

Potencial dos sistemas de armazenamento flywheel para a qualidade da produção de energia - aplicações

RESUMO

Este estudo é uma revisão sobre os sistemas de armazenamento de energia tipo Flywheel abordando sua história, desenvolvimento, suas características e aplicações como método de estocagem de energia e auxílio para a minimização de problemas decorrentes de anormalidades no fornecimento de energia. Os sistemas de armazenamento de energia tipo Flywheel apresentam algumas vantagens em relação as alternativas disponíveis tais como: alto ciclo de vida, alta densidade de potência e baixo impacto ambiental. Este artigo inclui características construtivas dos sistemas Flywheel e suas aplicações conjugadas as soluções de fornecimento de energia renovável.

PALAVRAS-CHAVE: Flywheel. Qualidade de Energia. Armazenamento de Energia.

Carlos Eduardo Mendes do Carmo

eduardo_mendes@usp.br

Universidade de São Paulo - São Paulo, São Paulo, Brasil.

Hélio Tatizawa

hedio@iee.usp.br

Universidade de São Paulo - São Paulo, São Paulo, Brasil.

USO DE FLYWHEEL COMO ALTERNATIVA PARA A QUALIDADE DA ENERGIA – UM CONTEXTO SOBRE A PLURALIDADE E ABRANGÊNCIA DO SISTEMA

As anormalidades no fornecimento de energia podem levar a danos em equipamentos, interrupções em processos fabris, computadores e centrais de TI ou em plantas importantes e sensíveis como hospitais ou serviços públicos essenciais acarretando deste modo, impactos financeiros de monta considerável. A suscetibilidade ou sensibilidade das cargas às variações dos parâmetros de fornecimento associada a proliferação de cargas não lineares faz com que a qualidade de Energia se apresente como uma área de especial interesse tanto para os fornecedores de energia (Concessionárias e fornecedores independentes) quanto para os consumidores. As recomendações norteiam os parâmetros de fornecimento podem ser encontradas no IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) e a regulamentação no âmbito nacional é exercida pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) através da normatização e padronização contidas nos documentos do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) que em seu Módulo 8 versa especificamente sobre a Qualidade de Energia (ANEEL, 2008).

Os fenômenos podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações dos consumidores ou no sistema de fornecimento das concessionárias. As causas mais comuns são: perda de linha de transmissão, saída de unidades geradoras, chaveamentos de bancos de capacitores, curto-circuito nos sistemas elétricos, manobra de cargas fortemente indutivas, faltas associadas a fenômenos atmosféricos e operação de cargas com características não-lineares (MARTINHO, 2014).

Os principais distúrbios que afetam qualidade de energia são:

- Fenômenos Transitórios (impulsivos e oscilatórios) com duração menor que 0,1 ciclos.
- VTCD - variações de curta duração são desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo (interrupções transitórias, afundamentos de tensão e saltos de tensão) conforme pode ser visto na tabela 1.
- VTLD - variações de longa duração (interrupções sustentadas, subtensões e sobretensões), desequilíbrios, distorção de forma de onda (harmônicos, corte de tensão, ruído, etc.), flutuações de tensão e variações de frequência.

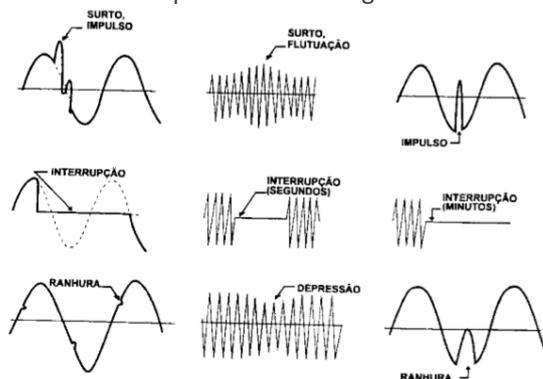
Tabela 1 – VTCD Variações de Tensão de Curta Duração

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: PRODIST, módulo 8, 2015

As diversas anomalias referenciadas em termos das VTCD e VTLD podem ser expressas através da modificação de um sinal senoidal padrão frente a essas alterações como mostrado na figura 1

Figura 1 - Alteração de um sinal senoidal pelos diversos fenômenos que afetam a qualidade de energia.



Fonte: Oliveira, 1995.

AFUNDAMENTOS DE TENSÃO (SAG)

Afundamento de tensão ou voltage SAG pode ser definido como um decréscimo da tensão eficaz nos valores compreendidos entre 0,1 e 0,9 p.u. na frequência fundamental e com duração de 0,5 ciclo a 1 min. Voltage Swell é definida como um incremento na tensão eficaz para valores de 1,1 a 1,8 p.u. na frequência fundamental e com duração de 0,5 ciclo a 1 min. Muitos tipos de

cargas são especialmente sensíveis a esse fenômeno como por exemplo drives de acionamentos de motores em velocidade variável (inversores de frequência e conversores cc), processos de fabricação contínuos e computadores (BOLLEN, 2000). As causas de ocorrências de SAG podem ser faltas relacionadas com o fornecimento de energia:

- Falhas em equipamentos;
- Distúrbios de origem atmosféricos;
- Falha em isoladores;
- Eventos que afetem a transmissão de energia como vendavais, queimadas.

