

SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA CINÉTICA PARA BICICLETAS

Francisco de Assis da Silva Junior, fassiljunior@gmail.com¹
Sérgio Wortmann, sergio.wortmann@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95180-000, Farroupilha – RS

Resumo: *Este trabalho tem o propósito de projetar um sistema de recuperação de energia cinética para bicicletas do tipo urbanas, para que ciclistas possam reaproveitar a energia das constantes frenagens e assim reduzir o esforço para se deslocar. Para determinar a quantidade de energia a ser recuperada, respeita-se a lei de conservação de energia, e inicialmente calcula-se a quantidade de energia cinética disponível pelo conjunto ciclista e bicicleta. O sistema de armazenagem escolhido, flywheel, é então dimensionado para recuperação total da energia. Toda a transmissão de potência é feita por um sistema planetário. Software de simulação estrutural foi utilizado para o dimensionamento dos esforços das engrenagens bem como utilizou-se programa CAD para a montagem e simulação dos movimentos do sistema completo. A busca por um sistema sem alterações estruturais levou como resultado a obtenção de um KERS localizado apenas na roda dianteira, sendo possível adquirir o sistema completo intercambiável para qualquer modelo de bicicleta, reduzindo o preço para aquisição de um produto pronto.*

Palavras-chave: *KERS, recuperação de energia cinética, bicicleta, simulação.*

1. INTRODUÇÃO

As limitações dos combustíveis fósseis trazem à tona a busca por novas fontes e sistemas de conservação de energia, especialmente relacionadas com baixo impacto ambiental e alta eficiência de produção (Joeri Van Mierlo, 2004). Nota-se que a poluição causada pelos automóveis é um problema enorme para a população, especialmente em áreas urbanas. Nesse sentido investimentos em veículos limpos, como carros elétricos, é uma alternativa para a redução significativa da emissão de gás carbônico nos centros urbanos (Clarke, Muneer, & Cullinane, 2010). Há também uma grande evolução a respeito da conservação de energia no deslocamento do automóvel. Sistemas de reaproveitamento de frenagem são os mais desenvolvidos até o momento, sendo eles impulsionados a partir das corridas de F1 que em 2008 aderiu ao KERS, *Kinect Energy Recovery System*, em português, sistema de recuperação de energia cinética (Chibulka, 2009).

Sistemas de recuperação de energia cinética (KERS) referem-se ao processo de armazenar a energia da freada, que usualmente é desperdiçada, para a utilização posterior quando necessária. Sempre que um veículo convencional utiliza o freio, a energia cinética é convertida em calor entre o disco de freio e as pastilhas. O calor é então transferido para o meio ambiente e, portanto, toda a energia cinética é perdida. A quantidade total de energia perdida depende da frequência, da intensidade e da duração da frenagem (Clegg, 1996).

Os recorrentes acionamentos do freio nas regiões urbanas fazem parte do cenário ideal de aplicação do KERS, pois se toda a energia de frenagem fosse armazenada para ser reaproveitada posteriormente, o consumo de combustível reduziria em até 33% (Dorgham, 1982).

Embora os maiores investimentos para esses sistemas sejam da indústria automotiva, os princípios de recuperação de energia cinética são aplicáveis a todos os meios de transportes disponíveis. A popularização da bicicleta nos centros urbanos tem atendido as mais diversas demandas de deslocamento, sendo elas utilizadas para recreação, serviços de entrega, corridas, patrulha policial e entre outros (Sevatkar, Pise, Nagalkar, Tekade, & Ghawade, 2016). Nessa circunstância, durante o trajeto, repetidas frenagens são necessárias para atravessar intersecções, desviar de obstáculos, reduzir velocidade nas descidas e obedecer sinais de trânsito. Conseqüentemente, KERS para bicicletas proporcionaria uma melhoria na eficiência energética, reduzindo assim o esforço total durante o trajeto.

Ocorre que existem dois tipos principais de sistemas de recuperação de energia cinética, o KERS elétrico e o KERS mecânico. Ambos possuem seus aspectos positivos e negativos. O sistema elétrico é menos eficiente pois precisa de converter a energia cinética em energia elétrica e posteriormente armazenar em baterias químicas, mas pode armazenar energia por uma duração maior e oferece a possibilidade de controlar a saída de torque e rotação de acordo com a necessidade. Por outro lado, o sistema mecânico tem uma eficiência maior que o anterior por não haver a conversão de

energia, mas é propenso a descarregar mais rápido devido aos efeitos de atrito e portanto precisa ser usado dentro de um curto período de tempo (Nandy, Karthikeyan, Winston, Sandle, & Varghese, 2017).

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um conceito de um sistema de recuperação de energia cinética para bicicleta, capaz de ser reproduzido em grande escala e com alta compatibilidade com os modelos de bicicletas disponíveis no mercado nacional. A proposta então busca minimizar as modificações necessárias na bicicleta, com todo o sistema embutido na roda da frente, para que com facilidade o próprio ciclista substitua esse único componente. Além disso, otimiza-se o custo com a utilização itens comuns à bicicletas como freios a disco convencionais como elementos de fricção e catracas como controle de movimento do volante. O projeto conta também com a máxima recuperação de energia possível, proporcionando equilíbrio entre distancia de frenagem e retomada de velocidade.

Atendendo aos objetivos propostos, o presente estudo inicia com a fundamentação teórica que contém uma revisão dos sistemas existentes de recuperação de energia cinética, as aplicações mais comuns e um comparativo entre as vantagens desejadas desse projeto. Em sequência, detalha-se o procedimento de dimensionamento do volante, para a maior eficiência em armazenamento de energia, relacionando a massa e a energia cinética do conjunto bicicleta e ciclista. Todo o sistema planetário de transmissão de potência é projetado em consideração as leis de engrenamento e os esforços internos. Conclui expondo uma análise em *design* e eficácia do sistema com os projetos mundialmente conhecidos.

2. FUNCIONAMENTO DOS KERS ATUAIS

Nos modelos em uso atualmente há divisão entre sistemas elétricos e mecânicos que são definidas a respeito da forma de armazenagem da energia. Para sistemas puramente elétricos, existem os relacionados a baterias, supercapacitores e *grid-tie* (conectado com a rede) que é o caso de metrô. Já os sistemas mecânicos são subdivididos em acumuladores hidráulicos, volantes (*flywheels*) e elastômeros. Cada sistema possui vantagens únicas, no entanto os sistemas de recuperação de energia cinética mais utilizados são os elétricos com baterias e os mecânicos com *flywheels* (Hebner, Beno, & Walls, 2002).

2.1. Sistemas Elétricos

As ferrovias eletrificadas tiveram os primeiros veículos a utilizar KERS. Em condições normais de funcionamento, energia elétrica é retirada da rede para alimentar o motor, movimentando o trem para frente. No modo de recuperação de energia cinética, utiliza-se o motor para reduzir a velocidade do trem quando o maquinista aciona o freio, e então o motor elétrico passa a funcionar como um gerador que aplica um torque na direção inversa do movimento, produzindo energia elétrica e devolvendo-a para a rede (Fletcher, 1993). O funcionamento dos freios regenerativos nos carros híbridos e elétricos atual é similar aos trens elétricos. A diferença é que os motores/geradores elétricos são posicionados na roda do automóvel e são alimentados por baterias. Figura 1 demonstra o funcionamento do veículo elétrico durante aceleração e durante frenagem gerando energia para as baterias.

