

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO**

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA UPS  
FLYWHEEL**

Carlos Ribeiro Dias

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia**

Orientador: Professor Doutor António Carvalho de Andrade

Porto, Novembro 2013



## Resumo

Nesta dissertação, numa primeira fase, é efetuado um estudo ao estado da arte da qualidade de energia elétrica e do volante de inércia mais conhecido por *flywheel*. Como primeiro tópico da primeira fase é efetuado um estudo das perturbações possíveis, baseado na sua forma de onda, são representadas graficamente as diversas perturbações, é efetuada uma análise das possíveis causas para cada perturbação e por fim, também são apresentadas as possíveis soluções para as mesmas perturbações. Como possíveis soluções, são apresentados os vários sistemas de armazenamento nomeadamente, UPS (fonte de alimentação ininterrupta), volantes de inércia, entre outros sistemas. No segundo tópico é efetuada uma introdução ao sistema *flywheel*, apresentando alguns aspetos importantes, tais como as várias vantagens do seu uso como sistema de armazenamento de energia, diferentes tipos de aplicações, sua constituição (formas, tipos de matérias, máquina elétrica, entre outros) e são apresentados também os diferentes tipos de aplicações, utilizando-a como sistema de armazenamento.

A segunda fase é dedicada às equações fundamentais para o desenvolvimento dum *flywheel*. Neste caso são apresentadas várias equações para o cálculo da energia armazenada, momento de inércia, tensões, entre muitas outras equações essenciais.

Na terceira fase é efetuada uma comparação entre diversos sistemas de armazenamento de energia, usando tanto a tecnologia *flywheel* como baterias tradicionais. Esta comparação foi realizada em três categorias, 150 kVA, 600 kVA e 1200 kVA. Em cada categoria é realizada uma comparação entre diversos fatores tais como: peso, custos, dimensões, limitações, regulações possíveis e questões ambientais.

Como quarta fase, é apresentado um modelo de uma draga utilizando o sistema *flywheel* como armazenamento de energia. Neste modelo é apresentada a *flywheel* como solução, uma vez que armazena a energia recuperada dos processos eletromecânicos que necessitam de absorver grandes quantidades de energia. Desta forma, consegue-se uma redução no consumo de energia. Os resultados da simulação mostram uma redução de 25% de energia e uma redução entre 80% a 90% em todas as categorias de emissões.

**Palavras-chave:** Perturbações na QEE, Tecnologias de armazenamento, *flywheel*.



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que me ajudaram de um modo direto ou indireto na realização desta dissertação.

Em primeiro lugar um profundo agradecimento aos meus pais e a todos os familiares mais próximos pela sua disponibilidade e apoio incondicional ao longo dos anos.

Um especial agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor António Carvalho de Andrade pelo apoio e pela larga disponibilidade ao longo da realização deste trabalho, assim como as suas sugestões e conselhos que se revelaram fundamentais para a conclusão da dissertação.

Um agradecimento ao Engenheiro Jorge Ferreira da Barloworld Stet por esclarecimentos no âmbito da dissertação.

Finalmente um agradecimento a todos os meus colegas de curso e amigos, que ao longo do curso me têm ajudado e motivado, e que sem eles este percurso seria mais difícil.



## Índices

Resumo.....	III
Agradecimentos .....	V
Lista de figuras .....	XI
Lista de tabelas.....	XIII
Lista de siglas.....	XV
Lista de símbolos .....	XVII
Capítulo 1 - Introdução .....	1
1.1    Objetivo do trabalho .....	3
1.2    Organização do trabalho .....	3
Capítulo 2-Estado da arte.....	5
2.1 Introdução .....	7
2.2 Qualidade de energia .....	7
2.2.1    Perturbações da QEE.....	7
2.2.2    Principais soluções para melhorar a QEE .....	16
2.3 Introdução ao <i>flywheel</i> .....	27
2.3.1 Diferentes tipos de aplicações possíveis das <i>Flywheels</i> .....	29
2.4 Principais partes constituintes duma <i>Flywheel</i> .....	31
2.4.1 Materiais que constituem uma <i>Flywheel</i> .....	31
2.4.2 Forma da <i>flywheel</i> .....	32
2.4.3 Máquina elétrica .....	32
2.4.4 Conversor de potência .....	37
2.4.5 Rolamento magnético .....	38
2.4.6 Involucro.....	42
Capítulo 3 – Estudo da <i>flywheel</i> .....	43