Outros eventos também podem ocasionar a ocorrência de SAG:

- Partida de grandes motores de indução;
- Entrada e saída de grandes cargas na rede.

A ocorrência de SAG pode causar prejuízos tanto em consumidores residenciais como em maior monta em consumidores industriais, podendo parar plantas de produção contínuas ao afetar por exemplo sistemas de CLP podendo haver a incidência de multas por atrasos, perdas de matérias primas e aumento de custos de manutenção.

MÉTODOS PARA MINIMIZAR OS EFEITOS DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Segue abaixo alguns métodos que podem ser utilizados para suprimento de tensão durante a ocorrência de afundamentos de tensão:

- Estabilizadores eletromecânicos ou eletrônicos.
- Transformadores ferro-ressonantes.
- Alimentação dupla com chaveamento estático.
- UPS – Sistemas de Energia Ininterrupta.
- Moto Geradores acoplados a acumuladores Flywheel.
- Restauradores Eletrônicos Dinâmicos de Tensão.

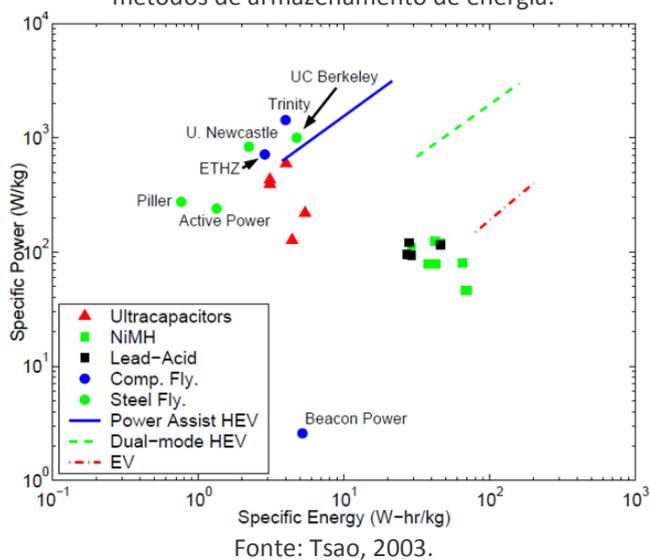
Alguns métodos baseiam-se em maneiras de estocar energia e devolvê-las a rede nos momentos das faltas, como listado abaixo:

- **Baterias** – As baterias são comumente utilizadas em sistemas mantenedores de energia a baixo custo, porém com vários inconvenientes quando são usadas em sistemas de potência mais elevada, a densidade de energia por bateria é relativamente baixa o que resulta em grandes e pesados sistemas, além de que a vida útil das baterias pode ser reduzida em função das suas condições de operação (TSAO, 2003).
- **Ultracapacitores** – Ultracapacitores são capacitores cuja construção permite armazenamento de altas densidades de energias na superfície de suas placas devido ao dielétrico muito fino entre elas. A sua aplicação a sistemas de potência não é usual e como inconveniente apresenta alto custo e constantes de tempo elevadas resultando num tempo de resposta dinâmico inadequado (BURKE, 2000).
- **Bobinas Supercondutoras** – A energia elétrica pode ser convertida e armazenada sob a forma de campos magnéticos. Uma bobina supercondutora transportando um alto valor de corrente contínua tem uma quantidade de energia armazenada em seu campo magnético proporcional ao quadrado do valor da corrente e proporcional à sua indutância. Como principais entraves a esse tipo de método de tecnologia temos o custo elevado, a necessidade de refrigeração criogênica na bobina, a necessidade de compensação da influência de campos externos e a alta relação de massa / volume do conjunto (HASSENZAHN et al, 2002).
- **Armazenadores de Energia Eletromecânicos** – A energia elétrica pode ser convertida e armazenada sob forma de energia mecânica (cinética) em Sistemas de Armazenamento de Energia Cinética comumente chamados de Flywheels. Os Flywheels podem ser acoplados a geradores síncronos de polos lisos ou salientes, geradores cc, geradores de indução ou motores de relutância chaveada operando como geradores (KAMATH, 2002; TSAO, 2003). As suas principais vantagens em relação aos outros métodos de armazenamento de energia são:
 - Custo mais baixo.
 - Alta densidade de potência.
 - Robustez.
 - Alto número de ciclos de carga e descarga de energia
 - Vida útil elevada.
 - Pouca manutenção.
 - Pouco impacto ao meio-ambiente.

- Resposta rápida do sistema quando solicitado.

A figura 2 mostra um comparativo entre os vários métodos de armazenamento de energia quanto a energia e potências específicas para cada método.