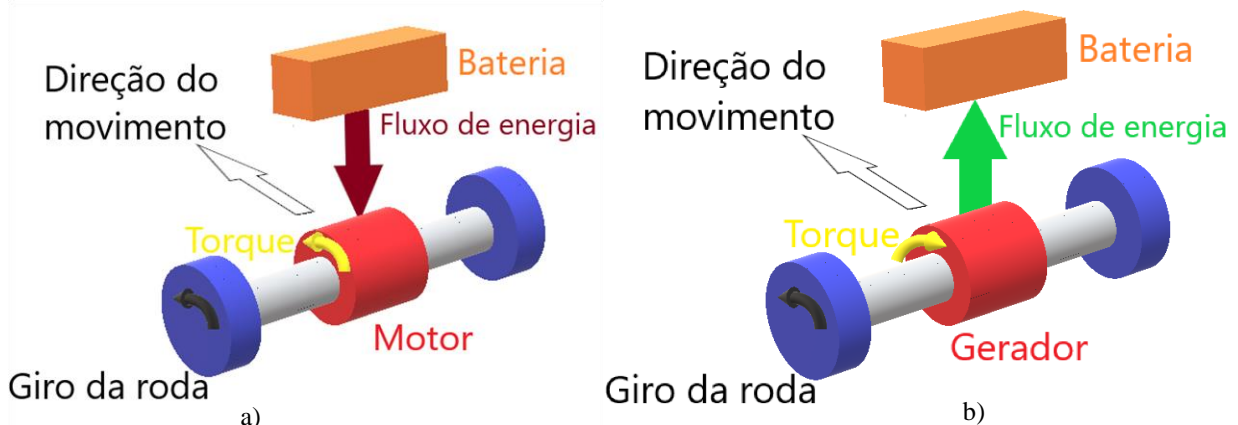


Figura 1. Funcionamento veículo elétrico, acelerando para frente (a) e ação regenerativa (b).

O fato de que todo o sistema elétrico para movimentar o carro para frente é o mesmo para acionar o KERS, torna viável trabalhar com o modelo elétrico. No entanto, esse processo é menos eficiente a baixa potência devido às substanciais perdas mecânicas e as constantes conversões de energia elétrica em energia cinética, portanto, a regeneração não é possível a baixas velocidades e deve ser complementada por freios convencionais (Naik & Panesar, 1987). Porém a desvantagem mais relevante desse sistema é a bateria que possui vida útil curta, baixa taxa de carga e descarga e tamanho e volume das baterias. Além disso há o enorme passivo ambiental do descarte das baterias usadas.

2.2. Sistemas Mecânicos

A utilização de volantes para armazenar energia é bem conhecida em variadas áreas técnicas. Um volante é um dispositivo de armazenamento de energia que usa o momento de inércia angular para conservar energia. A energia acumulada é diretamente proporcional ao peso, rotação e diâmetro do rotor. As *flywheels* são usadas há muito tempo para manter o nível de energia de um sistema estável e se desenvolveram com a revolução industrial e a máquina a vapor. Figura 2 mostra uma típica *flywheel* para suavizar o torque intermitente do pistão do motor de uma locomotiva.



Figura 2. *Flywheel* utilizada em locomotivas a vapor. (Trust, 2005)

Embora as *flywheels* foram substituídas por baterias em parte das aplicações para armazenamento de energia, há uma crescente evolução nas pesquisas para esse sistema. Isto deve ser atribuído principalmente aos avanços em fibras, resinas, técnicas de fabricação de compósitos e controle de qualidade de fabricação que aumentam a resistência desse elemento, tornando-o mais seguro e durável a altas rotações, assim possibilitando maior capacidade de absorção de energia (Hebner, Beno, & Walls, 2002). Equipamentos como satélites, estações espaciais, trens e bancos de dados estão se desapropriando de baterias químicas para a utilização de *flywheels*.

Dispositivos sensíveis à variação de energia, como computadores, sistemas de manufatura, equipamentos hospitalares e banco de dados dependem de fontes ininterruptas de energia e novos conceitos estão sendo desenvolvidos utilizando as *flywheels* acopladas com geradores, assim em caso de queda de energia o sistema instantaneamente ativa o volante e posteriormente o gerador de energia (Todorov, Kamberov, Semkov, & Nikolov, 2011). Mesmo que os volantes são inferiores as baterias de chumbo ao comparar a capacidade de armazenar energia por longos períodos, as vantagens deles são muito relevantes para as aplicações citadas, sendo elas a vida útil maior que 20 anos, a alta velocidade de resposta do sistema, as aplicações para qualquer ambiente sem perdas significativas por variação de temperatura e reduzida proporção entre energia acumulada e tamanho (Chibulka, 2009). Ressalta-se também que o descarte das *flywheels* é ambientalmente muito menos agressivo do que as baterias convencionais, pois todo sistema do volante pode ser reciclado e reutilizado.

2.3. Transmissão de potência

Todos sistemas mecânicos que precisam controlar a potência que é produzida por eles, necessitam de uma transmissão. A transmissão deve receber uma energia de entrada e entregá-la de acordo com o que é necessário para o sistema, como é o caso de um motor que precisa transferir a potência para a roda de uma motocicleta. No caso de bicicletas, correntes e rodas dentadas (pinhão e coroa) são utilizados para transmitir a energia que é gerada nos pedais pelo ciclista para a roda traseira (Ludlum, 2013). Apesar das vantagens das correntes como vida útil prolongada, alta eficiência de transmissão e capacidade de transmissão de grande quantidade de energia, ela se torna inviável para um KERS aplicado à uma bicicleta pelo fato de que é necessário uma grande distância entre eixos para que ocorra uma grande redução, o que ocasionaria indesejadas alterações estruturais na bicicleta.

Um conjunto de transmissão planetária é o que há de mais moderno nas transmissões automáticas de veículos. Um dos maiores benefícios é que a engrenagem planetária está sempre em constante engrenamento. Em adição, também é possível obter uma variedade de relações de velocidades sem ter desacoplamento e acoplamento de engrenagens. Embora a grande desvantagem da alta complexidade cinemática, os trens de engrenagens planetárias também são mais compactas do que trens de engrenagens convencionais. Um conjunto planetário simples contém uma engrenagem localizada no centro, o sol, com múltiplas engrenagem ao redor, os planetas. Os planetas são montados nos braços e um anel com dentes internos é posicionado em contato com os planetas. A Fig. 3 é uma representação de uma transmissão planetária simples.