3.1 Equações fundamentais para o desenvolvimento duma <i>flywheel</i> .....	45
3.2 Raio interior, raio exterior e velocidade de rotação .....	48
3.3 Geometria e material do rotor da <i>flywheel</i> .....	53
3.4 Exemplos .....	55
Capítulo 4 – Comparação entre diversos sistemas .....	57
4.1 Introdução .....	59
4.2 Comparação 150 Kva.....	60
4.3 Comparação 600 Kva.....	63
4.4 Comparação 1200 Kva.....	66
4.5 Conclusão .....	69
Capítulo 5 – Simulação duma <i>flywheel</i> numa draga .....	73
5.1 Princípio geral.....	75
5.2 Critérios adotados .....	76
5.2.1 Sistemas eletromecânicos utilizados .....	76
5.2.2 Características dos motores.....	76
5.2.3 Guinchos e cabos.....	77
5.2.4 Características do balde .....	78
5.2.5 Controlo do balde.....	79
5.2.6 Cálculos apresentados.....	79
5.2.7 Sistema de controlo .....	81
5.2.8 Metodologia aplicada.....	81
5.2.9 Critérios apresentados .....	83
5.3 Simulação .....	85
5.4 Resultados .....	87
5.5 Conclusão e pontos críticos.....	91
Capítulo 6 - Conclusão.....	93
REFERENCIAS.....	97

ANEXO 1 Coeficiente de Poisson.....	101
ANEXO 2 Cálculos de um rotor de uma flywheel para diferentes tipos de carga.....	105



# Lista de figuras

Fig. Nº 1 Origem de avarias na QEE .....	8
Fig. Nº 2 Transitório impulsivo .....	10
Fig. Nº 3 Transitório oscilatóri.....	10
Fig. Nº 4 Interrupção instantânea .....	11
Fig. Nº 5 Cava de tensão .....	11
Fig. Nº 6 Subtensão prolongada .....	12
Fig. Nº 7 Sobretensão momentânea .....	13
Fig. Nº 8 Sobretensão prolongada .....	13
Fig. Nº 9 DC offset .....	14
Fig. Nº 10 Distorção harmónica .....	14
Fig. Nº 11 Distorção Interharmónica.....	15
Fig. Nº 12 Distorção tipo “Notching” .....	15
Fig. Nº 13 Ruído.....	16
Fig. Nº 14 Diferentes pontos do sistema elétrico .....	16
Fig. Nº 15 Custo aos diferentes níveis de intervenção.....	17
Fig. Nº 16 Principais resoluções duma Flywheel como QEE .....	24
Fig. Nº 17 Gráfico energia / potência.....	28
Fig. Nº 18 a) Componentes duma FBESS b)Detalhes duma Flywheel moderna .....	28
Fig. Nº 19 Layout de um sistema de armazenamento de energia duma Flywheel.....	29
Fig. Nº 20 Flywheel chumaceiras magnéticas usados em sistemas ferroviários .....	31
Fig. Nº 21 Diferentes formas possíveis da Flywheel .....	32
Fig. Nº 22 Exemplo dum rolamento magnético.....	38
Fig. Nº 23 Exemplo esquemático usando campo magnético.....	39
Fig. Nº 24 Estrutura dum rolamento ativo.....	40
Fig. Nº 25 Rolamento hibrido magnético.....	41
Fig. Nº 26 Layout duma Flywheel.....	46
Fig. Nº 27 Forças e restrições numa roda com espessura e densidade uniforme .....	47
Fig. Nº 28 Força tangencial e radial num pequeno cilindro .....	48
Fig. Nº 29 Radial e tangencial tensão para diferentes valores.....	49
Fig. Nº 30 Relação entre raio externo e a velocidade, neste caso para carbono AS4C .....	50

Fig. Nº 31 Representação do limite de energia por volume .....	52
Fig. Nº 32 Exemplo duma draga .....	75
Fig. Nº 33 Dimensões do balde .....	78
Fig. Nº 34 Quadro de transferência .....	82
Fig. Nº 35 Gráfico da trajetória R5 .....	84
Fig. Nº 36 Gráfico da trajetória R4 .....	85
Fig. Nº 37 Bloco de simulação .....	86
Fig. Nº 38 Simulação da draga.....	87
Fig. Nº 39 Material esticado em uma direção.....	103

