

GUSTAVO SANTOS COSTA

**VIABILIZAÇÃO DA APLICAÇÃO VOLANTE DE INÉRCIA
DE ALTA VELOCIDADE EM LOCOMOTIVAS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2017

GUSTAVO SANTOS COSTA

**VIABILIZAÇÃO DA APLICAÇÃO VOLANTE DE INÉRCIA DE ALTA
VELOCIDADE EM LOCOMOTIVAS**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado na graduação em
Engenharia Aeronáutica da
Universidade Federal de Uberlândia,
como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Engenheiro
Aeronáutico.

Orientador: Prof. Dr. Aldemir
Aparecido Cavallini Junior.

UBERLÂNDIA

2017

Página intencionalmente deixada em branco.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus.

Aos meus pais, Adelicio Marcelino da Costa e Selma Aparecida dos Santos, pelo incentivo incondicional à minha formação desde a escola primária. Ao meu irmão, Matheus Santos Costa, pelo companheirismo e conselhos.

Aos amigos que sempre estiveram presentes em todos momentos, difíceis ou bons, à 4ª turma de Engenharia Aeronáutica e à minha namorada, Camila Pereira Paes Leme, por todo carinho e apoio.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavallini Junior, por toda atenção e ensinamentos essenciais para construção do presente trabalho.

A todos as pessoas relacionadas a minha formação como Engenheiro Aeronáutico.

À Universidade Federal de Uberlândia e à companhia Valor da Logística Integrada – VLI.

Página intencionalmente deixada em branco.

Costa, G. S., **Viabilização da Aplicação de um Volante de Inércia de Alta Velocidade em Locomotivas**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

RESUMO

Este trabalho contempla projeto conceitual de um volante de inércia de alta velocidade, também chamado como *Flywheel*, para aplicação em uma locomotiva, afim de reduzir gastos com combustível em operações de manobra de vagões. Por isso, é realizada uma revisão bibliográfica dos componentes necessários para concepção, assim como a determinação do sistema de equações utilizados para o dimensionamento. Em seguida, é produzido o projeto conceitual do instrumento, vislumbrando a otimização da geometria do volante pelo algoritmo genético, bem como os requisitos técnicos dos demais componentes.

Palavras chave: *Flywheel*; Locomotiva; Algoritmo Genético; Alta Velocidade.

Costa, G. S., **Viability of the Application of a High Speed Inertia Wheel in Locomotives**. 2017. Work Course Conclusion, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG.

ABSTRACT

This work contemplates the feasibility of a inertia wheel of high speed, also called as Flywheel, for application in a locomotive, in order to reduce expenses with fuel in maneuver operations of wagons. Therefore, a bibliographic review of the components required for project is carried out, as well as the determination of the system of equations used for the design. Then, the conceptual project of the instrument is produced, glimpsing the optimization of the wheel geometry by the genetic algorithm, as well as the technical requirements of the other components.

Keywords: Flywheel; Locomotive; Genetic Algorithm; High Speed.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
Lista de Figuras	10
Lista de Tabelas	11
1. Introdução.....	12
1.1. Contextualização do estudo	12
1.2. Objetivo do estudo	14
1.3. Organização do trabalho	15
2. Revisão bibliográfica.....	16
2.1. Volante	16
2.2. Máquina Elétrica	19
2.3. Câmara de vácuo	22
2.4. Mancais	23
2.5. Locomotiva	25
3. Modelo Matemático	28
3.1. Cálculo energia armazenada	28
3.2. Análise das tensões	29
3.3. Força de levitação do mancal magnético	31
4. Projeto Conceitual	33
4.1. Dados	33
4.2. Otimização das dimensões da <i>Flywheel</i>	34
4.3. Dimensionamento mancal magnético	35
4.4. Dimensionamento bomba de vácuo	37
5. Conclusão	38

ANEXO I.....	39
REFERÊNCIAS	41

Lista de Figuras

Figura 1 - Réplica de volante de inércia idealizado por Leonardo da Vinci	12
Figura 2 - Partes e montagem de uma <i>Flywheel</i>	13
Figura 3 - Vistas em perspectiva e frontal de esquema de máquina a relutância chaveada 6/4 por Silveira (2010).....	20
Figura 4 - Máquina de Relutância chaveada 18/12.	21
Figura 5 - Motor/gerador de indução AC.	21
Figura 6 - Bomba de vácuo Anel Líquido.	23
Figura 7 - Mancal magnético ativo.....	24
Figura 8 - Esquema de montagem do mancal magnético.....	25
Figura 9 – Locomotiva SD70MAC.	26
Figura 10 - Motor de tração 1TB2630 com especificações.....	27
Figura 11 – Forças em uma roda com espessura e densidade uniforme.....	30
Figura 12 - Demonstrativo de tensões e raios no volante.....	31
Figura 13 - Força de levitação [N] em função da distância do ímã permanente e o supercondutor.	36
Figura 14 – Fluxograma Algoritmo Genético	39

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tipos de volante com o fator K de forma.....	17
Tabela 2 - Propriedades de materiais para construção do volante.....	18
Tabela 3 - Propriedades de materiais usados em <i>Flywheel</i>	18
Tabela 4 - Empresas especializadas em produção com material composto.	18
Tabela 5 - Empresas especializadas em <i>Flywheels</i> e componentes.....	21
Tabela 6 - Empresas fabricam/comercializam bomba a vácuo Anel Líquido.....	23
Tabela 7 - Empresas que fabricam/comercializam mancais magnéticos.	25
Tabela 8 - Ficha Técnica Locomotiva Diesel Elétrica SD70MAC.	26
Tabela 9 - Valores das variáveis h, r e r_o para sementes distintas.....	35

1. Introdução

1.1. Contextualização do estudo

Até os dias atuais, foram criadas diversas máquinas para auxiliar na produção de materiais consumíveis, transporte, armazenamento de dados, ou seja, nas mais variadas atividades do cotidiano da sociedade. Para o funcionamento dessas máquinas, foram desenvolvidas fontes de energia que se tornam mais eficientes a cada dia. Além da geração da energia, armazená-la para o uso futuro é um assunto usual entre os projetistas que são atraídos por opções envolvendo o uso de baterias e células de carga, porém uma tecnologia, pioneiramente empregada por Leonardo da Vinci, pode ser a solução mais eficiente para tal impasse, segundo PATRÍCIO (2011).

Em meados de 1497, Leonardo da Vinci construiu uma máquina apresentada na Figura 1, idealizando que conforme a velocidade angular das esferas aumentava e consequentemente a energia, mais fácil seria rodar a máquina. Portanto, esse sistema pode ser usado para armazenar energia com a rotação das esferas.



Figura 1 - Réplica de volante de inércia idealizado por Leonardo da Vinci (PATRÍCIO, 2011)

Os volantes de inércia, conhecidos também como *Flywheels*, são rodas que giram em grandes velocidades, armazenando energia mecânica que será transferida para, e a partir, do

volante por uma máquina elétrica. Um instrumento moderno do tipo apresenta baixíssimas perdas energéticas. Devido ao uso de mancais magnéticos, que extinguem qualquer contato das partes girantes com as fixas. E câmara à vácuo no espaço de rotação da roda com a finalidade de reduzir significativamente, aproximando de zero, a taxa de atrito com o ar (veja a Figura 2). Essas especificações fazem com que a *Flywheel* seja muito mais eficiente que as baterias de última geração, as quais costumam perder 20% de sua energia em processos químicos internos.

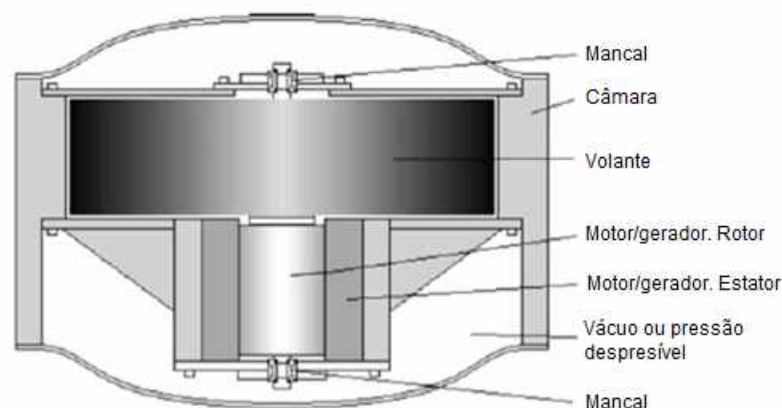


Figura 2 - Partes e montagem de uma *Flywheel* (DIAS, 2013).