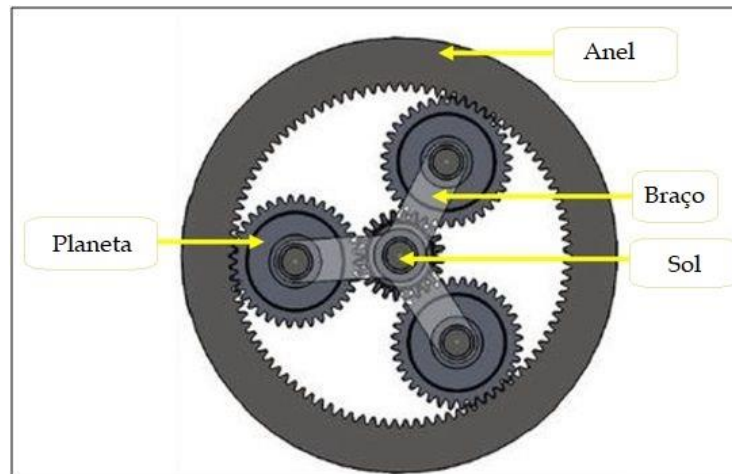


Figura 3. Conjunto de engrenagens planetária simples.

Ao segurar o um dos componentes (braço, sol ou o anel) e movimentar um dos outros restantes, pode-se criar até seis relações de transmissão. Sendo quatro relações para movimentar para frente, duas reduções e duas multiplicações, e duas relações reversas, uma redução e uma multiplicação (VanGelder, 2017). Por exemplo, caso o anel seja movimentado e o braço esteja fixo, o sol receberá toda a potência aplicada do anel e a relação pode ser calculada diretamente entre os dentes do sol e do anel. Em uma outra hipótese, pode-se movimentar o anel e fixar o sol, então os planetas girarão entorno do sol e o braço terá toda a potência disponível. A relação nessa configuração é obtida através da proporção entre o número de dentes do planeta e do anel. A Figura 4 representa os exemplos citados.

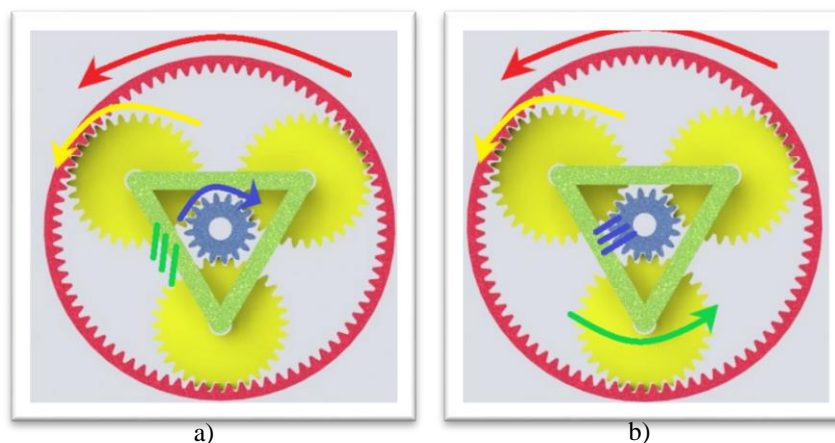


Figura 4. Cinemática das planetárias com o braço fixo (a) e com o sol fixo (b).

Um conjunto de engrenagens planetárias simples é capaz de prover relações de transmissão, tanto para multiplicação quanto para redução, de 1:3 até 1:10 pelo fato de que a lei do engrenamento tem que ser respeitada entre o sol e o planeta e entre o planeta e o anel. Razões entre 1:4 a 1:8 proporcionam melhor combinação entre o tamanho do sol e dos planetas, acarretando em menor desgaste. Com essa limitação, é possível adicionar estágios para ampliar a relação (Horn, 2012).

2.4. Modelo alternativo de KERS para bicicleta

Embora os sistemas de recuperação de energia cinética são amplamente estudados para aplicações em carros híbridos, há também trabalhos científicos para desenvolver essa tecnologia para as bicicletas (Ingole & Mahure, 2016). A grande maioria dos KERS para bicicletas utilizam os mesmos princípios sendo um deles o armazenamento de energia pela *flywheel*. Também outra característica comum desses trabalhos é a montagem do sistema. O trabalho de Ludlum (2013), esquematiza um sistema montado no quadro da bicicleta, com um sistema de transmissão por corrente e uma embreagem como elemento de fricção para acoplar o volante a roda da bicicleta. Figura 5 mostra um esboço do seu conceito.



Figura 5. Conceito de Ludlum de KERS para bicicleta (Ludlum, 2013).

Esse projeto contém componentes simples e fáceis de adquirir, porém não foi feita uma análise de custo. A *flywheel* de 6,8 kg era de um automóvel, o sistema de transmissão vinha de uma outra bicicleta usada. O quadro original foi adaptado para acomodar o volante e a embreagem foi usinada pelo próprio autor. Com a construção desse conceito, foi possível mensurar os ganhos reais em eficiência energética, ou seja, para parada total, até 10% da velocidade pode ser recuperada. Porém, ressalta-se que no protótipo de Ludlum, o sistema era capaz de absorver menos de 80% de toda a energia disponível, isso devido à transmissão que não proporcionava uma relação suficiente para acelerar a *flywheel* até a velocidade necessária para tal. Além disso, esse projeto apresentou desconforto ao ciclista pois a posição do volante, entre as pernas, atrapalha as pedaladas. Também foi relatado que as adaptações no quadro foram difíceis de executar devido à necessidade de processos como corte, dobra e solda de tubos. Por fim foi sugerido pelo autor, uma transmissão continuamente variável, CVT para melhor controle da aceleração.

3. PROPOSTA DE MECANISMO

Ao desenvolver um mecanismo de recuperação de energia cinética para bicicletas, diversas condições de uso devem ser consideradas e guiam a evolução desse projeto. O estudo das energias envolvidas é o primeiro a ser compreendido pois relaciona a quantidade de energia que é desperdiçada em uma frenada e determina a quantidade de energia que pode ser recuperada por meio de um volante. A partir dessa etapa, dimensiona-se a transmissão planetária para transferir a máxima quantidade de energia cinética angular da roda da bicicleta para o volante e devolvê-la. Por último, seleciona-se os componentes auxiliares para completar as necessidades de comando do sistema, possibilitando ao usuário controle da frenagem e da aceleração posterior.

3.1. Energias Envolvidas

A energia relacionada com o movimento do corpo é descrita como energia cinética. A máxima energia cinética que pode ser armazenada durante a frenagem de uma bicicleta é calculada a partir da massa total do sistema e o seu módulo da velocidade. Quanto maior a massa e a velocidade, maior é a energia cinética dessa bicicleta. Então a equação para a energia é definida pela Eq. (1):

$$E_c = \frac{m_{sistema} \times v^2}{2} \quad (1)$$

Onde:

E_c = energia cinética da bicicleta;

$m_{sistema}$ = massa do sistema;

v = módulo da velocidade da bicicleta.