Figura 2 – Comparação entre a energia específica e potência específica entre alguns métodos de armazenamento de energia.

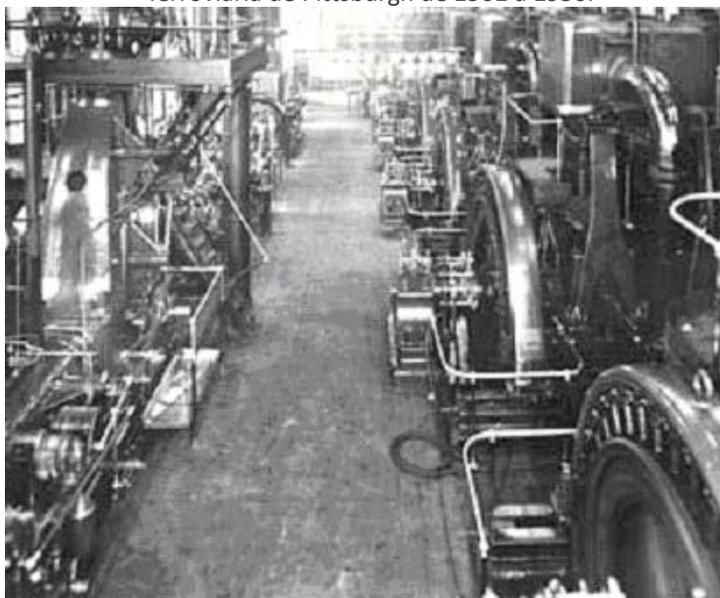


SISTEMAS FLYWHEEL

HISTÓRIA DOS SISTEMAS FLYWHEEL

Os sistemas de armazenamento de energia cinética talvez tenham sido um dos primeiros métodos de armazenamento de energia mecânica descoberto pela humanidade para a fabricação de vasos em cerâmica e moenda de grãos. A partir da Revolução Industrial várias outras aplicações desse sistema foram sendo implementadas como por exemplo sistemas em teares, em prensas e em máquinas a vapor. Provavelmente uma das primeiras aplicações de Flywheels em sistemas elétricos de potência em larga escala foi para eliminar as oscilações de saída de geradores acoplados a motores à vapor conforme pode ser visto na figura 3.

Figura 3 - Flywheels usados em geradores acionados por motores à vapor na estação ferroviária de Pittsburgh de 1902 a 1950.



Fonte: Kamath e Key, 2002.

Os geradores de polos salientes acionados por turbinas em plantas hidroelétricas também se beneficiavam do uso de um volante de inércia que fazia as vezes de manter a frequência de saída dentro dos níveis desejados. Com a evolução dos retificadores e sistemas de controle eletrônico os Flywheels começaram a ser considerados como uma maneira independente de armazenar energia. A crise energética da década de 70 incentivou o desenvolvimento tecnológico trazendo novos materiais e melhorando aspectos mecânicos como o uso de mancais magnéticos, permitindo deste modo um aumento na densidade de energia armazenada. Questões ambientais determinaram a partir da década de 80 um crescente interesse por armazenamento de energia e a década de 90 viu surgir um bom número de empresas dedicados a sistemas de armazenamento de energia com uso de Flywheels tanto para uso em geradores quanto integrados a UPS para suprir necessidades dentro do mercado de condicionamento e qualidade de energia (KAMATH e KEY, 2002).

CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

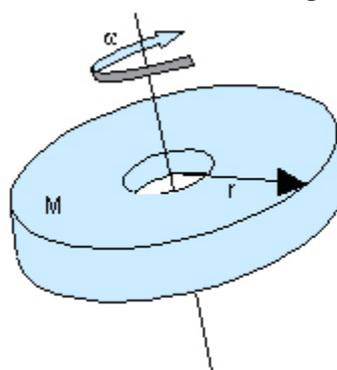
Flywheels armazenam energia sob a forma de energia cinética de uma massa girando a uma velocidade ω . A energia cinética E_c armazenada no volante

é proporcional ao momento de inércia(J) e ao quadrado da velocidade angular (ω):

$$E_c = \frac{J \cdot \omega^2}{2}$$

Logo, um aumento na velocidade angular aumenta consideravelmente a energia armazenada no volante de inércia, e a densidade de energia do sistema. O momento de inercia depende da massa e da geometria do objeto em rotação. As geometrias mais usuais são em forma de disco (figura 4) ou cilíndricas (RIBEIRO et al., 2010).

Figura 4 – Geometria típica de um volante de inercia e os fatores físicos que influenciam no armazenamento de energia.



Fonte: Kamath e Key, 2002.

As perdas no sistema são devido ao atrito viscoso com o ar e ao atrito nos mancais. Além de que a construção mecânica do equipamento tem que suportar esforços elevados devido as altas rotações a que são submetidas as partes girantes. Para minimizar essas perdas avanços tecnológicos têm sido implementados tais como: desenvolvimento de novos materiais compósitos e fibras de carbono, eliminação do atrito viscoso com o ar através de uso em câmaras de vácuo, uso de mancais magnéticos em substituição a mancais mecânicos (SAMINEMI et al, 2003).