Antigamente, as *Flywheels* tiveram seu uso limitado devido às limitações físicas e aos perigos advindos caso o volante fraturasse, com a formação de projéteis com grande quantidade de movimento. Velocidades angulares altas, de aproximadamente 60.000 RPM (McLALLIN, 2001), inviabilizavam o projeto pela robustez necessária para impedir a falha do instrumento fabricado com os materiais disponíveis na época. Com o avanço dos materiais compósitos, que apresentam grande relação do coeficiente de escoamento e peso, foi possível reduzir as dimensões destas rodas e a tecnologia se tornou novamente atraente.

Segundo a literatura, com todas as atualizações do sistema de *Flywheels*, estes instrumentos passaram a eficiências energéticas da ordem de 90 a 95% (PATRÍCIO, 2011; ELMANN, 2009), o que é muito superior a outros sistemas de armazenamento de energia. As baterias e as células de carga, por exemplo, que desperdiçam energia em reações químicas internas, apresentam uma eficiência energética que varia de 80 a 85%. Ainda por conta das reações químicas que são relativamente lentas, a densidade de potência destes últimos sistemas é pequena, ou seja, caso a demanda por energia seja grande em pequeno intervalo de tempo, as baterias e células de carga não são indicadas para tal tarefa, enquanto as *Flywheels* altamente

recomendadas. Além disso, o tempo de recarga e descarga para as baterias e células de carga é longo, enquanto no sistema estudado é da ordem de segundos (LEIJON et al., 2005).

Apesar da alta densidade de potência, estes instrumentos são adequados para o intercâmbio entre médias e altas potências durante curtos períodos de tempo, sendo capazes de realizarem esta operação por centenas de milhares de ciclos e independente da temperatura do ambiente (LANES, 2012). Portanto, a vida útil de uma *Flywheel* é muito longo, maior do que 20 anos.

Ainda com todos os avanços já constatados para utilização das *Flywheels*, o sistema ainda não é totalmente seguro. A principal desvantagem deste sistema é se falhar o controle de velocidade, dessa forma o sistema poderia aumentar sua velocidade além do projetado e entrar em regime de sobrecarga.

No mercado, já existem empresas comercializando produtos com *Flywheels* aplicadas em estabilizadores de potência, sistema UPS (*Uninterruptible Power Supply*), sistema fotovoltaico e filtros harmônicos. Além disso, a bordo da Estação Espacial Internacional, uma unidade de armazenamento *Flywheel* substituiu uma bateria; a comparação entre os dois instrumentos mostrou que o volante de inércia é 35% mais leve e reduziu em 55% o volume ocupado, apresentado na dissertação de MARQUES (2008).

1.2. Objetivo do estudo

As empresas que contém concessão das ferrovias brasileiras, convivem com o alto consumo de combustível e/ou energia elétrica para rebocar vagões com suas locomotivas¹. Pensando na redução dos gastos com combustível destas empresas, o presente trabalho objetiva o projeto conceitual de uma *Flywheel* para armazenar energia da frenagem de uma locomotiva. Tal energia será futuramente empregada na aceleração da locomotiva, diminuindo assim o consumo de diesel ou energia elétrica.

¹ Locomotiva: veículo ferroviário que fornece a energia necessária para a colocação de um comboio ou trem em movimento; as locomotivas não têm capacidade de transporte própria, quer de passageiros, quer de carga.

1.3. Organização do trabalho

Para melhor interpretação e organização da estrutura, o presente trabalho foi dividido em cinco itens e um anexo, incluindo este que é o introdutório. Neste capítulo foram apresentados uma contextualização e o objetivo do estudo.

O Item 2, Revisão Bibliográfica, aborda os componentes presentes em uma *Flywheel*, como o volante, máquina elétrica, câmara à vácuo e mancais magnéticos.

O Item 3, Modelo Matemático, apresenta a formulação para o cálculo da capacidade de armazenamento de energia, análise das tensões sobre o volante e cálculo da força de levitação dos mancais.

O Item 4, Projeto conceitual, é dedicado à execução do projeto com a utilização do algoritmo genético.

O Item 5, Conclusão, compreende a conclusão sobre o projeto conceitual de aplicação de uma *Flywheel* em uma locomotiva.

O Anexo I, apresenta uma breve explicação da aplicação e modo de funcionamento do algoritmo genético.

2. Revisão bibliográfica

O sistema de armazenamento Volante de Inércia, após vários séculos da exposição do seu conceito por Leonardo Da Vinci, retorna a ser estudado por especialistas do assunto. Prometem com a modernização e otimização do sistema, maior eficiência energética que qualquer bateria ou célula de carga existente, menor tempo para recarga, maior potência liberada e número ilimitado de ciclos de carga e descarga. Porém, é importante ter consciência dos riscos do uso deste instrumento e da sua operação, pois com velocidades angulares extremamente altas, as tensões sobre o volante são exorbitantes, o atrito com o ar e nos mancais poderiam literalmente desintegrar o volante e o eixo. Os fragmentos resultantes poderiam ser letais para todos que estejam próximos ao instrumento. Para suportar os efeitos da grande velocidade, os materiais empregados devem ser mais eficientes, logo apresentam valores elevados. Informações apresentadas em LEIJON et al. (2005).

Uma *Flywheel* é uma montagem complexa de vários componentes, dos quais existem no mercado diversos tipos, tamanhos e eficiências. Para o projeto de um volante de inércia atender aos requisitos impostos, e ao mesmo tempo não ultrapassar o orçamento é essencial que o projetista tenha conhecimento dos modelos de componentes à sua disposição. Por isso, para servir como base do Capítulo 4 – Projeto Conceitual, no qual será projetado conceitualmente uma *Flywheel* para uma locomotiva elétrica. No capítulo 2, será exibido vários tipos de volante, materiais utilizados, modelos de máquinas elétricas e de câmaras de vácuo, além de empresas que já estão no mercado comercializando estes componentes.

2.1. Volante

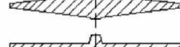
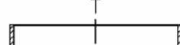
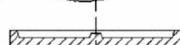
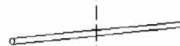
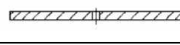
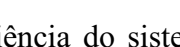
Nas *Flywheels*, o componente que conserva a energia é o volante, que com sua velocidade de rotação armazena energia cinética que mais tarde será convertida em energia elétrica, esse ciclo acontece inúmeras vezes. A energia cinética é diretamente proporcional ao momento de inércia do volante e à sua velocidade angular ao quadrado, portanto o quanto maior forem estes parâmetros maior energia será armazenada, conforme dito por ATALLAH et al. (2014) e BANKSTON et al. (2014). Como efeito colateral, são geradas grandes tensões centrífugas que dependendo do material, pode até fazê-lo escoar, assim, literalmente aumentar o diâmetro deste componente, ou fraturá-lo.

O volante deve conter também, um balanceamento preciso. Caso esse requisito seja negligenciado, as tensões podem se concentrar em uma região específica do volante. A eficiência energética do instrumento pode diminuir, surgirão vibrações inesperadas e, ainda, possível falha da estrutura.

Antigamente, um fator limitante dos projetos das *Flywheels* eram as grandes dimensões necessárias para suportar as tensões quando se utilizava metais na construção do volante (EL-MANN, 2009). Com os recentes estudos dos materiais compósitos, foi possível reduzir o tamanho e aumentar ainda mais a velocidade angular final deste componente, pelo grande coeficiente de escoamento e baixa densidade desses materiais. Portanto, obteve-se uma elevada energia específica com os materiais compósitos, porém os preços destes materiais variam de 10 a 100 vezes mais caros que os metais convencionais (DIAS, 2013).