Neste trabalho considera-se a massa do sistema como a soma da massa do ciclista, a massa da bicicleta e massa do sistema. Segundo Ingole e Mahure (2016) a maioria dos ciclistas possuem bicicleta urbanas de aproximadamente 15 kg e com aros de 26 polegadas, pois esses modelos têm o melhor custo benefício à usos gerais como passear ou ir ao trabalho. Também em seu trabalho é proposto que a velocidade média dos ciclistas urbanos é de 27 km/h ou 7,5 m/s. A monografia de Ludlum (2013) consta que um sistema de recuperação de energia com a massa maior que 6,8 kg não é viável, pois mesmo no pico de eficiência, a energia que é gasta para levar o peso adicional do sistema é maior do que a energia para armazenar no volante. Logo para um ciclista de 80kg a energia cinética disponível é de 2863J.

Sabendo que toda essa energia cinética disponível será armazenada como energia cinética rotacional E_f pode-se dimensionar as características da *flywheel* pela Eq.(2):

$$E_f = \frac{1}{2}I\omega_f^2 \quad (2)$$

Onde:

ω_f = velocidade angular do volante;

I = momento de inercia.

A Equação (3) mostra que o momento de inércia depende da massa m , do raio r e da constante de inercia c do volante que relaciona como a massa está distribuída, ou seja a forma dessa *flywheel*. Para esse caso adota-se como disco sólido de espessura uniforme c é igual a 0,606.

$$I = \int r^2 dm = cmr^2 \quad (3)$$

Então aplicando a Eq. (3) em (2), tem-se Eq. (4):

$$E_f = \frac{1}{2}cmr^2\omega_f^2 \quad (4)$$

Portanto para que o sistema possa absorver toda a energia da frenagem da bicicleta, a Eq. (4) tem que ser igual a Eq. (1) e dessa maneira a massa, o raio e a rotação do volante devem ser obtidos. Como a massa do sistema todo não pode ultrapassar os 6,8 kg, foi estimado uma massa do volante de 4 kg e a massa restante para a transmissão. A rotação do volante é função da relação de multiplicação e nesse caso foi escolhida a máxima para uma transmissão planetária, 1:10, que terá para cada volta do anel, 10 voltas no sol. O cálculo da velocidade angular da *flywheel* é feita a partir da rotação da roda da bicicleta como na Eq. (5):

$$\omega_b = \frac{v}{R_{bicicleta}} \quad (5)$$

Onde:

ω_b = velocidade angular da roda da bicicleta;

$R_{bicicleta}$ = raio da roda da bicicleta;

Utilizando as informações apresentadas acima ω_b é determinada como 22,7 rad/s, nesse caso a velocidade angular da *flywheel* pode então ser determinada como 10 vezes maior que ω_b , sendo muito abaixo do que os volantes utilizados nos veículos que giram até 7000 rotações por minuto. Consequentemente, a Eq. (4) fica parcialmente completa, restando apenas o raio do volante que é calculado como 20 cm.

3.2. Transmissão Planetária

Embora a cinemática de um sistema planetário tem alta complexidade quando comparado com os outros sistemas de transmissão convencionais, os fundamentos são os mesmos de um par simples de engrenagens, no entanto ao dimensionar há algumas restrições para garantir que os princípios de engrenamento se mantenham válidos (Uicker, Pennock, & Shigley, 2003). Para esse KERS mecânico, dois sistemas planetários são necessários, um para absorver a energia da frenagem e outro para depois devolvê-la em forma de energia cinética. O primeiro sistema é responsável por transferir toda a energia da roda para a *flywheel* e multiplicar a rotação da mesma para que a máxima energia possa ser absorvida. O segundo sistema devolverá, quando acionado, a energia contida no volante para que o ciclista movimente-se com o mínimo esforço.

Para o dimensionamento da primeira planetária é necessário determinar o número de dentes em cada engrenagem a partir da relação de multiplicação de 1:10. No caso dessa planetária toda a energia entrará pelo anel e quando o braço que suporta os planetas tiver o movimento travado, a energia será entregue ao sol que estará conectado com o volante. Então para o cálculo do trem de velocidades utiliza-se a Eq. (6):

$$R = \frac{N_a}{N_p} \times \frac{N_p}{N_s} \quad (6)$$

Onde:

R = relação de transmissão;

N_a = número de dentes no anel;

N_s = número de dentes no sol;
 N_p = número de dentes nos planetas.

No entanto, para algumas combinações de número de dentes em um par de engrenagens, existe uma interferência, que deve ser evitada, entre a ponta do dente no pinhão e a raiz do dente da engrenagem maior. Essa interferência é encontrada quando o pinhão possui poucos dentes. No caso de engrenagens comerciais, de ângulo de pressão a 20° , para não haver interferência o número mínimo de dentes para o pinhão é de 16 dentes (Mott, 2014). Então a partir da Eq. (6), obtém-se que o número de dentes no anel é de 160 dentes.

Tratando-se de um sistema planetário a Eq. (7) tem que ser satisfeita para que haja engrenamento de todas engrenagens.

$$N_a = N_s + 2N_p \quad (7)$$

Ao resolver a Eq. (7), encontra-se por fim o número de dentes dos planetas igual a 72 dentes. Ressalta-se também que o anel tem tamanho máximo limitado ao diâmetro da roda da bicicleta que é de 550 mm para uma bicicleta de aro 26. De posse dessa informação, é calculado então o módulo das engrenagens pela Eq. (8):

$$D_{int} > D_{anel} = m(N_a + 2) \quad (8)$$

Onde:

D_{int} = diâmetro interno da roda da bicicleta;

D_{anel} = diâmetro externo do anel;

m = módulo da engrenagem:

O módulo m encontrado é 3 mm. Ele é utilizado para dimensionar o tamanho das engrenagens bem como a distância entre centros. No caso do sol e dos planetas a distância entre centros deve ser calculada pela Eq. (9):

$$C_{sp} = \frac{m(N_s + N_p)}{2} \quad (9)$$

Onde:

C_{sp} = Distância entre centros do sol e dos planetas:

O valor de C_{sp} igual a 132 mm representa o tamanho que o braço deve ter para suportar as engrenagens e garantir o engrenamento delas. Como a Eq. (7) é utilizada para satisfazer o engrenamento em relação ao número dentes de todo o sistema planetário então a distância entre centro dos planetas e do anel é dada como igual a distância entre centros do sol e dos planetas. Entretanto há também duas outras condições para o dimensionamento da planetária, que são a respeito do número de planetas (Kohara, 2009). As Eq. (10) e Eq. (11) têm que ser satisfeitas pra o engrenamento distribuído dos planetas.

$$\frac{N_s + N_a}{n} = \text{inteiro} \quad (10)$$

Onde:

n = número de planetas:

$$N_p + 2 < (N_s + N_p) \sin\left(\frac{180^\circ}{n}\right) \quad (11)$$

Com essas duas condições encontra-se que 2 planetas são necessário para o funcionamento dessa transmissão planetária. Porém cabe também dimensionar a espessura e a resistência mecânica desses componentes.