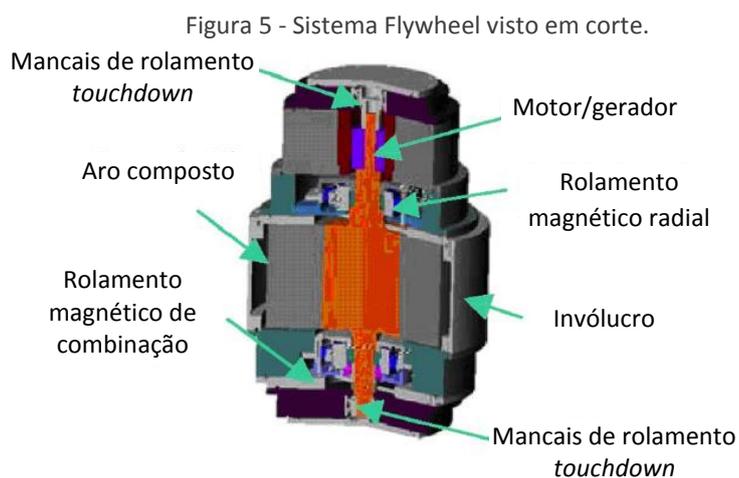
COMPONENTES E SUBSISTEMAS

Os sistemas Flywheel tem alguns componentes básicos como listados abaixo:

- **Rotor** – A massa girante que armazena energia sob a forma de energia cinética.
- **Mancais** – Apoios que suportam o conjunto girante.

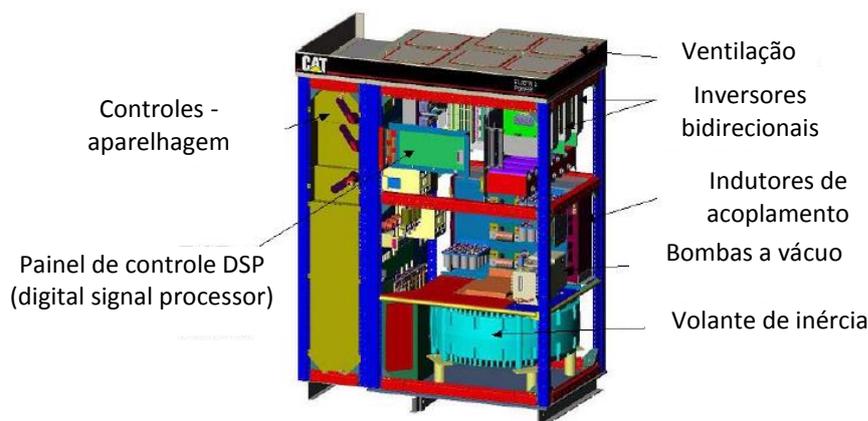
- **Motor/gerador** – Dispositivo de conversão da energia mecânica em elétrica e vice-versa. Normalmente é composto de uma única máquina operando de forma bidirecional. Fornecendo energia mecânica quando operando como motor e convertendo energia mecânica em elétrica quando operando como gerador.
- **Eletrônica de Potência** – Conjunto de inversores e retificadores dispostos de maneira tanto a controlar o modo de operação motor/gerador quanto prover o fornecimento da tensão e frequência em níveis adequados.
- **Instrumentação e Controle** – Sistemas de monitoramento que asseguram o funcionamento dentro dos parâmetros requeridos.
- **Invólucro / Carenagem** – Abrigam todo o conjunto e em alguns casos contam com uma câmara de vácuo para o volante de inércia (KAMATH E KEY, 2002).

A figura 5 mostra um sistema flywheel em corte e a figura 6 mostra um sistema flywheel completo montado dentro de gabinete e chassi.



Fonte: adaptado de Kamath e Key, 2002.

Figura 6 – Módulo Flywheel incluindo gabinete, controles, volante de inércia e motor/gerador.



Fonte: Kamath e Key, 2002.

CARACTERÍSTICAS E LIMITAÇÕES

As vantagens e desvantagens dos sistemas baseados em flywheel podem ser vistos na tabela 2.

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens do sistema flywheel.

Vantagens	Desvantagens
Potência e energia são praticamente independentes	Complexidade dos rolamentos duráveis e de baixa perda
Resposta de potência rápida	Limites de stress e fadiga mecânica
Energia específica potencialmente rápida	Limite de materiais por volta de 700 m/s de velocidade de ponta do rotor
Longa vida útil, em ciclos e dias (calendário)	Modos de falha potencialmente perigosos
Eficiência relativamente alta no modo <i>round-trip</i>	Perdas intrínsecas e parasíticas relativamente altas
Baixo tempo de recarga	Tempo de descarga curto

Fonte: adaptado de Saminemi et al., 2003

As características e limitações dos sistemas Flywheel são listadas a seguir:

- Limites de Potência** – A energia armazenada depende exclusivamente da massa e velocidade do rotor enquanto que a potência é determinada pelas características do motor/gerador e da eletrônica de potência. Deste modo as duas variáveis são independentes, podendo o conjunto ser otimizado para ambas as variáveis de forma independente e permitindo quaisquer combinações de potência e energia, sendo limitado na prática pelo peso do rotor e pelo custo do sistema.