## Lista de tabelas

Tabela Nº 1 Diferentes tipos de perturbações.....	9
Tabela Nº 2 Problemas de QEE e soluções possíveis .....	25
Tabela Nº 3 Características para diferentes materiais das Flywheels .....	32
Tabela Nº 4 Principais características das máquinas elétricas usadas por FBESS.....	33
Tabela Nº 5 Principais vantagens e desvantagens de máquinas permanente e de indução.....	34
Tabela Nº 6 Diferentes tipos de aplicações das Flywheels .....	35
Tabela Nº 7 Fator K para diferentes formas geométricas.....	54
Tabela Nº 8 Características de diversas matérias para rotor 's comuns .....	55
Tabela Nº 9 Comparação de 150KVA .....	60
Tabela Nº 10 Comparação de 600KVA .....	63
Tabela Nº 11 Comparação de 1200KVA .....	66
Tabela Nº 12 Vantagens de uma Flywheel face às baterias.....	71
Tabela Nº 13 Motores utilizados.....	77
Tabela Nº 14 Detalhes dos guinchos e cabos.....	78
Tabela Nº 15 Características da Flywheel .....	80
Tabela Nº 16 Tabela de transferência de energia.....	82
Tabela Nº 17 Energia usada .....	87
Tabela Nº 18 Carga de energia com e sem o uso da Flywheel .....	88
Tabela Nº 19 Energia necessária por motor .....	88
Tabela Nº 20 Eficiência operacional com e sem o uso da Flywheel .....	89
Tabela Nº 21 Consumo de combustível com e sem o uso da Flywheel.....	90
Tabela Nº 22 Emissões libertadas com e sem o uso da Flywheel.....	90



# Lista de siglas

<i>AT</i>	Alta Tensão
<i>AC</i>	Corrente Alternada
<i>DVR</i>	Dynamic Voltage Restorers
<i>DC</i>	Corrente Contínua
<i>DC Offset</i>	Corrente DC deslocada
<i>EDS</i>	Descarga Electroestática
<i>Flickering</i>	Efeito visual de tremulação
<i>FET</i>	Transístor de Efeito de Campo
<i>FBESS</i>	<i>Flywheel</i> como sistema de armazenamento de energia
<i>IGBT</i>	Transístor Bipolar de Porta Isolada
<i>MTBF</i>	Tempo médio entre avarias
<i>MTTR</i>	Tempo médio de funcionamento
<i>Notching</i>	Micro-Cortes
<i>Overvoltage</i>	Sobretensão prolongada
<i>PMSM</i>	Máquina síncrona de Íman permanente
<i>PWM</i>	Largura de pulso modulada
<i>QEE</i>	Qualidade de Energia Elétrica
<i>SWELL</i>	Sobretensão Momentânea
<i>SVC</i>	Static VAR Compensator
<i>TD</i>	Transporte e Distribuição
<i>UPS</i>	Sistemas de Alimentação Ininterrupta
<i>VDR</i>	Voltage Dependent Resistor
<i>VRM</i>	Máquinas de relutância variável
<i>VSI</i>	Inversor de fonte de tensão



# Lista de símbolos

## Símbolos Latinos:

$a$	Relação entre raio interno e raio externo, $a = r_i/r_o$
$E$	Energia cinética armazenada [J]
$EMJ$	Energia cinética armazenada [MJ]
$E_{lim}$	Limite de Energia [MJ]
$E_{lim\_per\_volume}$	Limite de energia por volume total [MJ/m <sup>3</sup> ]
$E_{lim\_per\_volume\_rotating\_mass}$	Limite de energia por volume total de rotação da massa [MJ/m <sup>3</sup> ]
$e_m$	Energia cinética por unidade de massa [MJ. m <sup>2</sup> /kg]
$e_v$	Energia cinética por unidade de volume [MJ/m <sup>3</sup> ]
$f$	Frequência [Hz]
$h$	Comprimento do cilindro da <i>Flywheel</i> [m]
$I$	Intensidade de corrente elétrica [A]
$J$	Momento de Inercia [Kg/m <sup>2</sup> ]
$K$	Forma fator
$m$	Massa [Kg]
$N$	Velocidade [rpm]
$r$	<i>Flywheel</i> raio [m]
$r_i$	Raio interno [m]
$r_o$	Raio externo [m]
$S$	Secção [m <sup>2</sup> ]
$P$	Pressão [Pa]

## Símbolos Gregos:

$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\pi$	Constante com o valor de 3.14159265
$\rho$	Densidade do material do cilindro [Kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	Angulo do estator [rad]
$\sigma$	Máxima tensão no material da <i>Flywheel</i> [MPa]
$\sigma_r$	Tensão Radial [MPa]



## Capítulo 1 - Introdução

---



## 1.1 Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho é estudar a utilização do sistema *flywheel* como sistema de armazenamento de energia. Podemos observar inúmeras vantagens deste sistema relativamente aos sistemas convencionais, não só pela sua velocidade de comutação, mas também pela capacidade de corrigir possíveis perturbações da energia elétrica.