Como a massa de todo o conjunto é um fator crítico para a eficiência, polímeros de engenharia como o Nylon devem ser empregados como matéria-prima das engrenagens para garantir a relação satisfatória entre resistência mecânica e massa dos componentes. A espessura e a resistência mecânica têm a relação definida pelas equações padrões da *American Gear Manufacturers Association*, AGMA como a norma 2001-D04. No entanto, devido às dificuldades encontradas na obtenção dos valores associados aos coeficientes requeridos pelas equações da AGMA, optou-se pela utilização de um software comercial para estimar a resistência mecânica das engrenagens sob considerações estáticas de carregamento. Por parametrização da simulação pode determinar qual a melhor espessura para que o material resista especificamente para aquela aplicação. Também é necessário compreender os esforços envolvidos nas rodas das bicicletas que consideram a superposição de efeitos de cargas radiais, axiais e laterais. A máxima resistência das rodas convencionais que para

bicicletas urbanas são projetadas a suportar até 500 N de força de frenagem e até 300 N.m de torque no cubo da roda (Brandt, 1993). A Fig. 6 demonstra a análise de tensão por vonMises, no contato da engrenagem do sol com o planeta.

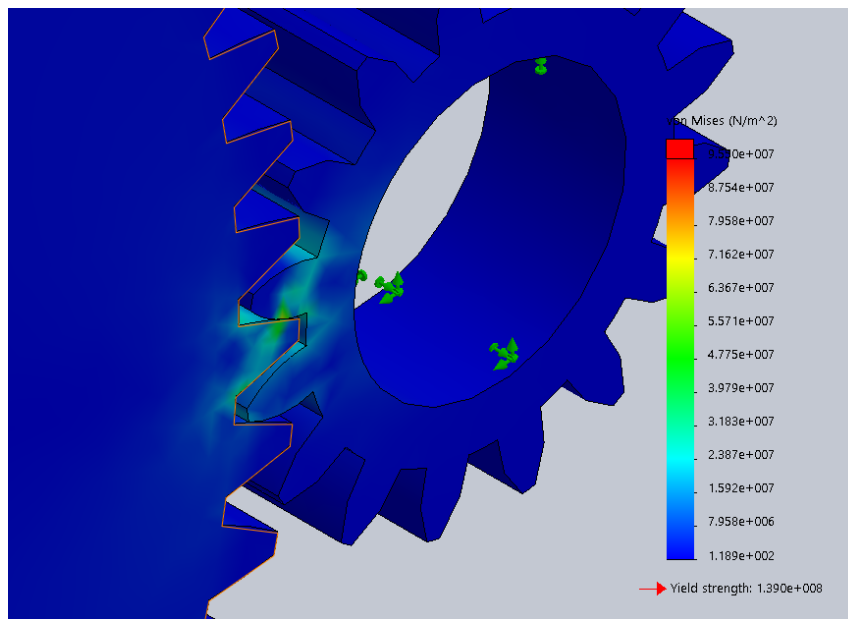


Figura 6. Análise de tensão por vonMises no engrenamento do sol com o planeta.

A análise é feita a partir da montagem do conjunto, onde se estabelece os corpos rígidos que estarão em contato. Para simplificar a simulação, considera-se apenas um planeta em contato com o sol, já que esta é uma condição conservadora. Adota-se que o sol tem o centro engastado, o planeta está montado em rolamento e possui o braço parado e o anel possui um torque de 300 N.m. O objetivo da simulação é obter a menor espessura de engrenagem que resista aos carregamentos mencionados. Assim, foi parametrizado a tensão e a espessura, onde a tensão é dada por vonMises e a espessura é variável em função dessa tensão. Observa-se então na Fig. 6 que para a espessura de 14mm o contato mais crítico, entre sol e planeta, possui uma tensão abaixo do que a tensão de escoamento do material. A Fig. 7 mostra que a tensão de contato entre as faces dos dentes, corresponde à condição crítica de resistência mecânica, onde a tensão tem seu valor máximo de 39,79 MPa e que mesmo assim encontra-se abaixo da resistência do nylon de 139 MPa.

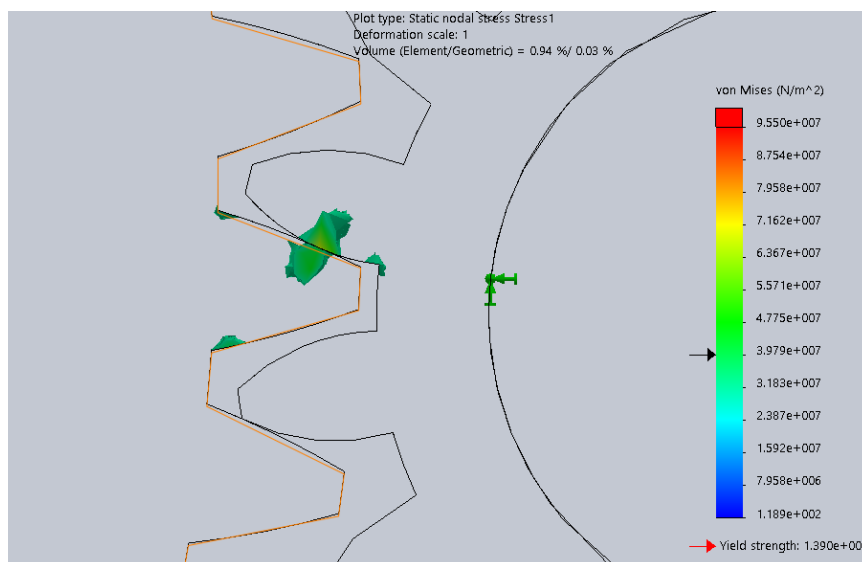


Figura 7. Tensão máxima localizada no ponto de contato entre o sol e o planeta.

Como o sol e o planeta possuem o ponto de tensão máxima, todos os outros elementos de engrenagem são dimensionados a possuir a mesma espessura, sendo assim mais barato para adquiri-los, garantindo a resistência dos outros elementos que compõem esse sistema planetário.

Depois do sistema de armazenamento calculado acima, há a necessidade de projetar um sistema de descarregamento dessa energia acumulada. A melhor forma de fazê-la é utilizar o princípio planetário e nesta condição transferir a potência de volta para a roda, fazendo assim a bicicleta acelerar.

Para o descarregamento dessa energia o volante, que possui a mesma velocidade angular do sol do sistema de armazenamento, passa a ser o sol desse segundo sistema planetário de transmissão. Como a máxima energia deve ser devolvida para a roda, o volante é projetado a ter dentes em sua extremidade e passa a ser o sol para esse sistema planetário. Também sabe-se que o diâmetro externo máximo do anel é igual ao diâmetro interno da roda e que a relação de transmissão é de redução, pelo fato de que o anel nesse cenário é a saída de energia e é maior do que o sol. Na ocasião, retoma-se o mesmo módulo das engrenagens calculada para o sistema de absorção de energia, iniciando então os cálculos dos outros componentes da planetária pelas Eq. (6), (7), (8), (9), (10) e (11). O uso de uma planilha eletrônica facilita a iteração entre os dados disponíveis, obtendo-se assim o módulo das engrenagens, número de dentes no sol, nos planetas e no anel, a relação de redução, a distância entre centros e o número de planetas para todo sistema. A Tab. 1 mostra o resultado do dimensionamento das engrenagens do sistema de devolução de energia do volante para a roda.

