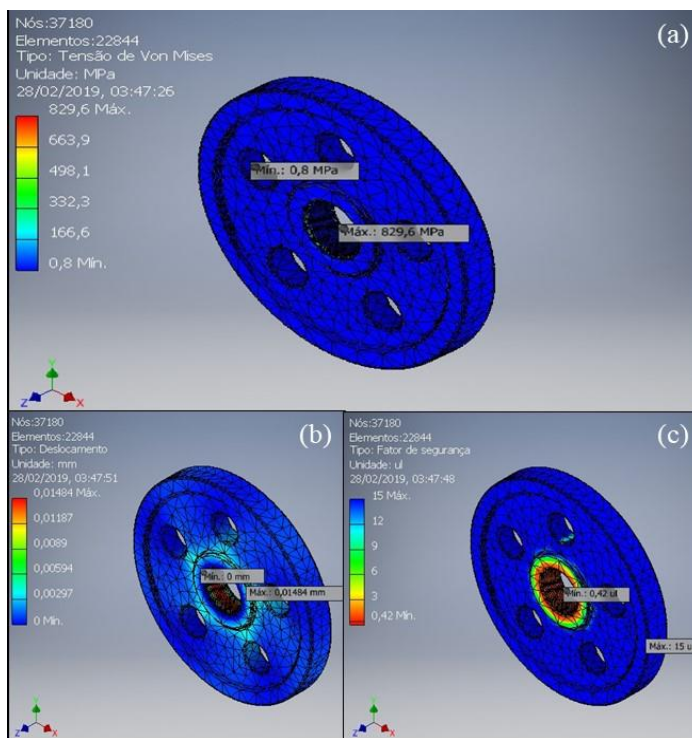
**Figura 6 - FEA do modelo II. a) Tensão de Von Mises b) Deslocamento c) Fator de segurança.**





Fonte: (Autoria própria, 2019)

**Figura 7 - FEA do modelo III. a) Tensão de Von Mises b) Deslocamento c) Fator de segurança.**



Fonte: (Autoria própria, 2019)

## REFERENCIAL TEÓRICO



É primordial ressaltar a importância da aplicação do volante de inércia como alternativa energética porque a nova tendência do desenvolvimento de projetos, principalmente no ramo da mobilidade, é dar prioridade ao ecologicamente correto, cujo requisito o volante de inércia satisfaz em detrimento de alternativas amplamente utilizadas. Além disso, essa alternativa possui inúmeras vantagens que foram levadas em consideração para a sua escolha no desenvolvimento do MKERS. (KAPOOR; PARVEEN, 2013)

Em algumas teses (MATHEW, 2009) e artigos científicos (KAPOOR; PARVEEN, 2013) existe, no embasamento teórico, a justificativa sobre a vantagem da aplicação dos volantes de inércia em detrimento de alternativas, como, por exemplo, as baterias químicas e, além disso, de forma mais geral, das vantagens que o MKERS tem sobre as outras formas de armazenamento de energia. A partir disso, pode-se perceber que os volantes de inércia podem oferecer um máximo nível de energia de forma estável e vários níveis de potência, dependendo da configuração da sua transmissão. Além disso, no caso dos volantes, não se faz necessário o estudo de estado de descarga pela mínima influência que esse fenômeno tem no princípio de funcionamento. Também, é notório que ele é responsável por uma redução de combustível quando aplicado a sistemas que possuem motores a explosão ou híbridos, cuja eficiência nesse requisito é comparável a dos supercapacitores, sabendo que uma das suas funções é minimizar a variação das oscilações de rotação, e de energia, do sistema em que ele é inserido, que se constitui como um dos fatores mais importantes no que diz respeito ao consumo de combustível.

Além de tudo já mencionado, observa-se que dentre todos os mecanismos de armazenamento de energia, o volante de inércia é um dos mais baratos, ficando atrás apenas das baterias. Isso pode ser explicado pelos materiais comumente selecionados, que são facilmente encontrados no mercado e barateados, e os modos de fabricação, em geral, são simples então não existe um custo notório em relação a isso. (BROWN; CHVALA, 2005) Ainda, pode-se destacar que, ao contrário das baterias, a capacidade de armazenamento de um volante de inércia não decai com o seu tempo de vida e, ademais, ele pode ter alta densidade de energia, dependendo principalmente da seleção de material, o que permite um design mais compacto e leve, o que se torna a escolha perfeita para o armazenamento de energia em aplicações que dispõe de pouco espaço, como é o caso das motocicletas.