Dessa forma a construção do volante é um assunto crítico de projeto, pelos grandes esforços centrífugos que são impostos à sua estrutura. Na Tabela 1 são propostos os tipos de volantes para sua construção, na Tabela 2 os possíveis materiais a serem utilizados com suas respectivas densidades, tensão máxima de tração densidade de energia e valor por quilo. Outras propriedades são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 1 - Tipos de volante com o fator K de forma (DIAS, 2013).

Geometria da <i>Flywheel</i>	Secção Central	Fator de forma K
Disco		1,000
Disco de tensão constante modificado		0,931
Disco cônico		0,806
Disco plano sólido		0,606
Cilindro de espessura fina		0,500
Barra moldada		0,500
Roda com raio		0,400
Barra única		0,333
Barra delgada perfurada		0,305

O fator de forma pode ser associado à eficiência do sistema devido ao fato de que, quando a energia específica de 100% do material pode ser convertida em energia específica da forma e da massa, K é igual a 1, conforme BANKSTON et al (2015).

Tabela 2 - Propriedades de materiais para construção do volante (DIAS, 2013).

Material	Densidade (kg/m ³)	Tensão de escoamento (Mpa)	Máxima densidade de energia (para 1 kg)	Custo (\$/kg)
Material Monolítico	7700	1520	0,19 MJ=kg=0,05 kWh/kg	1
Aço 4340				
E-glass	2000	100	0,05 MJ=kg=0,014 kWh/kg	11
S2-glass	1920	1470	0,76 MJ=kg=0,21 kWh/kg	24,6
Carbono T1000	1520	1950	1,28 MJ=kg=0,35 kWh/kg	101,8
Carbono AS4C	1510	1650	1,1 MJ=kg=0,30 kWh/kg	31,3

Tabela 3 - Propriedades de materiais usados em *Flywheel* (DIAS, 2013).

Material	ρ (kg/m ³)	σ (Mpa)	Ev (MJ/m ³)	Em (MJ/m ³)
Alumínio	2700	500	251	93
Aço	7800	800	399	51
Fibra de vidro/Epoxy	2000	1000	500	250
Grafite HM/Epoxy	1580	750	374	237
Grafite HS/Epoxy	1600	1500	752	470

No mercado, nacional e internacional, existem várias empresas que produzem peças/componentes em material compósito conforme necessidade do cliente. Logo, independentemente do formato escolhido pelo projetista, o disco é passível de ser produzido com valor variando conforme complexidade de forma e material gasto. Na Tabela 4 são listadas algumas empresas e seus respectivos países sede.

Tabela 4 - Empresas especializadas em produção com material composto.

EMPRESA	PAÍS
Ardima Industrie Service Böhm Gesellschaft	Alemanha
Barracuda Advanced Composites	Brasil
Carbon Store	Brasil
Carbonex	Brasil
Fibre Glast Developments Corp.	EUA
Hintsteiner Group	Áustria
Ice - Innovative Composite Engineering	EUA
Rock West Composites	EUA
Steinemann Carbon AG	Suíça
Yuyao Xiaoxiao Asbestos Product Co.,Ltd.	China
ZOLTEK	EUA

O ramo de produção utilizando materiais compósitos já é vasto no mercado, porém produtos de qualidade e de valor acessível não são triviais de se encontrar. Devido à

complexidade e várias etapas (molde, montagem, cura, etc.) até a concepção final de uma peça em compósito.

2.2. Máquina Elétrica

Conforme explicado em DIAS (2013), quando a parte girante da *Flywheel*, o volante, sofre a carga de energia, este inicia o seu movimento uniforme acelerado e o mantém enquanto há fornecimento de energia. Ao cessar este fornecimento, o volante deve conservar esta energia, em forma de energia cinética proporcional à sua massa e à sua velocidade angular ao quadrado, por meio do movimento circular uniforme. Quando solicitada a energia, o movimento do volante passa para circular desacelerado, uma vez que sua energia cinética é drenada.

A máquina elétrica apresenta as funções de motor e gerador quando empregada em uma *Flywheel* e é essencial para as etapas de carga e descarga sofridas pelo volante. Conforme mostrado por BERNISMÜLLER (2016), na carga, a função motor é ativada quando o volante está parado, assim precisa de torque para iniciar o giro e, conseqüentemente, armazenar energia cinética. Na descarga, o modo gerador vem à tona, quando o sistema, em que a *Flywheel* está conectada, demanda por energia, a máquina converte a energia cinética do volante em energia elétrica em corrente contínua, por meio de indução de bobinas.

Para funcionar como motor, a máquina elétrica recebe energia elétrica do sistema que está conectado à *Flywheel*, essa energia é transferida para as suas bobinas de forma ordenada, isso gera um campo magnético sobre o eixo do volante que produz torque na direção definida pelo acionamento das bobinas. Quando o sistema demanda por energia ao instrumento, o giro do eixo do volante cria um campo magnético sobre as bobinas, este fenômeno desacelera o volante e induz as bobinas (caracterizadas na Figura 3, como A, B, C, A', B' e C') da máquina elétrica, dessa forma as últimas produzem corrente elétrica que é enviada ao sistema por meio do barramento de conexão. A funcionalidade dupla caracteriza este instrumento como uma Máquina de Relutância (SILVEIRA, 2011).

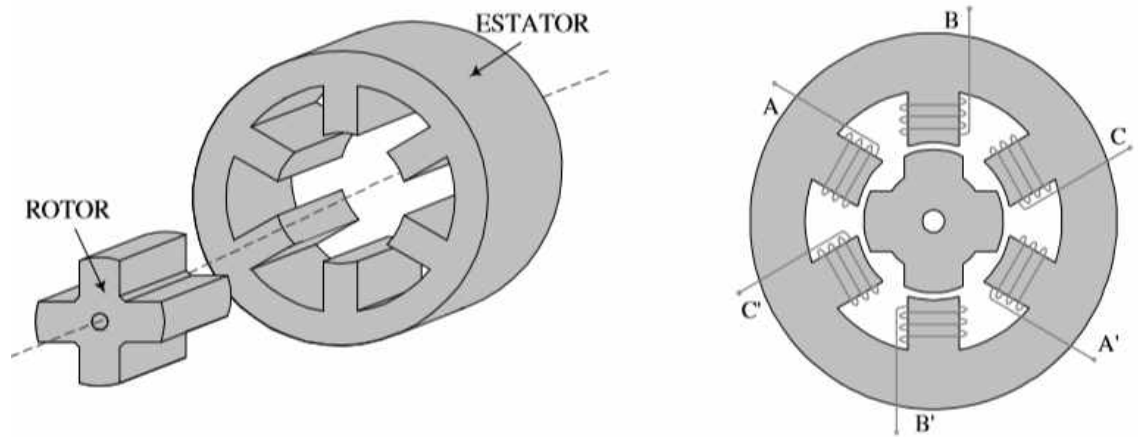


Figura 3 - Vistas em perspectiva e frontal de esquema de máquina a relutância chaveada 6/4 por SILVEIRA (2011).

No esquema da Figura 3, pode-se notar que o Estator apresenta 6 bobinas e o Rotor contém 4 extremidades, por isso a denominação de chaveamento 6/4. O quanto maior o número de bobinas e de extremidades do rotor, mais efetiva é o efeito indutivo do instrumento, e assim, melhor a conversão de energia. Vale destacar, que existem números certo de bobinas para um número de extremidades do rotor e vice-versa. A Figura 4 mostra uma máquina de relutância chaveada 18/12.

Existem tecnologias de maior eficiência para a mesma finalidade, como o motor/gerador de indução com corrente alternada, Figura 5. Porém, este aparelho apresenta grande indução parasita que é convertida em calor. Dessa forma, em altas rotações como encontradas em *Flywheels* é necessário um sistema de arrefecimento próprio.



Figura 4 - Máquina de Relutância chaveada 18/12.

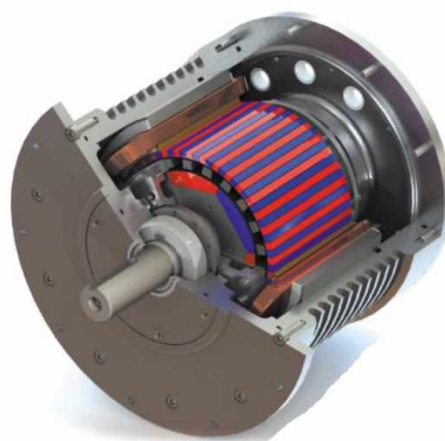


Figura 5 - Motor/gerador de indução AC.