Tabela 1. Valores obtidos para o dimensionamento do sistema de aceleração.

Na (dentes anel)	168
Ns (dentes sol)	128
Np (dentes planetas)	20
n (número de planetas)	4
Condição inteiro	74
Engrenamento distribuído	Sim
Módulo	3
Diâmetro anel (mm)	522
Distância entre centros (mm)	222
Relação Total	0.762

A resistência desse mecanismo também é projetado a partir do mesmo software computacional utilizado no dimensionamento anterior. Para essa ocasião, prevê-se de acordo com a relação velocidade e torque que os maiores esforços estão no contato entre os planetas e o sol. A simulação possui o mesmo objetivo de identificar a melhor espessura para que os dentes suportem as cargas. Faz-se então uma simplificação do problema para apenas um planeta em contato com o sol e com o anel. Nesta configuração de devolver a energia para a roda, o sol possui o torque e está montado em rolamento, o planeta tem o movimento do braço parado e também é livre para rolar. O anel então é a saída da energia para a roda, possui a resistência contra o movimento é considerado engastado, que é a hipótese da aceleração partindo da velocidade zero. Portanto a Fig. (8) demonstra a análise de tensão por vonMises, no contato da engrenagem do planeta com o sol quando o volante possui torque de 395 N.m que é na condição de máximo acúmulo de energia no sol.

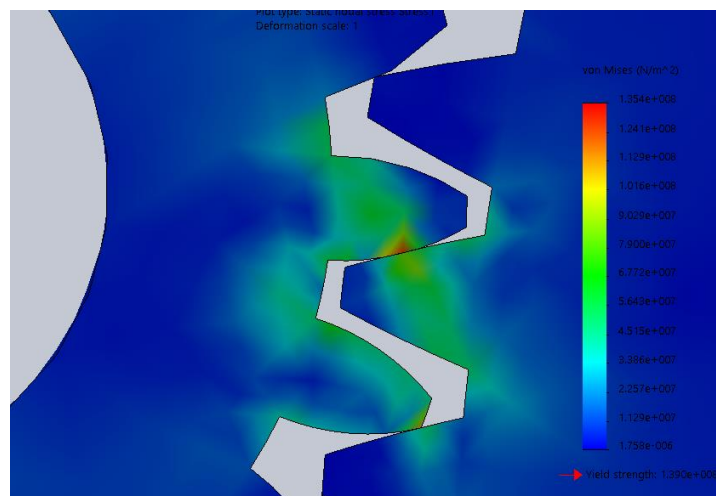


Figura 8. Análise de tensão por vonMises no engrenamento do sol com o planeta.

Identifica-se a partir da análise da Fig. (8) que para uma espessura de 13mm é o suficiente para suportar as tensões envolvidas em todos os elementos sem que haja escoamento do material. Com esse cenário, a utilização de 14mm de espessura acarretará em uma melhor condição de fabricação ou compra dos materiais.

3.3. Componentes Auxiliares

O controle de recuperação e de aceleração depende de componentes auxiliares para limitar o movimento dos braços em que as engrenagens se encaixam. Da mesma forma, restringir o acionamento quando não é necessário evita o excesso de esforço do ciclista ou seja, evitar que ao pedalar o ciclista alimente a rotação da *flywheel* e que reduza-se ao mínimo as perdas por atrito entre as engrenagens do sistema planetário. Para que as condições acima sejam satisfeitas, elementos comuns as bicicletas são utilizados como freios a disco convencional e catracas.

Durante a frenagem, para que o sistema planetário recupere a energia, o movimento do braço que suporta as engrenagens deve ser parado, assim toda a energia do anel é transferida para o sol que alimenta o volante. O sistema adotado para restringir o movimento do braço são freios convencionais, pela eficiência de frenagem, baixo custo e alta durabilidade. Portanto, ao ciclista acionar a manopla de freio, ele estará efetivamente utilizando freios como elemento de fricção para paralisar o braço da planetária. Como o princípio planetário é o mesmo para o sistema de aceleração da bicicleta, um segundo freio deve ser empregado para limitar o braço da segunda planetária, assim liberando a energia contida na *flywheel* para a roda.

Já as catracas, são montadas juntas com os freios para que controle o sentido de giro dos planetas, assim evitando que durante as pedaladas do ciclista, a *flywheel* não esteja em modo de recuperação de energia, dificultando o movimento da bicicleta. Também, o uso das catracas controlará a aceleração somente quando o segundo freio for acionado.

3.4. Montagem do KERS

Softwares de CAD 3D são ferramentas do cotidiano do engenheiro, pois com elas é possível desenhar e montar os componentes virtualmente. Com os recursos avançados de biblioteca e caixa de ferramentas integrado a esses programas, o projetista é capaz de selecionar peças de acordo com normas e padrões, ou até mesmo diretamente do fabricante. Para as planetárias, utiliza-se a biblioteca de itens para especificar cada engrenagem, como anel, planetas e sol. No caso dos rolamentos, é possível acessar o catálogo da *SKF* dentro do programa e seleciona-los. Os elementos comuns para bicicletas, como a roda e pneu, os freios e as catracas, são escolhidos a partir da comunidade virtual *GrabCad* (GrabCAD, 2015). As tolerâncias e acabamento não são consideradas para esse projeto. Embora os itens principais tenham fontes de desenhos 3D das peças, alguns componentes são esboçados especificamente para o sistema proposto, como por exemplo os braços do sistema planetário, eixo de ligação entre sol e volante e fixadores do anel com a roda.

Com todos os itens necessários no programa, montou-se então uma lista completa dos itens que compõe o KERS assim como mostrado na Fig. (8).

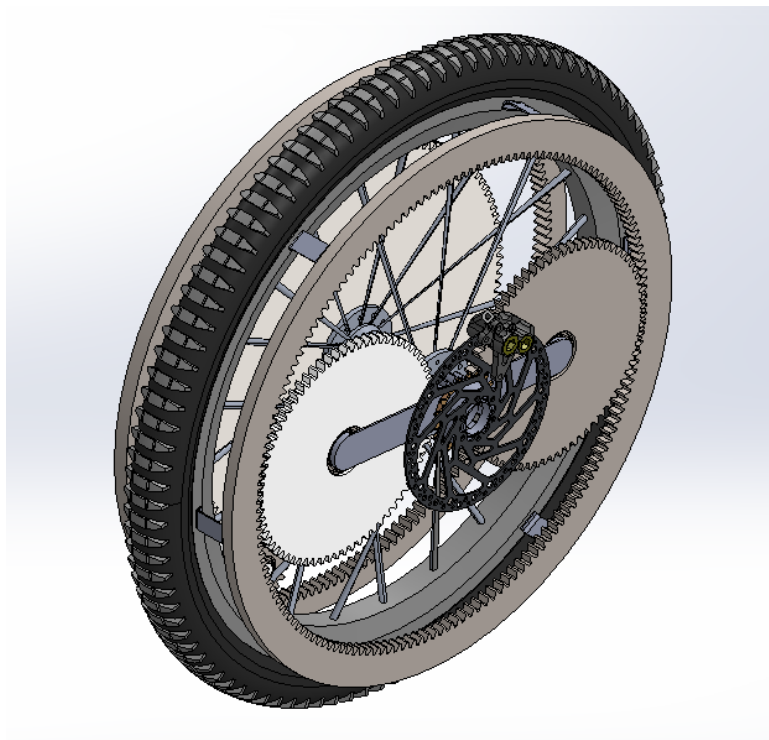


Figura 8. Montagem completa do KERS.