- **Eficiência** – A energia depende da massa e geometria do rotor, mas em maior medida da velocidade do volante. Combinações entre massa e velocidade podem ser feitas para otimização do projeto, bem como utilização de materiais compósitos no rotor e seu acionamento em ambiente de vácuo para redução das perdas pelo atrito viscoso do ar. A razão entre a energia estocada e a devolvida para a rede pode ser chamada de rendimento da energia estocada ou *round-trip efficiency*. Em um sistema flywheel esse valor situa-se entre 80 e 90%. A tabela 3 mostra um comparativo entre os rendimentos de energia estocada para alguns métodos de armazenamento de energia

Tabela 3 – Comparativo entre rendimentos de energia estocada para alguns métodos de armazenagem de energia.

Tecnologias de armazenamento	Eficiência <i>round-trip</i>
Hidrelétrica	65% (instalações antigas); 75% - 80% (aplicações recentes)
Volante de inércia	80% a 90%
Baterias	75% a a90%
Armazenamento eletrotérmico	65% a 75%
Armazenamento a ar comprimido	65% a 75%

Fonte: Adaptado de Schoenung, 2001

- **Ciclo de Vida** – Como é de se esperar, por ser um conjunto de natureza rotativa, um dos pontos que limitam seu ciclo de vida são os mancais, cujo tempo de vida está limitado pelos rolamentos e sua vida útil. Mancais magnéticos têm sido usados para diminuir esse tipo de problema e aumentar a vida útil dos mancais por eliminarem o atrito. O rotor é outro ponto crítico e está sujeito à fadiga imposta por esforços cíclicos, rotores de aço podem apresentar propagação de trincas e rotores em material compósito como grafite por exemplo podem apresentar trincas que acabam resultando em delaminação do material. Em média os projetos contemplam uma estimativa de mais de 100.000 ciclos de carga e descarga de energia.
- **Tempo de Recarga** - Assim como os Ultracapacitores e as Bobinas Supercondutoras, os sistemas Flywheel apresentam rápido tempo de recarga, muitas vezes em poucos segundos.
- **Interface Elétrica** – A interface elétrica onde a energia mecânica é gerada e onde ela é descarregada pode ser feita por vários tipos diferentes de máquinas elétricas, normalmente operando de forma bidirecional,

fornecendo energia mecânica no modo motor e fornecendo energia elétrica à rede no modo gerador. As máquinas mais usuais para o acoplamento à volantes de inércia são: máquinas de indução, máquinas síncronas, máquinas com ímãs permanentes, máquinas cc, máquinas de relutância chaveada.

- **Impactos Ambientais** – Os sistemas de armazenamento de energia que se utilizam da tecnologia flywheel apresentam poucos riscos ambientais tanto em operação normal quanto em modo de falha. Os volantes não são feitos de materiais perigosos nem o conjunto apresenta qualquer tipo de emissão. A única restrição ambiental mais pronunciada é o nível de ruído que pode chegar a 70 dB em grandes sistemas. Por outro lado, operações com o volante em câmaras de vácuo tendem a tornar o sistema consideravelmente mais silencioso.

APLICAÇÕES

Flywheels têm um apelo natural devido ao grande simplicidade de armazenar energia sob a forma de energia cinética e posterior conversão em energia elétrica. Para suprimentos de energia elétrica de curta duração se apresentam como uma solução competitiva em relação as soluções tradicionais com baterias chumbo-ácidas. Avanços nas tecnologias de conversão e controle bem como no desenvolvimento do projeto dos rotores. Hoje, sistemas suportados por flywheels são capazes de fornecer até alguns megawatts por alguns segundos com tempo de resposta muito rápido. Nessa seção serão descritas algumas aplicações em que o sistema flywheel pode ser utilizado com sucesso.