As máquinas elétricas são produzidas por empresas que oferecem soluções elétricas e por especializadas em *Flywheels*. Na Tabela 5 são listadas algumas empresas deste último ramo, mas que fornecem também as máquinas elétricas separadamente.

Tabela 5 - Empresas especializadas em *Flywheels* e componentes.

EMPRESA	PAÍS
Active Power	EUA
Calnetix Technologies	EUA
Energy Storage Association	EUA
MSD - Motion System Design	Coreia do Sul
Socomec	Brasil

2.3. Câmara de vácuo

No passado, o método de armazenamento de energia com volantes de inércia não era interessante pelos fatores limitantes relacionados a este instrumento. Entre os limites indesejados, está a resistência ao giro do volante juntamente com a elevação da temperatura da sua superfície, advindo do atrito viscoso do volante com o ar. Outro limitante, é o atrito dos componentes dos rolamentos presentes no eixo do volante. Além, da grande produção de ruídos e a robustez dos instrumentos para suportar aos esforços advindos da alta rotação.

Uma solução para extinguir a resistência ao giro do volante é a alocação do componente em ambiente com ausência de qualquer fluido. Dessa forma, não haveria choques das moléculas da superfície do disco com moléculas suspensas, logo não há atrito viscoso e nem conversão de energia cinética para térmica, o que traduz em mais eficiência ao armazenamento de energia da *Flywheel* e menor torque exigido para aceleração do movimento angular.

Como o ambiente de trabalho da *Flywheel* é totalmente imerso no ar, uma câmara de vácuo é a melhor opção de projeto, visto que ela reduzirá drasticamente a quantidade de moléculas suspensas do ambiente, já é um conceito difundido no mercado e com várias referências consolidadas, como mostrado em STEMPNIAK (2002). O funcionamento da câmara de vácuo consiste em um volume lacrado, onde uma bomba de vácuo suga o ar, o comprimi para equilibrar com a pressão atmosférica e exausta no ambiente.

Uma das bombas de vácuo com eficiência considerável é a do tipo Anel Líquido ou *Nash* (nome da companhia responsável pelos primeiros exemplares). Na Figura 6, mostra o esquema do tipo Anel Líquido, nome que vem do anel formado pela rotação da água, que movimenta as câmaras do rotor e, assim, suga o ar do cone de admissão (área bege). Conforme o rotor gira, suas câmaras se enchem de ar, que fica confinado entre o rotor e o anel líquido, e é forçado para a janela de exaustão no rotor (área cinza) devido à compressão.

Na Tabela 6 são listadas algumas empresas que produzem e/ou comercializam a bomba a vácuo do tipo Anel Líquido.

Portanto, na câmara de vácuo aloca-se o volante de inércia para que ele possa alcançar e manter maiores velocidades angulares com menor esforço e, assim, armazenar maior energia. Além disso, graças à câmara de vácuo os esforços aerodinâmicos sobre a estrutura do volante

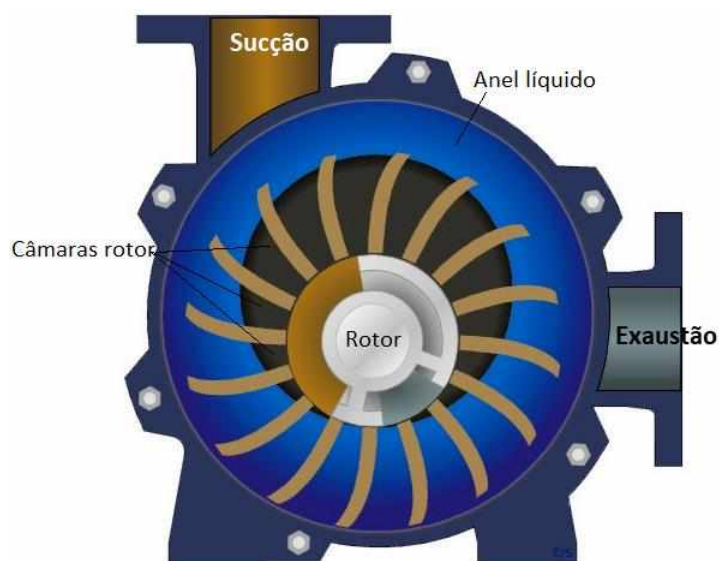


Figura 6 - Bomba de vácuo Anel Líquido.

Disponível em: <<http://www.gdnash.com.br/>>

Tabela 6 - Empresas fabricam/comercializam bomba a vácuo Anel Líquido.

EMPRESA	PAÍS
Gardner Denver Nash	Brasil
OMEL Bombas e Compressores	Brasil
Multivácuo Bombas e Equipamentos Ltda	Brasil
Shanghai Tecwell Machinery Co.,Ltd	China
Dekker Vacuum Techonologies, inc.	EUA

se tornam desprezíveis, assim como as perdas por calor que seria gerado com os choques das moléculas de ar com a superfície do volante. Tudo isso é possível graças ao vácuo parcial que eliminará, quase totalmente, a resistência do ar sobre o giro do volante.

2.4. Mancais

Em uma aplicação que demandará grandes quantidades de energia, se faz necessário a maximização da eficiência do instrumento. Para isso, a dissipação de energia deve ser a mínima possível. Assim, a perda por atrito e desgaste dos mancais rotativos convencionais, será minimizada com os mancais de alta eficiência, ou seja, mancais magnéticos.

Os mancais magnéticos são componentes que mantem um eixo fixo em certa posição com a liberdade de giro, porém não há contato da parte girante (eixo) e da fixa (mancal). O eixo literalmente levita devido às forças magnéticas; o posicionamento é feito pela intensidade dessas forças regulado pela quantidade de corrente elétrica.

O intuito de se usar os mancais magnéticos, além de evitar o desperdício de energia cinética, é diminuir os custos com manutenção do equipamento. Pois este componente apresenta maior vida útil que os mancais convencionais, devido a inexistência de perdas por atrito e desgaste, e dispensa a lubrificação, evitando paradas operacionais para manutenção preventiva e preditiva para esta finalidade (GUIRAO, 2012).

Conforme estudos de PATRÍCIO (2011), pode-se concluir que os mancais de magnéticos supercondutores são os mais indicados para a aplicação discutida no presente trabalho, apresentam esquema de montagem conforme figura 8. Este tipo de mancal é capaz de levantar grandes cargas de um ímã permanente e o sistema é estável, dispensa o controle eletrônico que é necessário em mancais magnéticos ativos² (GUIRAO, 2012). Porém, é necessário a disposição de um sistema de arrefecimento criogênico, afim de obter uma resistência nula à corrente elétrica, característica primária dos materiais supercondutores.



Figura 7 - Mancal magnético ativo.

Disponível em:< <http://www.skf.com/br/industry-solutions/medical-health-care/products/magnetic-bearings/index.html>>

² Mancal magnético ativo: dispositivos que sustentam um eixo por levitação dentro do mancal sem que haja qualquer contato. Necessitam de sistema de controle a malha fechada, com presença de sensores de posição, filtros, controladores e amplificadores.

Na Tabela 7 é possível constatar algumas empresas especializadas em mancais magnéticos, as quais podem oferecer seus produtos e, até mesmo, instruções técnicas para instalação.

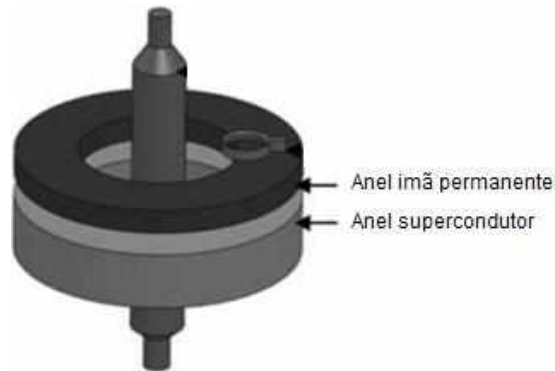


Figura 8 - Esquema de montagem do mancal magnético

Tabela 7 - Empresas que fabricam/comercializam mancais magnéticos.