Ao longo do processo de montagem, realizou-se diversas simulações de movimentos para identificar interferências e a sequência de acionamento do sistema. Assim, com as simulações obteve-se a orientação da catraca e assegurou a eficácia na transferência de energia entre a roda e o volante e vice e versa.

A vista explodida do primeiro sistema planetário, Fig. (9), apresenta a sequência de montagem do KERS em uma roda de bicicleta, exibindo o conjunto de freio e catraca, os planetas e os rolamentos, o sol, o eixo e o rolamento, e o cubo da bicicleta com o rolamento.

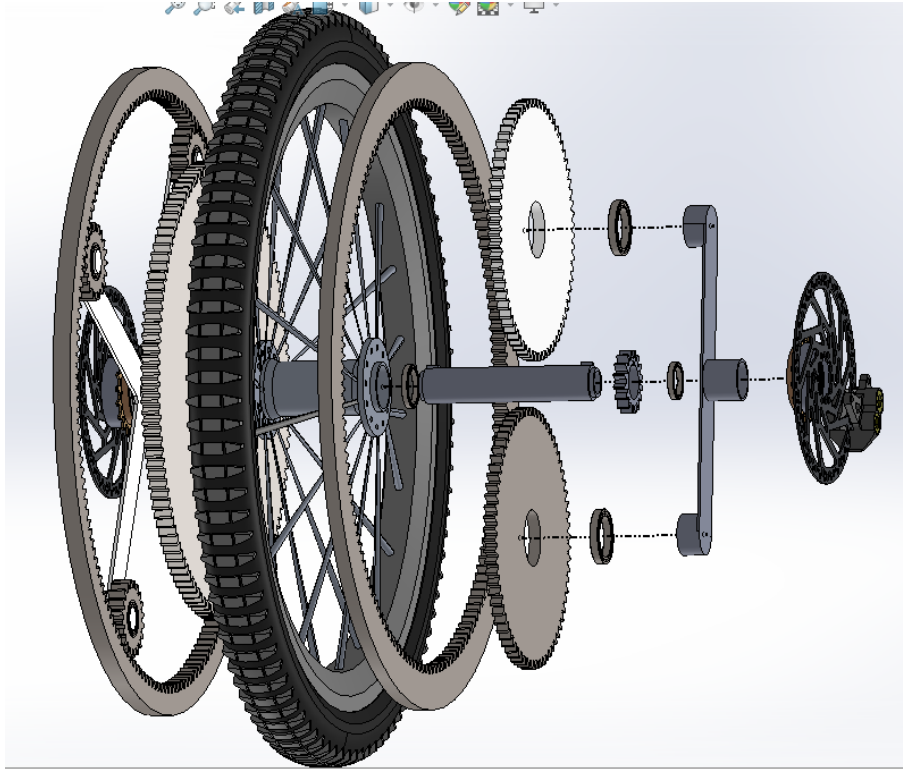


Figura 9. Vista explodida do KERS.

O software também é capaz de gerar uma lista de itens necessários e as quantidades, com isso uma análise de custo pode ser realizada. A Tab. (2) expõe todos os componentes necessários e os valores em dólares de cada um.

Tabela 2. Lista de itens para montagem do KERS.

ITEM NO.	DESCRIÇÃO ITEM	OBSERVAÇÃO	QTD.	PREÇO UNIT.	Total
1	Anel 3M 160T 20PA 12FW --- S160S550OD 1AF	Nylon	1	\$ 4.00	\$ 4.00
2	Planeta 3M 72T 20PA 10FW --- S72N75H50L48N	Nylon	2	\$ 2.00	\$ 4.00
3	Sol 3M 16T 20PA 10FW --- S72N75H50L48N	Nylon	1	\$ 2.00	\$ 2.00
4	Braço simples	Nylon	1	\$ 3.00	\$ 3.00
5	Freio	Jogo Completo	2	\$ 10.00	\$ 20.00
6	Catraca simples		2	\$ 10.00	\$ 20.00
7	AFBMA 12.1.4.1 - 0350-47 - 28,SI,NC,28_68	Rolamento	2	\$ 4.50	\$ 9.00

8	AFBMA 12.1.4.1 - 0250-32 - 34,SI,NC,34_68	Rolamento	1	\$ 4.50	\$ 4.50
9	Eixo 140, OD 28	Aço 1020	1	\$ 2.00	\$ 2.00
10	Roda Bike	Aro 26"	1	\$ 11.50	\$ 11.50
11	AFBMA 12.1.4.1 - 0300-37 - 40,SI,NC,40_68	Rolamento	2	\$ 4.50	\$ 9.00
12	Sol 2 3M 98T 20PA 15FW --- S20N75H50L32N	Aço 1020	1	\$ 6.00	\$ 6.00
13	Anel 2 - 3M 168T 20PA 15FW --- S168S550OD 1AF	Nylon	1	\$ 3.00	\$ 3.00
14	Planeta 2 - 3M 20T 20PA 15FW --- S20N75H50L32N	Nylon	4	\$ 2.00	\$ 8.00
15	AFBMA 12.1.4.1 - 0200-32 - 18,SI,NC,18_68	Rolamento	4	\$ 4.50	\$ 18.00
16	Braço 4 suportes	Nylon	1	\$ 2.00	\$ 2.00
Total			27		\$126.00

A descrição dos itens contém informações extraídas das bibliotecas padrão, permitindo a obtenção de todas as características do componente e viabilizando a troca de fornecedor caso necessário. Os valores são concebidos em dólares para uma tornar esse trabalho atemporal. Os rolamentos e as engrenagens em nylon são orçadas automaticamente pelo programa, enquanto que a roda, os freios e as catracas são estimados a partir de consultas em lojas locais.

4. CONCLUSÃO

No desenvolvimento de um sistema mecânico de recuperação por energia cinética para bicicletas, estudou-se a lei de conservação da energia, para estipular quanta energia cinética pode ser reaproveitada em uma frenagem. A partir do resultado, procedeu-se para a seleção e o dimensionamento do sistema de armazenagem de energia por meios de um volante. Posteriormente o projeto e análise cinemática de uma transmissão planetária garantiu a máxima armazenagem de energia possível e com poucas alterações estruturais na bicicleta.

O projeto é desenvolvido aos ciclistas urbanos que ao longo do seu trajeto precisam de várias frenagens para obedecer aos sinais de trânsito e dobrar esquina por exemplo. Durante esse trabalho, levou-se em consideração vários requisitos de projeto, como baixo peso e dimensões do sistema, fácil montagem do conjunto pelo usuário e a eficácia de armazenamento de energia.