## 1.2 Organização do trabalho

Este trabalho é composto por seis capítulos onde são abordados diferentes temas, desde o sistema *flywheel* à QEE.

Os seguintes temas foram analisados:

- Qualidade da energia elétrica, onde são mencionados várias perturbações e possíveis soluções para as suas causas;
- A *flywheel* como sistema de armazenamento de energia;
- Partes constituintes da *flywheel*;
- Equações fundamentais para o desenvolvimento duma *flywheel*;
- Comparação entre vários tipos de sistemas de armazenamento de energia;
- Aplicação duma *flywheel* a uma draga.

Este capítulo constitui uma introdução geral sobre o trabalho a desenvolver.

Serão abordados no Capítulo 2 alguns conceitos sobre a QEE e seus principais problemas e será feita uma introdução à *flywheel*, dando de um modo geral um conhecimento sobre os vários problemas relacionados com a qualidade de energia bem como possíveis soluções.

No capítulo 3 apresentam-se mais pormenorizadamente as equações fundamentais da *flywheel*. Desde a equação para a energia armazenada, passando pelo cálculo da quantidade de energia que pode ser armazenada na *flywheel*, tensões, relação entre a capacidade de armazenamento de energia e a geometria da *flywheel*, entre outros aspetos importantes a ter em consideração para um possível desenvolvimento duma *flywheel*.

No capítulo 4 comparam-se vários sistemas de armazenamento de energia. Esta comparação foi feita em três categorias de potência. Foi feita uma comparação entre sistemas de armazenamento de energia utilizando baterias e tecnologia *flywheel* como sistemas de armazenamento de energia.

No capítulo 5 será exposto um estudo de uma implementação duma *flywheel* numa draga. Serão discutidos os resultados desse mesmo estudo. As conclusões são feitas no final do capítulo.

No capítulo 6 é efetuada uma conclusão do trabalho realizado.

## Capítulo 2-Estado da arte

---



## 2.1 Introdução

“Foi durante a revolução Industrial ocorrida entre 1760 e algures entre 1820 e 1840 que se verificou o despertar do uso da *Flywheel*, onde esta era aplicada em vários segmentos, tais como por exemplo no uso nas máquinas a vapor. Durante vários anos diversos formatos e estudos foram implementados, mas levou até ao início do século XX para o atual estudo da forma do rotor e analisadas as tensões na rotação. Mais tarde em 1970 foi proposta a *flywheel* como sistema de armazenamento implementada nos veículos elétricos e alternativa para armazenamento em caso de falha de energia. No mesmo tempo devido ao desenvolvimento das tecnologias, os rotores seriam construídos a partir de compósitos de fibra, e na década de 80 os rolamentos magnéticos começaram a aparecer.” [7]

Hoje em dia as *Flywheels* são construções complexas, que têm sido alvo de vários estudos devido ao seu potencial e possíveis aplicações.

## 2.2 Qualidade de energia

“O conceito QEE tem vindo a sofrer alterações sucessivas com a evolução tecnológica. Ainda há poucos anos, quando se falava em QEE a principal preocupação residia na continuidade de serviço. Contudo, para além da continuidade de serviço, têm vindo a assumir outros parâmetros de QEE, tais como, a amplitude e a frequência da tensão, o desequilíbrio de tensões e a distorção harmónica.

Paralelamente aos avanços tecnológicos, a economia mundial tem vindo a evoluir no sentido de uma maior dependência da energia elétrica. Tendo em consideração o aumento da sensibilidade do equipamento a perturbações de QEE, de reduzida severidade, e as baixas margens de lucro das organizações, a garantia de elevada QEE constitui um fator crucial para a competitividade das organizações em mercados globalizados.