EMPRESA	PAÍS
SKF	Brasil
Calnetix Technologies	EUA
Celeroton	Suíça
Macon	Alemanha
Synchrony	EUA
Waukesha Bearings	EUA

2.5. Locomotiva

O presente trabalho consiste em projetar conceitualmente, através do modelo matemático para dimensionamento do instrumento implementado no algoritmo genético, uma *Flywheel* em uma locomotiva para permitir retomadas do movimento a partir de fonte de energia secundária, com intuito de diminuir o gasto com energia elétrica ou combustível empregado nos motores diesel em manobras de vagões nos pátios ferroviários. Para tomar como base uma locomotiva real, utilizou-se a ficha técnica da locomotiva SD70MAC, conforme a Tabela 8.

No modelo matemático, a formulação é voltada para obtenção da capacidade de armazenagem de energia na *Flywheel*. Dessa forma, é necessário se basear na capacidade máxima de fornecimento de energia do motor diesel (gerador) para o motor de tração, para que

Tabela 8 - Ficha Técnica Locomotiva Diesel Elétrica SD70MAC. (SIEMENS Technical Information)

Ficha Técnica		
Organização rodas:	Co'Co'	0-6-6-0
Bitola:	1435 mm	4 ft 8,5 in
Massa:	188 t	415.000 lbs
Distância entre acopladores:	22.555 mm	74 ft
Diâmetro roda:	1067 mm	42 in
Relação de transmissão:	85:16:00	5,31:1
Máxima velocidade:	113 km/h	70 mph
Tipo motor diesel:	EMD 16-710 G3A	
Desempenho motor diesel:	4000 HP/2985 kW em 900 rpm	
Potência na roda:	3350 HP	2500 kW
Força de tração inicial:	780 kN	175.500 lbs
Força de tração contínua:	610 kN	137.000 lbs
Força de freio:	360 kN	81.000 lbs



Figura 9 – Locomotiva SD70MAC. (SIEMENS Technical Information)

a *Flywheel* consiga operar de forma eficiente em qualquer situação de reboque da locomotiva. Conforme ficha técnica (Tabela 8), o gerador tem uma potência máxima de 2.985 kW (kJ/s). Para uma operação média de 20 segundos, o instrumento em questão deve ser capaz de

armazenar 59.700 kJ. Esta energia será transferida futuramente ao motor elétrico, ilustrado pela figura 10, que gerará torque nas rodas da locomotiva.



Figura 10 - Motor de tração 1TB2630 com especificações. (SIEMENS Technical Information)

3. Modelo Matemático

3.1. Cálculo da energia armazenada

O intuito de se utilizar o sistema de uma *Flywheel* é de armazenar energia cinética para em outro momento utilizá-la. No caso do presente trabalho, esta energia será convertida em energia elétrica e utilizada pelo motor elétrico para iniciar e manter o movimento por um intervalo de tempo de uma locomotiva.

Por se tratar de materiais compósitos, os quais apresentam grande valor, são necessários cálculos prévios para o melhor dimensionamento da geometria do volante, evitando o superdimensionamento e, paralelamente, obter um instrumento usual nas operações de manobra em pátios ferroviários. Para isso, foi consultada a bibliografia (ATALLAH et al., 2014) com o objetivo de obter a formulação correta para o cálculo da capacidade de energia armazenada pelo volante da *Flywheel*.

ATALLAH et al. (2014) e BANKSTON et al. (2014) afirmam que a energia armazenada na *Flywheel*, pode ser calculada pela seguinte equação:

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (1)$$

Em que E é a energia cinética armazenada pelo volante, I é o momento de inércia apresentado pela geometria do volante e ω a velocidade angular máxima que a *Flywheel* é capaz de alcançar.

O momento de inercia pode ser calculado em função da geometria da *Flywheel* e de sua massa:

$$I = m \cdot r^2 \quad (2)$$

Sendo m a massa do volante de inércia e r o raio do disco considerado para a aplicação.

A geometria mais adequada e escolhida para o volante é um cilindro oco. Dessa forma na equação do momento de inércia, é substituído a massa pelo produto da densidade, altura e área do disco, assim, obtêm-se a equação mais adequada para o cálculo do momento de inércia do cilindro vazado:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot h \cdot \rho \cdot (r_o^4 - r_i^4) \quad (3)$$

Em que h é a altura do cilindro, r_o é o raio externo, r_i é o raio interno e ρ a densidade do material aplicado na construção do cilindro.

Portanto, substituindo a equação do momento de inércia na equação para a energia cinética, obtêm-se a equação direta para o cálculo da energia armazenada na *Flywheel* em função da sua velocidade, da altura, do raio interno e externo:

$$E_{Flywheel} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot h \cdot \rho \cdot (r_o^4 - r_i^4) \cdot \omega^2 \quad (4)$$

Como todos os dados inseridos estão no Sistema Internacional de Unidade, a energia será fornecida em Joules.

Conforme a Equação (4) a forma mais eficiente de aumentar a energia armazenada na *Flywheel* é aumentar a sua velocidade. No entanto, o aumento da velocidade será limitado, uma vez que os materiais que compõem a *Flywheel* irão restringir a sua velocidade, devido ao esforço de tensão desenvolvido, denominado em inglês como *tensile strength* σ .

3.2. Análise das tensões

Em um sistema de rotação, é possível notar duas forças distintas, a radial e a tangencial, conforme sugere sua nomenclatura, uma atua na direção do raio do disco e outra na tangente. Considerando a análise de DIAS (2013) e BANKSTON et al. (2014), um disco com espessura e densidade uniforme (Figura 9a), a força centrífuga (radial) pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$dF_c = dm \cdot r \cdot \omega^2 = \rho \cdot h \cdot r^2 \cdot d\varphi \cdot dr \cdot \omega^2 \quad (5)$$

Por sua vez, a equação para o cálculo da tensão radial (*radial stress*) σ_r para material isotrópico:

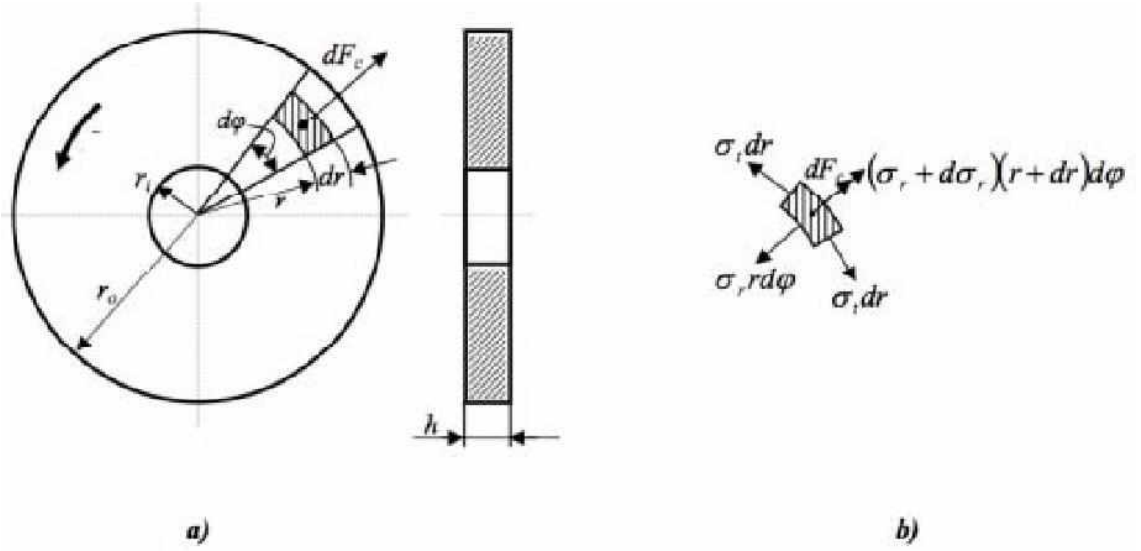


Figura 11 – Forças em uma roda com espessura e densidade uniforme (CIMUCA, 2005).

$$\sigma_r = \frac{3 + \vartheta}{8} \rho \omega^2 \left(r_o^2 + r_i^2 + \frac{r_o^2 r_i^2}{r^2} - r^2 \right) \quad (6)$$