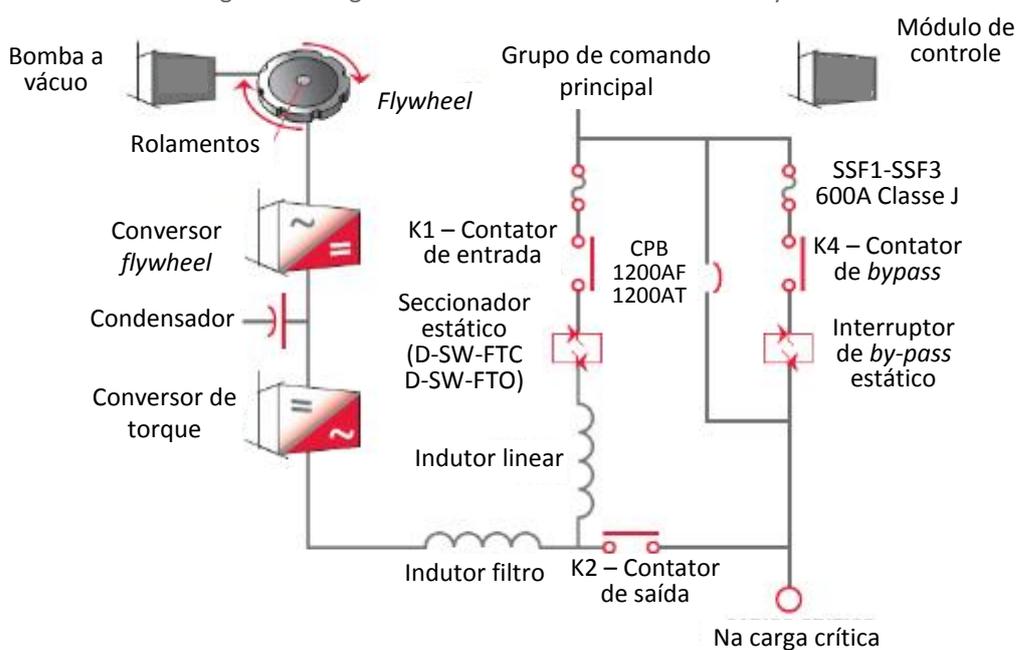
USO DE SISTEMA FLYWHEEL PARA MINIMIZAR EFEITOS DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO (SAG)

Os afundamentos de tensão ou SAG são fenômenos de curta duração que resultam no decréscimo do valor eficaz da tensão. Essa ocorrência resulta em problemas de desligamento em cargas sensíveis como computadores, drives de partida e controle de velocidade de motores, podendo interromper plantas de produção contínua acarretando considerável prejuízo financeiro. Os afundamentos de tensão podem ser causados pela partida de grandes motores, entradas e saídas de cargas da rede ou faltas na rede elétrica de naturezas diversas (SAMINEMI et al, 2003). Os critérios para a aplicação dos sistemas flywheel vão depender das características do sistema local de fornecimento de energia, porém normalmente ficam dentro dos parâmetros listados abaixo:

- **Aplicação** – Mitigar efeitos de SAG e SWELL em função da flutuação de cargas na rede.
- **Nível de Potência** – Depende do tamanho da carga a ser considerada, pode variar de 0,5 até 5 MVA.
- **Capacidade de Energia** - 0.2 até 20 kWh.
- **Duração** - < 30 s.
- **Tempo de Resposta** – 100 a 200 milissegundos.
- **Ciclo de Trabalho** – Variável em função do regime de entrada e saída de cargas da rede.
- **Rendimento da Energia Estocada** - > 90%

Um diagrama unifilar de um sistema estabilizador de tensão Flywheel pode ser visto na figura 7.

Figura 7 – Diagrama unifilar de uma rede com UPS Flywheel.



Fonte: adaptado de Active Power, 2010

FLYWHEELS INTEGRADOS COM SISTEMAS DE ENERGIA RENOVÁVEL

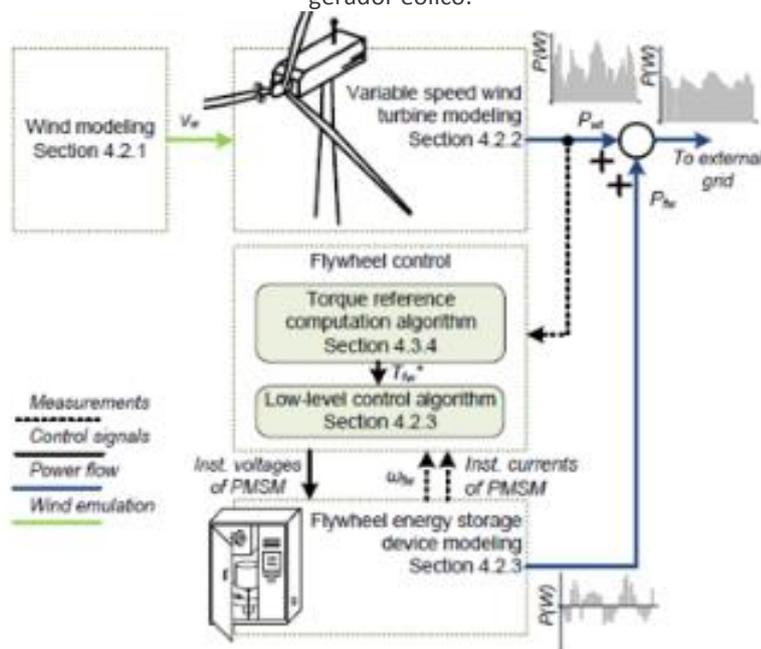
Atualmente o desenvolvimento e o incremento do uso de energias alternativas estão em um processo de franca expansão. Energia eólica, energia

solar, energia geotérmica e energia das ondas são exemplos de fontes renováveis de energia que podem diminuir o impacto ambiental causado principalmente pelo uso de combustíveis fósseis. Todavia esses métodos de geração de energia carregam consigo um certo grau de intermitência intrínseco aos sistemas, seus fatores de produção são naturalmente variáveis: velocidade dos ventos, incidência de luz solar e força das ondas. Deste modo os sistemas Flywheel podem atuar fornecendo energia por curtos períodos para estabilizar essas variações naturais de tensão que podem ocorrer.