A utilização de volantes para rápidos ciclos de carga e descarga atende as necessidades do KERS para bicicleta já que o ciclista, por exemplo, freia para parar em um sinal de trânsito e logo em sequência deseja acelerar. Por meio do dimensionamento do volante, pode-se identificar que o volante deve ter a massa concentrada no maior raio e rotação possível para reduzir a massa do sistema de modo a aumentar a inércia do sistema. Ou seja, um volante de 4 kg e raio de 20cm girando 10 vezes mais rápido que a roda é capaz de armazenar toda energia cinética da bicicleta e do ciclista. Essa rotação é alcançável por dois sistemas planetários com freios convencionais nos braços de apoio dos planetas que seja montado na roda da frente da bicicleta. Escolheu-se o Nylon como material das engrenagens devido sua relação peso por resistência mecânica e também a característica de auto lubrificação.

Observa-se então nesse projeto algumas desvantagens implícitas no sistema planetário, como o desgaste das engrenagens e o grande número de componentes em atrito, que causam redução significativa da eficiência do KERS. Outra desvantagem é que todos itens possuem massa e giram, tornando-os em pequenos volantes que também retiram energia do sistema e que por sua vez não transmite 100% da energia disponível. Por último destaca-se que um protótipo físico é necessário para mensurar a eficiência global do sistema.

Porém, sobressaem-se as vantagens do projeto que tem baixo peso e alta capacidade de armazenamento de energia. O controle total da frenagem e da aceleração é uma notável característica desse projeto, bem como o conforto e segurança do ciclista ao ter todo o sistema embutido na roda dianteira. A aplicabilidade desse KERS também é um avanço ao comparar com o Ludlum, pois é possível obter todas as vantagens do sistema com apenas a troca da roda dianteira, isso

significa que dependendo o trajeto, o ciclista pode optar por colocar ou tirar o KERS com facilidade. Inclusive, o descarte de todos os componentes é de baixo impacto ambiental e passível de reaproveitamento ou reciclagem.

A comparação econômica não pode ser realizada pelo fato de que não foi encontrado produto da mesma categoria com o detalhamento de custos, porém acredita-se que mesmo que no modelo alternativo os custos dos itens são inferiores devido a menor quantidade de componentes, as alterações estruturais levam ao consumidor final a necessidade de adquirir uma bicicleta inteira, elevando o valor global do projeto comparado.

Os próximos passos para esse projeto é construir um modelo para testes do mecanismo, utilizando a impressão 3D como primeira aproximação e posteriormente a construção de um protótipo usinando as engrenagens em nylon nos laboratórios do IFRS – *Câmpus Farroupilha*.

5. REFERÊNCIAS

- Brandt, J. (1993). *The Bicycle Wheel Third Edition*. Palo Alto: Avocet.
- Chibulka, J. (2009). Kinetic Energy Recovery System by means of Flywheel Energy storage device. *Advanced Engineering*, 27-38.
- Clarke, P., Muneer, T., & Cullinane, K. (2010). Cutting vehicle emissions with regenerative braking. *Transportation Research Part D* 15, 160-167.
- Clegg, S. J. (1996). *A Review of Regenerative Braking Systems*. Leeds: Institute of Transport Studies, University of Leeds.
- Dorgham, M. A. (1982). *Ford energy report : proceedings of the International Association for Vehicle Design*. Saint Helier: Inderscience Enterprises.
- Fletcher, R. G. (1993). Regenerative equipment for railway rolling stock. *Power Engineering Journal*, Volume 5, Issue 3, pp. 105-113.
- GrabCAD. (2015). *Workbench*. Acesso em 18 de 08 de 2017, disponível em GrabCad: <www.grabcad.com>
- Hebner, R., Beno, J., & Walls, A. (Abril de 2002). Batteries Come Around Again. *Power - IEEE SPECTRUM*, pp. 46-51.
- Horn, H. (2012). *Understanding, Selecting and Applying Planetary Gearheads*. Wood Dale: Thomson Industries Inc.
- Hua, C.-C., & Kao, S.-J. (2011). Design and Implementation of a Regenerative Braking System for Electric Bicycles Based on DSP. *6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, (pp. 703-707). Singapore.
- Ingole, P., & Mahure, A. (2016). Design of Flywheel Used as KERS in Bicycle. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 894-898.
- Joeri Van Mierlo, P. V. (2004). Models of energy sources for EV and HEV: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators. *Journal Power of Sources*, 76-89.
- Kohara, T. (2009). *KHK Technical Information*. Nakacho.
- Ludlum, K. (June de 2013). *Optimizing Flywheel Design for use as a Kinect Energy Recovery System for a Bicycle*. New York: Senior Thesis at Cooper Union.
- Mott, R. (2014). *Machine Elements in Mechanical Design*. Dayton: Pearson.
- Naik, K., & Panesar, M. (1987). Analysis and Performance of a chopper fed dc separately excited motor under regenerative braking operation. *ELECTRIC MACHINES AND ELECTROMECHANICS, VOLUME 12.*, 123-142.
- Nandy, K., Karthikeyan, K., Winston, N., Sandle, F., & Varghese, B. M. (5 de Maio de 2017). Design and Analysis of Kinetic Energy Recovery System in Bicycles. *International Journal on Research Innovations in Engineering Science and Technology*.
- Sevatkar, S., Pise, E. M., Nagalkar, R. R., Tekade, V. R., & Ghawade, P. S. (Abril de 2016). Design and Fabrication of Flywheel on a Bicycle Used As Kinetic Energy Recovery System. *International Journal For Engineering Applications and Technology*, pp. 25-31.
- Todorov, G., Kamberov, K., Semkov, M., & Nikolov, N. (2011). Concept and Design of Kinetic Energy Recuperation System. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 183-188.
- Trust, B. M. (2005). *Trevithick Locomotive*. Birmingham: Birmingham Museums Trust Science Museum.
- Uicker, J. J., Pennock, G. R., & Shigley, J. E. (2003). *Theory of Machines and Mechanisms*. New York: Oxford University Press.
- VanGelder, K. (2017). *Fundamentals of Automotive Technology*. Burlington: Jones and Bartlett Learning.

KINECT ENERGY RECOVERY SISTEM FOR BIKES

Francisco de Assis da Silva Junior, fassiljunior@gmail.com¹
Sérgio Wortmann, sergio.wortmann@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Câmpus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95180-000, Farroupilha – RS

Abstract: *This work has the purpose of designing a kinetic energy recovery system for urban bicycles, so that cyclists reuse energy from the constant braking and thus reduce the effort to move. To determine the amount of energy to be recovered, with the right of energy conservation, and initially a quantity of kinetic energy available by the cycling and cycling assembly is calculated. The chosen storage system, flywheel, and then scaled for total energy recovery. A whole transmission of power made by the planetary system. Structural simulation software is used for the sizing of the emissions of the gears as well as the CAD program for assembly and simulation of movements of the complete system. The search for a weekly system structured as a result of obtaining a KERS located only on the front wheel, it being possible to acquire the complete interchangeable system for any bike model, reducing the price for a ready product purchase.*

Keywords: *KERS, kinetic energy recovery, bike, simulation.*