ϑ representa o coeficiente de Poisson. A tensão tangencial (*hoop stress*) σ_t para material isotrópico é dada por

$$\sigma_t = \frac{3 + \vartheta}{8} \rho \omega^2 \left(r_o^2 + r_i^2 + \frac{r_o^2 r_i^2}{r^2} - \frac{1 + 3\vartheta}{3 + \vartheta} r^2 \right) \quad (7)$$

Em experimentos realizados na dissertação de DIAS (2013), obteve-se a conclusão que a tensão tangencial será sempre maior que a tensão radial em um cilindro oco. Portanto, pode-se restringir os cálculos das tensões geradas pelo movimento angular sobre o volante pela equação da tensão tangencial máxima, conforme dado pela Equação (8).

$$\sigma_{tm\acute{a}x} = \frac{3 + \vartheta}{8} \rho \omega^2 r_o^2 \left(2 + \left(1 - \frac{1 + 3\vartheta}{3 + \vartheta} \right) \left(\frac{r_i}{r_o} \right)^2 \right) \quad (8)$$

Mesmo realizados os cálculos das tensões para o projeto do instrumento em questão, recomenda-se que para *Flywheel* reforçadas com compósitos é interessante construí-lo com as fibras orientadas circunferencialmente. Dessa forma, caso haja rompimento da fibra é menos provável que um fragmento se torne um projétil livre, podendo causar grandes danos.

Em geral a geometria do volante e velocidade determinam a capacidade de armazenamento de energia, enquanto a máquina elétrica e os eletrônicos determinam os recursos de potência.

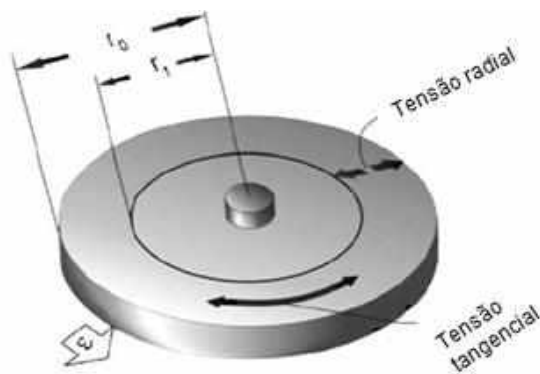


Figura 12 - Demonstrativo de tensões e raios no volante.

3.3. Força de levitação do mancal magnético

Para o cálculo da força de levitação (em função da distância entre o mancal magnético e o eixo) foi baseado no estudo de PATRÍCIO (2011), no qual foi considerado que o supercondutor está em estado crítico (sem resistência nem perdas) e que está em simetria axial com o ímã permanente. Partindo da condição de equilíbrio entre a força de levitação F_z e o peso do ímã P :

$$\vec{F}_z + \vec{P} = 0 \quad (9)$$

Após manipulações das equações de momento magnético bipolar, magnetização, indução magnética e campo magnético efetivo, obteve-se a seguinte função da força de levitação na componente vertical em função de f :

$$F_z = f\left(z + \frac{L}{2}\right) - f\left(z - \frac{L}{2}\right) \quad (10)$$

Sendo

$$f = \frac{\mu_0}{6(1-N)} \cdot J_c \cdot M_{PM} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \left(\frac{2 \cdot z - h}{\sqrt{4 \cdot a^2 + (h - 2 \cdot z)^2}} - \frac{2 \cdot z + h}{\sqrt{4 \cdot a^2 + (h + 2 \cdot z)^2}} \right. \\ \left. + \frac{h - 2 \cdot z}{\sqrt{4 \cdot b^2 + (h - 2 \cdot z)^2}} + \frac{h + 2 \cdot z}{\sqrt{4 \cdot b^2 + (h + 2 \cdot z)^2}} \right) \quad (11)$$

Em que L é a espessura e R o raio do supercondutor, do qual levita a uma distância vertical z o ímã, em que apresenta o raio interno a , o raio externo b e espessura h .

O fator desmagnetizante N é função do tamanho e forma do supercondutor. Os valores de N adotados para a viabilização do projeto, foram retirados do estudo efetuado por CHEN et BRUG (1991), no qual os valores correspondem a uma susceptibilidade magnética $\chi = -1$, que é uma boa aproximação para campos magnéticos muito inferiores ao campo crítico, como o presente trabalho, e a permeabilidade do espaço livre (vácuo) $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ N. A}^2$. Da relação L/R , o valor obtido do fator de desmagnetização aproximado é de $N = 0,66$.

“Os valores da magnetização do magneto permanente, M_{PM} , e densidade de corrente crítica do supercondutor, J_c , considerados, foram respectivamente, $1,6 \times 10^6 \text{ A/m}$ [17] e $3 \times 10^6 \text{ A/m}^2$. Este valor de corrente crítica é consistente com os valores obtidos em amostras prensadas de YBa2Cu3O7-d, a 77K e campos inferiores a $B=100 \text{ G}$ (0,01 T).” - CHEN et BRUG (1991).

4. Projeto Conceitual

4.1. Dados

A *Flywheel*, que será empregada na locomotiva SD70, deve fornecer a mesma potência que o motor diesel presente na locomotiva para move-la e aos vagões rebocados. A fim de cobrir todos os tipos de operação que a locomotiva atua, a potência fornecida ao motor elétrico deve ser de 2.985 kW, a máxima fornecida pelo motor diesel.

A duração média de reboque em manobras é de 20 segundos³. Logo, para que uma *Flywheel* seja usual nessas condições ela deve ser capaz de armazenar uma energia máxima de 59,7 MJ. A energia armazenada no dispositivo em questão pode ser calculada pela Equação (4), que é diretamente proporcional às dimensões do volante (diferença da quarta potência do raio externo e interno, altura e densidade) e à velocidade angular ao quadrado. Baseado nessa preposição, o quanto maior estes parâmetros, maior a energia armazenada. Porém, deve-se restringir às tensões tangenciais máximas geradas com o movimento angular do volante, como dito em Análise das tensões (Seção 3.2). Também é recomendável a preocupação do volume ocupado pelo instrumento, uma vez que ele será embarcado em uma locomotiva.

Para os dados do material empregado no volante, compara-se as informações dos materiais presentes na Tabela 2. Em uma rápida análise, conclui-se que o material com maior relação resistência à tração e densidade é o Carbono T1000, porém o seu preço é muito elevado. Portanto, o material escolhido para os presentes estudos é o Carbono AS4C, que apresenta propriedades muito próximas do material de maior desempenho, mas equivale a aproximadamente 30% do valor deste material.

O Carbono AS4C apresenta uma densidade de 1.510 kg/m³, resistência a tração de 1.650 MPa e valor de ν de 0,31. O valor de Poisson encontrado em ACP Composites (2014) para a fibra de carbono é de 0,24.

³ Informado pela área de Operações da Ferrovia Centro Atlântica, uma empresa VLI.

4.2. Otimização das dimensões da *Flywheel*

Para otimização das dimensões do volante da *Flywheel*, foi utilizado o algoritmo genético implementado no *software* matemático MATLAB®. Como função objetivo para minimização pelo algoritmo, impôs-se a equação do volume de um cilindro oco:

$$V_{cil} = \pi * h * (r_o^2 - r_i^2) \quad (12)$$

Ao mesmo tempo, as variáveis deveriam respeitar as condições de projeto, como a capacidade de armazenamento energia da *Flywheel*, a máxima tensão suportada pelo volante e o raio interno ser sempre menor que o externo. Portanto, para restringir a convergência das dimensões do cilindro para as mínimas possíveis, foram inseridas três restrições:

$$\begin{aligned} g(1): r_i &\leq r_o \\ g(2): E_{Flywheel} &\geq 59,7 \text{ MJ} \\ g(3): \sigma_{tm\acute{a}x} &\leq 825 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (13)$$

Após inseridas todas condições, equação de projeto e estabelecida a velocidade angular em 10.000 RPM (estimativa do autor), passa-se para a execução do programa.