FLYWHEELS INTEGRADOS A SISTEMAS DE ENERGIA EÓLICA.

Os geradores eólicos podem apresentar flutuações de tensão em função da variação da velocidade do vento afetando a qualidade de energia entregue, particularmente pode-se observar variações na intensidade da iluminação resultante de variações cíclicas de torque no eixo das pás do aerogerador. O sistema Flywheel é uma tecnologia capaz de suavizar essas oscilações de tensão conforme o modelo conceitual que pode ser visto na figura 8 (DIAS-GONZALES, 2013).

Figura 8 - Diagrama conceitual da aplicação de um sistema Flywheel em associação a um gerador eólico.

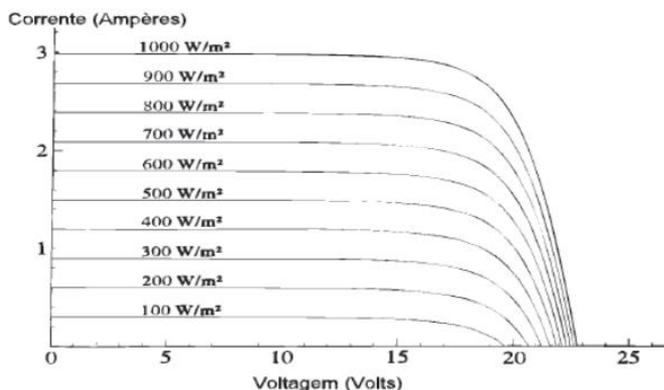


Fonte: Dias-Gonzales, 2013.

FLYWHEELS INTEGRADOS A GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

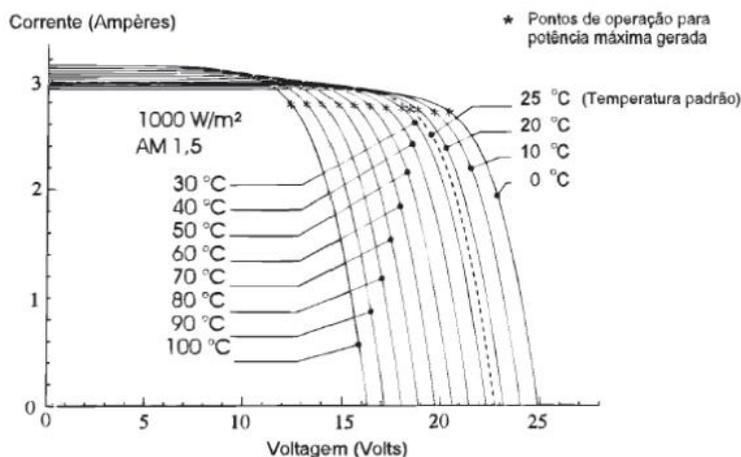
De maneira análoga aos geradores eólicos, a geração de energia elétrica via painéis solares fotovoltaicos apresenta naturalmente uma possibilidade de variação na energia entregue, neste caso a corrente sofre variação em função da irradiação recebida pela placa de células fotovoltaicas e a tensão sofre variação em função do aumento da temperatura conforme pode ser visto nas figuras 9 e 10.

Figura 9 – Curvas de corrente x tensão em função da irradiação solar em painel fotovoltaico.



Fonte: CRESESB/CEPEL, 1999.

Figura 9 – Curvas de corrente x tensão em função da temperatura em painel fotovoltaico.



Fonte: CRESESB/CEPEL, 1999.

Face a essa característica o uso de sistemas Flywheel neste caso também se apresenta como uma solução para compensação de flutuações na rede.

FLYWHEELS INTEGRADOS À GERAÇÃO DE ENERGIA MAREMOTRIZ

A força das ondas tem sido alvo de estudos para aproveitamento de sua energia, plantas experimentais têm sido desenvolvidas para aproveitamento desta forma de energia, em 2008 cerca de 300 MW de potência eram gerados através de geradores movidos pela força das ondas em todo mundo, parcela bastante pequena e limitada áreas costeiras e instalações offshore (HELKIN, 1999). As oscilações nesse sistema são pronunciadamente maiores que em plantas eólicas e solares, variações no torque e na velocidade do eixo do gerador provocam variações de tensão, frequência e na potência entregue. Uma solução para minimização desses efeitos é o acoplamento dos geradores a sistemas Flywheel. Na figura 11 pode ser visto um exemplo do sistema.