Na conjuntura atual, existe uma gama muito ampla em questão de área de aplicação e complexidade no que se refere aos volantes de inércia. Em recente trabalho (HEDLUND *et*



al., 2015), realiza-se uma revisão detalhada de inúmeras aplicações automotivas de sistemas utilizando volantes de inércia, no intuito de recuperar energia. Pode-se destacar o seu uso em: mobilidade (ônibus, caminhões de lixo, carros, motos e bicicletas), guindastes para containers, maquinário de construção, estações de trem, reguladores de frequência, dentre outras.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diante dos cálculos estáticos e dinâmicos realizados em cada modelo em avaliação e da análise estrutural, comprovando a validade dos cálculos feitos, percebe-se que o modelo III obteve o melhor resultado de desempenho, tanto no que se refere à energia máxima armazenada, o que seria intuitivo concluir já que ele obteve possui maior tamanho e massa, mas também na maior eficiência energética. Os dados obtidos pelos cálculos realizados estão inseridos na Tab. 2, disposta logo abaixo.

**Tabela 2 - Dados obtidos pelos cálculos de tensão e desempenho.**

	<b>Modelo I</b>	<b>Modelo II</b>	<b>Modelo III</b>
<b>Torque (N.mm)</b>	2600	3964	5739
<b>Tensão (MPa)</b>	103,418	138,26	178,153
<b>Fator de segurança</b>	3,33	2,49	1,94
<b>Energia máxima armazenada (KWh)</b>	0,00863	0,013165 (+52,55%)	0,01906 (+120,86%)
<b>Densidade de energia (KWh/kg)</b>	$2,397 \cdot 10^{-3}$	$3,495 \cdot 10^{-3}$	$3,976 \cdot 10^{-3}$

Fonte: (Autoria própria, 2019)

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em face do exposto e discutido acima, é fato que o estudo e otimização de formas de armazenamento de energia é de primordial importância a partir do momento em que se percebe que as maneiras alternativas, que possam ser sustentáveis ou, ao menos, causem impacto ao meio ambiente e sejam acessíveis, ganham espaço e surgem como tendência para um futuro próximo. Uma dessas formas, já mostrada, é a aplicação dos volantes de inércia que tem potencial de ser substituta das baterias convencionais e dos supercapacitores, reunindo



boas propriedades dessas duas maneiras de armazenamento de energia e que, além disso, já possui uma larga gama de aplicabilidades no mercado atual.

Pensando nisso, o presente artigo introduz e constitui uma etapa do estudo sobre o sistema de armazenamento mecânico de energia cinética, aplicado a motocicletas onroad, no intuito de, num ambiente competitivo, ser capaz de incrementar a potência do sistema beneficiado. Assim, tendo em vista as condições de projeto que foram explanadas anteriormente, o estudo forneceu um modelo de volante de inércia mais eficiente, ou seja, que poderia armazenar mais energia por unidade de massa e que, certamente, suporta as cargas empregadas de acordo com as condições de operação. A geometria escolhida foi bem sucedida porque atendeu aos cálculos realizados no momento que antecedeu a FEA, que assumiu o papel de legitimar os procedimentos feitos, além de assegurar o funcionamento do modelo em questão. Para além do contido no presente estudo, espera-se incluir a análise térmica no estudo, já que o material para a construção foi selecionado, uma vez que todo o projeto preliminar do sistema esteja concluído, objetivando medir precisamente tensões advindas da dilatação térmica. Ademais, incluir outras tensões que podem agir de acordo com outras circunstâncias do projeto que ainda vão ser definidas, como tipo de rolamento, tipo de cubo que envolverá o sistema MKERS e, ainda, o tipo de sistema de engate/desengate.

## REFERÊNCIAS

- BROWN, D. R.; CHVALA, W. D. Flywheel energy storage: An alternative to batteries for UPS systems. **Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering**, 2005. v. 102, n. 5, p. 7–26.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
- HEDLUND, M. *et al.* Flywheel energy storage for automotive applications. **Energies**, 2015. v. 8, n. 10, p. 10636–10663.
- KAPOOR, R.; PARVEEN, C. M. Comparative study on various KERS. **Lecture Notes in Engineering and Computer Science**, 2013. v. 3 LNECS, p. 1969–1973.
- KHURMI, R. S.; GUPTA, J. K. **A Textbook of Machine Design**. 14. ed. New Delhi: [s.n.], 2005.
- MATHEW, M. **Design of Flywheel for Improved Energy Storage using Computer Aided Analysis**. [S.l.]: National Institute of Technology Rourkela, 2009.
- RAO, D. M. *et al.* Kinetic energy recovery system in bicycle. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology**, 2017. v. 8, n. 5, p. 104–112.