Primeiramente, utilizou-se de limite superior e inferior das variáveis (raio externo, raio interno e altura do volante) com grande amplitude (de 0,01 metros a 1 metro para todas variáveis), com quantidade de gerações e número de indivíduos, de 50 e 100 respectivamente, para se obter valores aproximados do valor ótimo. Em seguida, os intervalos das variáveis foram reduzidos para valores próximos ao encontrado no primeiro passo, enquanto o número de gerações e o número de indivíduos foram amplificados para 100 e 5000, a fim de obter um refinamento dos valores ótimos encontrados. Intervalos para o segundo passo de execução:

$$\begin{aligned} 0,5 &\leq h \leq 0,85 \\ 0,3 &\leq r_i \leq 0,4 \\ 0,4 &\leq r_o \leq 0,55 \end{aligned} \quad (14)$$

Em seguida, foram executados três vezes o programa, para alterar o número inicial de cada geração. Para garantir a aleatoriedade, foram utilizadas três sementes distintas conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9 - Valores das variáveis h , r_i e r_o para sementes distintas.

	h (m)	r_i (m)	r_o (m)	V_{cil} (m ³)
Seed=0	0,85	0,3682	0,4457	0,1684
Seed=100	0,85	0,3682	0,4457	0,1684
Seed=200	0,85	0,3682	0,4457	0,1684

De posse dos resultados, é possível calcular a média (Equação 15) de cada variável para encontrar os valores finais, que serão os definitivos para o projeto conceitual do presente trabalho.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (15)$$

Os valores finais para altura, raio interno e raio externo do volante são:

$$\begin{aligned} h &= 0,85 \text{ m} \\ r_i &= 0,3682 \text{ m} \\ r_o &= 0,4457 \text{ m} \\ V_{cil} &= 0,1684 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (16)$$

Com o valor do volume do volante, densidade ($\rho_{AS4C} = 1510 \text{ kg/m}^3$) e o valor para cada quilograma (\$ 31,30/kg). Para esta configuração o volante terá uma massa de 254,34 kg e é possível estimar o valor do material para conceber o volante da *Flywheel* de \$ 7.960,91. Lembrando que ainda há o valor da mão-de-obra, a qual não é barata devido às várias etapas até o produto final quando se tratando de trabalho com materiais compósitos.

4.3. Dimensionamento mancal magnético

O mancal magnético a ser empregado para sustentar o volante em rotação sem que haja qualquer contato com as partes fixas do instrumento deverá ser capaz de sustentar no mínimo a

soma dos pesos do volante, do imã permanente com raio interno e externo semelhantes ao do volante, do eixo e do rotor da máquina elétrica. Como o valor desses últimos são desconhecidos, acrescenta-se mais 40% do peso do volante ao sistema. Logo, a força peso do sistema será de aproximadamente 3.400 N, para gravidade de 9,81 m/s².

A partir da força de levitação necessária, no mínimo 3.400 N, e definindo o raio externo do imã permanente igual ao raio externo do volante $b = 0,4457 \text{ m}$, raio interno $a = 0,10 \text{ m}$, altura $h = 0,03 \text{ m}$ e magnetização $M_{IP} = 1,6 \cdot 10^6 \text{ A/m}$. Para o supercondutor, foram definidos raio $R = 0,4457 \text{ m}$, largura variando entre $0,02 \text{ m} \leq L \leq 0,04 \text{ m}$ e densidade de corrente crítica $J_c = 3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$. O valor utilizado da permeabilidade magnética no vácuo foi de $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$.

De posse destes valores, é possível calcular a força de levitação empregada por um supercondutor em um imã permanente posicionado a distância z , pela Equação (10). Os dados e a equação foram implementados no MATLAB® e gerado um gráfico (Figura 13) para avaliação.

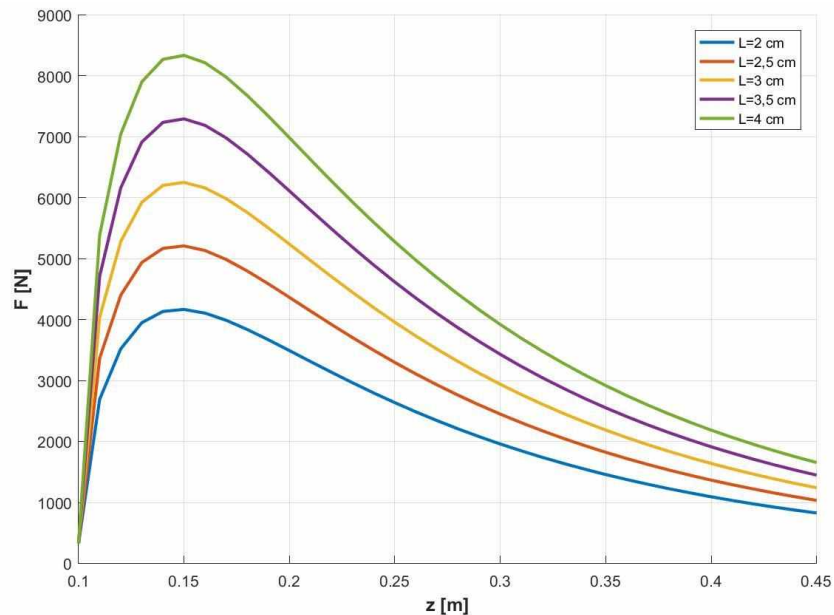


Figura 13 - Força de levitação [N] em função da distância do imã permanente e o supercondutor.

Analisado o gráfico, nota-se (como destacado) que para $L=0,04 \text{ m}$, a força peso do sistema volante mais outros itens se equilibrará com a força de levitação do mancal magnético em aproximadamente $z = 0,12 \text{ m}$. Essa distância pode ser reduzida, diminuindo-se o raio interno

do ímã permanente. Porém esta ação acarreta também em outros efeitos, como o aumento da massa do ímã.

4.4. Dimensionamento bomba de vácuo

A bomba de vácuo é o componente responsável por retirar o fluido, o ar, do espaço lacrado da câmara de vácuo, onde é posicionado o volante. Para isso, ela deverá ser capaz de extrair um volume da folga entre o volante e a parede da câmara, que é o volume não ocupado pelo volante. Como o volante apresentará um $r_o = 0,4457$ m, a câmara deve deixar folga de $e = 5$ mm para o giro e, ainda, a distância para a levitação do volante de $z = 0,18$ m. Portanto, o volume que a bomba deve ser capaz de extrair e manter com densidade de ar muito baixa é de $0,4888 \text{ m}^3$, conforme cálculos a seguir.

$$\begin{aligned} V_{folga} &= \pi \cdot 0,4507^2 \cdot 0,85 - V_{cil} = 0,3740 \text{ m}^3 \\ V_{levitação} &= \pi \cdot 0,4507^2 \cdot 0,18 = 0,1148 \text{ m}^3 \\ V_{sucção} &= V_{folga} + V_{levitação} = 0,4888 \text{ m}^3 \end{aligned} \tag{17}$$

No site das empresas citadas no item 2.3, após uma rápida pesquisa, encontra-se bombas de vácuo do tipo anel líquido otimizadas para volumes de $0,5 \text{ m}^3$ por valores de aproximadamente \$ 2.450,00 (cotação dólar em 18/12/2017: R\$ 3,2323 – fonte: <www.bcb.gov.br>).

5. Conclusão

Para este trabalho, inicialmente, foi proposta uma contextualização ao assunto de volante de inércia. Uma vez que se trata de um instrumento conceito antigo considerado ineficaz, mas atualmente reconquista o mercado devido a atualização de seus componentes com tecnologia de ponta e, assim, ultrapassando em eficácia energética instrumentos mais comumente utilizados. Por isso, esta etapa inicial foi adicionada a título de informativo geral.

Em seguida, realizou-se uma revisão bibliográfica de todos os componentes presentes em uma *Flywheel* e da locomotiva utilizada como base de dados técnicos. Esta etapa foi essencial para o conhecimento da função de cada componente no sistema como todo, as razões para o seu uso e as vantagens e desvantagens que agregavam ao projeto.

Como terceira etapa, propôs-se o modelo matemático contento sistemas de equações para dimensionamento do volante e do mancal magnético. Equações gerais, como energia cinética em movimento angular, tensão radial e tangencial e força de levitação por campo magnético, foram modificadas para se tornarem específicas ao projeto em questão, as quais foram aplicados com êxito no projeto conceitual.