Apesar dos investimentos efetuados pelos operadores das redes de Transporte e Distribuição de energia elétrica na modernização, o mercado necessita de energia elétrica com níveis de qualidade claramente superiores ao que é atingível através dos sistemas de TD convencionais.” [1]

### 2.2.1 Perturbações na QEE

A monitorização em sistemas elétricos torna-se necessária para poder avaliar a qualidade da energia distribuída. Com o aparecimento dos sistemas de controlo industrial, que têm contribuído para o

aumento da produtividade industrial e para o uso mais eficiente da energia elétrica, exige requisitos de qualidade mais rigorosos para a energia elétrica.

A qualidade de energia depende dos seguintes fatores:

- **Fiabilidade** é a capacidade que um sistema ou componente tem de executar as suas funções sob determinadas condições e durante um certo período de tempo.

$$\text{Fiabilidade} = e^{-\text{tempo}/\text{MTBF}}$$

O MTBF significa tempo médio entre avarias e MTTR significa tempo médio de funcionamento.

- **Disponibilidade** é o grau a que um sistema ou componente está operacional e acessível, quando é necessária a sua utilização.

$$\text{Disponibilidade} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

A figura 1 apresenta as possíveis causas das avarias na QEE.



Fig. Nº 1 Origem de avarias na QEE [32]

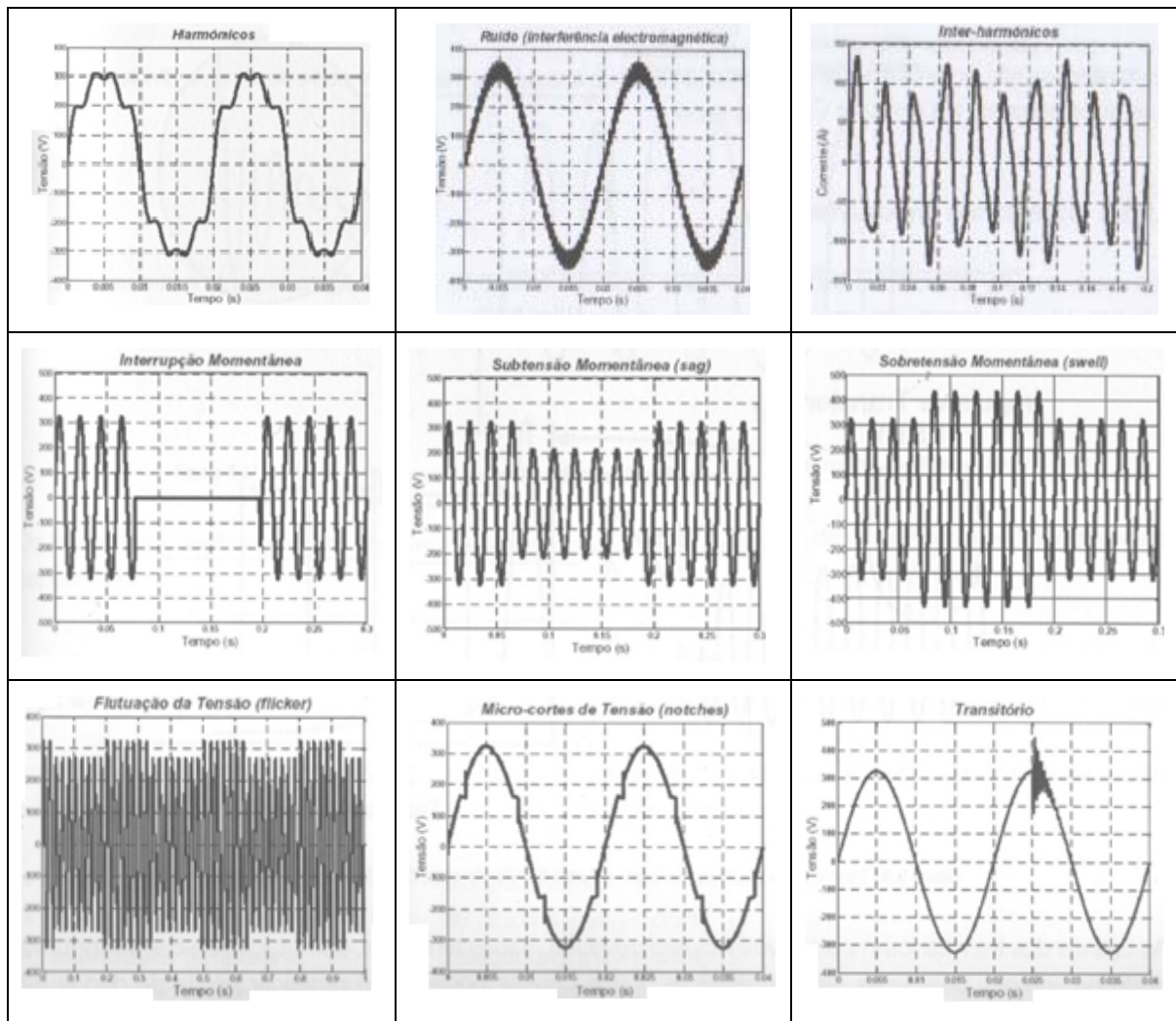
As ocorrências usuais no sistema elétrico como energizações de linhas de transmissão de transformadores ou de curto-circuitos, originando variações de tensão de curta duração, podem ocasionar a paragem de grandes unidades industriais. Soma-se também o facto de que as cargas industriais, comerciais e até residenciais que contêm componentes eletrónicos, contribuem para piorar a QEE do sistema elétrico, pois injetam harmónicos no sistema.