Figura 11 – Planta de geração de energia pela força das ondas.



Fonte: adaptado de CORPOWER, 2015.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelo estudo realizado neste trabalho podemos concluir que o uso de sistemas de armazenagem de energia Flywheel se apresenta como uma solução viável do ponto de vista financeiro, técnico e ambiental para a mitigação tanto de efeitos de variação de tensão de curta duração como afundamentos de tensão (SAG). O sistema Flywheel também se apresenta como solução viável para uso conjugado as fontes de energia renovável como eólica e solar para suavização de oscilações de tensão.

O desenvolvimento deste tipo de sistema encontra-se em franca expansão em todos seus aspectos, seja no conjunto mecânico no estudo de materiais diversos para a composição do volante de inercia e na aplicação de mancais magnéticos, seja no conjunto elétrico estudando-se a aplicação de diversas topologias de máquinas elétricas bidirecionais como máquinas de indução, motores/geradores com ímãs permanentes e máquinas de relutância chaveadas e nos sistemas de controle. Todavia ainda não há referências do uso do sistema Flywheel no Brasil salvo em produções acadêmicas.

Potential of Flywheel Storage Systems for energy production quality - applications

ABSTRACT

This article is a review of Flywheel Energy Storage Systems including its history, development, characteristics and applications as a method of energy storage and aid in minimizing problems due to abnormalities in energy supply. Flywheel Systems have some advantages over available alternatives such as: high life cycle, high power density and low environmental impact. This article includes constructive characteristics of Flywheel Systems and their applications coupled with renewable energy supply solutions.

KEYWORDS: Flywheel. Power quality improvement. Energy storage.

REFERÊNCIAS

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional PRODIST. Módulo 8, Revisão 6, 2008.

ACTIVE POWER ITÁLIA S.r.l. **Valutazione Comparata Dell'affidabilità Degli UPS con Flywheel Integrato e Degli UPS a Doppia Conversione con Batterie.** Disponível em <http:// <http://ctm.it/pdf/Valutazione-comparata-affidabilita-UPS.pdf>>. Acesso em: 15/11/2015.

BOLLEN, M.H.J. **Understanding Power Quality Problems. Voltage Sags and Interruptions.** Power Engineering. IEEE Press, 2000.

BURKE, A. **Ultracapacitors: why, how and where is the technology.** Journal of Power Sources, 91, p: 37-50, 2000.

CORPOWER TECHNOLOGY. **Catalogo Eletrônico.** Disponível em: <<http://corpowersocean.com/corpower-technology/corpower-energy-wave-converter>>. Acesso em 27/11/2015.

CRESESB/CEPEL. **Energia Solar e Suas Aplicações.** Sistema Eletrobrás. Rio de Janeiro,1999.

DIAS-GONZÁLEZ, FRANCISCO. **Contributions of Flywheel Systems in Wind Power Plants.** Tese de PhD, Catalonia Institute for Energy Research, Barcelona, 2013.

HASSENZAHN et al. **Superconducting Magnetic Energy Storage.** EPRI Energy Storage Handbook, 2000.

HELKIN, STEVEN ALEXANDER. **Design and Optimization of a Wave Energy Harvester Utilizing Flywheel Energy Storage System.** University of Central Florida, 1999.

KAMATH, HARESH. KEY, TOM – **EPRI Storage Handbook: Flywheels.** EPRI Storage Handbook, 2002.

MARTINHO, EDSON. **Distúrbios da Energia Elétrica**. Editora Érica. São Paulo, 2014.

OLIVEIRA, JOSÉ GIL. **Avaliação de Distúrbios de Distribuição de Energia Elétrica Devido às Distorções Harmônicas**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 1995.

SAMINEMI, S., JOHNSON, B.K., HESS, H.L. AND LAW, J.D. – **Modeling and Analysis of a Flywheel Energy Storages System for Voltage Sag Correction, Transaction on Industry Applications**. IEEE, Vol 42, pp 10-11, 2006.

SCHOENUNG, SUSAN M. **Characteristics and Technologies for Long vs Short Term Energy Storages**. Sandia National Laboratories, EUA, 2001.

Recebido: 09 mar. 2019.

Aprovado: 26 jun. 2019.

DOI: 10.3895/rts.v15n37.9781

Como citar: CARMO, C. E M. do; TATIZAWA, H. Potencial dos sistemas de armazenamento flywheel para a qualidade da produção de energia - aplicações. **R. Technol. Soc.**, Curitiba, v. 15, n. 37, p. 479-497, jul./set. 2019. Disponível em: < <https://periodicos.ufpr.edu.br/rts/article/view/9781>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Carlos Eduardo Mendes do Carmo

Praça Santo Antônio, 300 - galpão 06, Barra Funda, Votorantim-sp. CEP 18.114-330.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