Por fim, foi projetada conceitualmente uma *Flywheel* para uma locomotiva, o qual foi separado em quatro distintos tópicos devido às divergências dos assuntos. Os dados iniciais foram extraídos da revisão bibliográfica e, até mesmo, da bibliografia em si, estes foram a base para os cálculos das incógnitas de projeto.

Tendo em vista os dimensionamentos realizados no projeto conceitual, a aplicação de uma *Flywheel* em uma locomotiva pode ser é viável.

Para trabalhos futuros é possível a construção experimental de uma *Flywheel*, realizar testes de capacidade de armazenamento de energia e compará-los com valores teóricos encontrados pelo projeto conceitual.

ANEXO I

O algoritmo genético é um método heurístico, ou seja, baseado em um comportamento natural. Baseado na teoria evolucionária de Charles Darwin, na qual apenas os mais aptos ao ambiente irão sobreviver e tenderão a gerar indivíduos ainda mais aptos a sobreviverem e que podem sofrer mutações. O algoritmo utiliza da mesma lógica para rejeitar ou aceitar dados mais adaptados como melhores soluções possíveis para dado problema, a próxima geração serão frutos do cruzamento dos primeiros e, portanto, propensos a serem melhores soluções que seus pais.

O cruzamento é realizado de forma aleatória entre dois indivíduos previamente selecionados e intercambiando suas informações genéticas. Essa última, também pode ser chamada de cromossomo do indivíduo, que para a linguagem computacional é traduzida em número binário de determinado número de bits especificado pelo usuário ou próprio limite da máquina.

A mutação é a introdução de novas combinações genéticas nos indivíduos antes de serem avaliados. Esse recurso, reproduz a teoria de Darwin, em que alguns indivíduos são capazes de se adaptarem ao ambiente e, para isso, sofrem a mutação. Lembrando que este recurso ocorre com muito menor frequência que o cruzamento.

Pode-se esquematizar o algoritmo da seguinte forma:

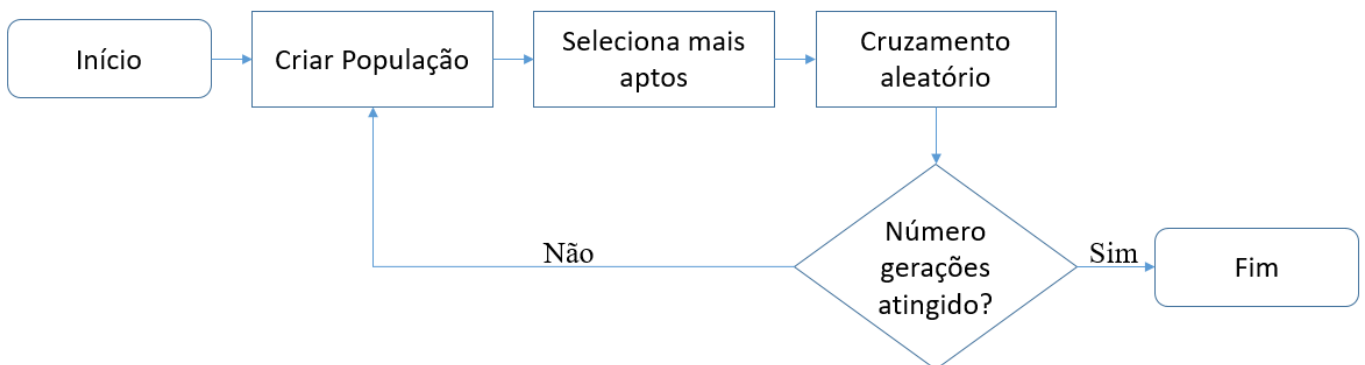


Figura 14 – Fluxograma Algoritmo Genético

Neste trabalho, a seleção dos indivíduos mais aptos é feita pela minimização da função objetivo que é o volume ocupado pelo volante de inércia, Equação 18.

$$V_{cil} = \pi (r_o^2 - r_i^2) h \quad (18)$$

Porém, ainda na seleção dos mais aptos, além da procura da melhor solução, os indivíduos são submetidos às restrições de projeto, como tensão máxima suportada pelo volante, a energia mínima necessária e raio externo deve sempre ser maior que o interno, conforme especificado na Equação 13.

REFERÊNCIAS

- [1] BANKSTON, Shenel; MO, Changki. **Geometry Modification of Flywheels and its Effect on Energy Storage**. 2015. 10 f. - Mechanical and Materials Engineering, School of Mechanical and Materials Engineering, Washington State University Tri-cities, Richland, 2014.
- [2] EL-MANN, Mauricio. **SISTEMA ARMAZENADOR DE ENERGIA CINÉTICA – SAEC**. 2009. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Engenharia Elétrica, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- [3] MARQUES, Maria Inês Lopes; **Design and Control of an Electrical Machine for Flywheel Energy– Storage System**, Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, maio 2008.
- [4] ATALLAH, Ahmed M.; M. KASHEF, Mahmoud; M.A.L. BADER. **Electro-Mechanical Batteries for low earth orbit satellite with hallow cylinder flywheel machine**. 2014. 3 v. Tese (Doutorado) - Curso de Electrical And Electronics Engineering, Elec. Dept. Eng, Ain Shams University, Cairo, 2014.
- [5] LANES, Matusalém M.; ROLIM, Luís G. B.. **ARMAZENADOR CINÉTICO DE ENERGIA (FLYWHEEL) BASEADO EM MÁQUINA DE RELUTÂNCIA CHAVEADA OPERANDO EM ALTA VELOCIDADE: FUNDAMENTOS, CONTROLE E APLICAÇÕES**. 2012. 6 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- [6] PATRÍCIO, Vítor Hugo Machado. **Modelização de um mecanismo de levitação supercondutor para um sistema de volante de inércia comercial**. 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Electrotécnica, Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2011.
- [7] DIAS, Carlos Ribeiro. **DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA UPS FLYWHEEL**. 2013. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica, Sistemas Elétricos de Energia, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2013.

- [8] BERNSMÜLLER, Eduardo. **MÁQUINA DE RELUTÂNCIA COM ROTOR EXTERNO PARA SISTEMA ARMAZENADOR DE ENERGIA CINÉTICA**. 2016. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- [9] CHEN, Du-Xing; BRUG, James A., **Demagnetizing Factors for Cylinders**, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS 27, 3061 (1991)
- [10] SILVEIRA, Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da. **CONTROLE DE TENSÃO NA CARGA PARA MOTOR/GERADOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL DE TRÊS FASES**. 2011. 202 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Feelt, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
- [11] GUIRAO, Victor Suman. **Mancais Magnéticos Ativos para Atenuação de Vibrações em Eixos Rotativos**. 2012. 138 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, UNESP, Campus de Ilha Solteira, 2012. 1.
- [12] Mechanical Properties of Carbon Fiber Composite Materials, Fiber/Epoxy resin (120°C Cure). All Rights Reserved © 2014 Copyright ACP Composites, Inc.
- [13] CIMUCA, Gabriel-Octavian; “Systeme Inertiel de Stockage d’Energie Associe a des Generateurs Eoliens”, Ph.D. thesis, Ecole Nationale Supérieur d’Arts et Métiers, Centre de Lille, France, 2005.
- [14] McLALLIN, Kerry; “NASA Flywheel System Development”, Glenn Research Center, NASA, USA, Space Power Workshop, April 4, 2001.
- [15] LEIJON, Mats; BOULAND, Bjorn; BERNHOFF, Hans. **Flywheel energy and power storage systems**. 2004. 25 p. Paper. Department of Engineering Sciences, Uppsala University, The Ångström Laboratory, Box 534, S-75121, Uppsala, Sweden, 2005.
- [16] STEMPIAK, Roberto A. **A ciência e a tecnologia do vácuo – Resumo histórico e algumas aplicações**. 2002. 14 p. Opúsculo – Faculdade de Ciências Aplicadas de São José dos Campos, SP – Sociedade Brasileira de Vácuo, 2002.
- [17] SIEMENS. **Technical Information: Diesel-Electric Locomotive SD70MAC**