As perturbações possíveis da QEE, segundo a norma 1159-1995 do IEEE, são as seguintes baseadas na forma de onda, nomeadamente:

- Transitórios;
- Interrupções;
- Cavas de Tensão;
- Subtensões;
- Sobretensões;
- Distorção da forma de onda.

Como se pode ver na tabela 1, esta ilustra as diversas formas de onde mediante as diversas perturbações.

Tabela Nº 1 Diferentes tipos de perturbações [32]



## Transitórios

Os transitórios são potencialmente o tipo de perturbação de energia que mais danos podem causar.

Estes dividem-se em duas subcategorias: Impulsivas e Oscilatórias.

- **Transitórios Impulsivos**

São eventos muito rápidos que podem variar entre os 5 e os 50 ns. A figura 2 ilustra um transitório impulsivo provocado por uma descarga electrostática.

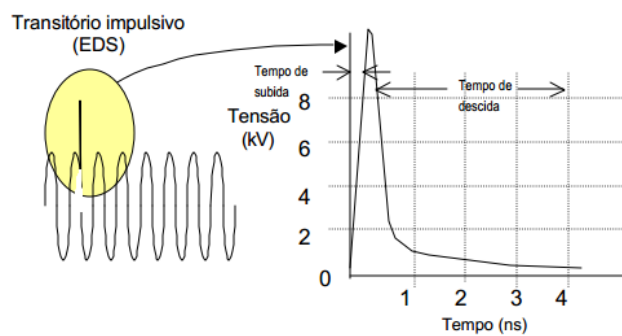


Fig. Nº 2 Transitório impulsivo [32]

“As causas dos transitórios impulsivos incluem a trovoada, fracas terras, comutação de cargas indutivas, corte de energia, descargas electrostáticas. Estas causas poderão provocar perda de dados e/ou avarias de equipamentos eléctricos.

No que diz respeito às descargas atmosféricas, como a trovoada, os métodos viáveis para protecção dos equipamentos são os descarregadores de sobretensões afinados para um determinado nível de protecção e de risco.” [32]

- **Transitórios Oscilatórios**

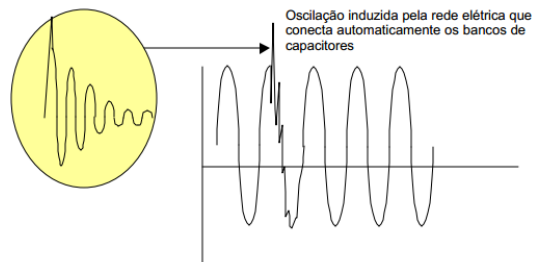


Fig. Nº 3 Transitório oscilatório [32]

Os transitórios oscilatórios têm como causa principal a comutação de cargas fortemente indutivas ou capacitivas. Um exemplo deste tipo de perturbação pode ser observado na figura 3.

### Interrupções

Uma interrupção é definida como uma total perda de tensão de alimentação. Uma interrupção pode ser dividida em várias subcategorias dependendo da sua duração:

- Interrupção instantânea: 0,5 a 30 ciclos;
- Interrupção momentânea: 30 a 2 segundos;
- Interrupção temporária: 2 segundos a 2 minutos;
- Interrupção prolongada: mais de 2 minutos.

A figura 4 apresenta um exemplo de uma interrupção.

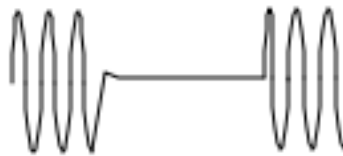


Fig. Nº 4 Interrupção instantânea [32]

### Cava de Tensão

“É uma redução da tensão alternada a uma dada frequência com a duração de 0,5 ciclos a 1 minuto. São usualmente originadas por falha do sistema elétrico ou devido a ligações de cargas com elevadas correntes de arranque.



Fig. Nº 5 Cava de tensão [32]

A figura 5 ilustra um exemplo de uma cava de tensão, onde, como podemos observar existem oscilações na sua amplitude de forma de onda. Isto acontece por exemplo, no arranque de um motor que pode consumir seis vezes a sua corrente nominal. Uma carga elevada e rápida pode criar uma

queda de tensão na rede elétrica mais próxima. Esta situação poderá danificar equipamentos eletrônicos, provocar perda de dados informáticos e defeitos no processo industrial.

Para evitar este fenómeno de cava de tensão poderão ser instalados mecanismos de redução da corrente de arranque, como, por exemplo, variadores eletrónicos de velocidade. Utilizando sistemas de UPS, motores geradores, técnicas de otimização da topologia da rede elétrica poderão solucionar muitos casos de cavas de tensão e também de interrupções.” [32]

### **Subtensões**

“É uma cava de tensão de duração superior a 1 minuto. Podem criar sobreaquecimento nos motores e conduzir a falhas em cargas não lineares. Como exemplo de subtensão, podemos observar a figura 6. “ [32]

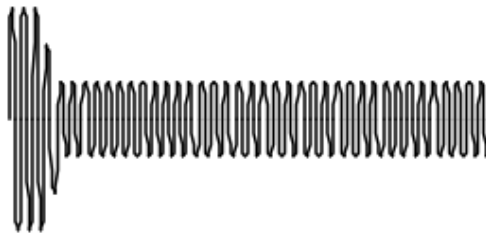


Fig. Nº 6 Subtensão prolongada [32]

### **Sobretensões:**

As sobretensões podem dividir-se em dois tipos: Sobretensão Momentânea e sobretensão prolongada.

- **Sobretensão Momentânea**

“Uma swell é o inverso de uma cava de tensão. Existe um aumento na tensão AC durante 0,5 ciclos a 1 minuto. As causas mais usuais são ligações de neutro de alta impedância, reduções repentinas de carga elevada ou defeitos de fase – terra em redes trifásicas. Podemos observar na figura 7 um exemplo deste tipo de sobretensão.” [32]

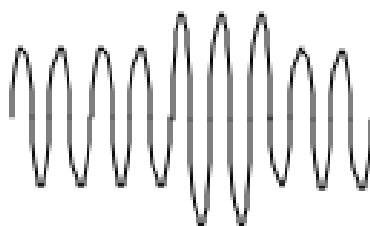


Fig. Nº 7 Sobretensão momentânea [32]

Uma swell poderá provocar erros de dados, tremulação na iluminação, degradação de contactos elétricos, danificação de material eletrónico, degradação de isolamento, entre outros possíveis efeitos.

- **Sobretensão Prolongada**

“Uma sobretensão prolongada pode ser resultado de problemas elétricos por média ou longa duração, podendo ser comparada a uma swell mais extensa. Pode ocorrer quando, por exemplo, o regulador das tomadas dos transformadores a montante está em posição incorreta.” [32]

A figura 8 ilustra um exemplo de uma sobretensão prolongada.

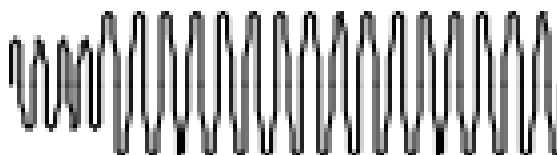


Fig. Nº 8 Sobretensão prolongada [32]

### **Distorção da Forma de Onda:**

Existem cinco tipos principais de distorção da forma de onda:

- DC Offset;
- Harmónicas;
- Interharmónicas;
- Micro-Cortes;
- Ruído.

- **Corrente DC Offset**

“Uma corrente DC pode ser induzida num sistema de distribuição AC quando existe falha nos equipamentos retificadores AC/DC. Esta corrente DC poderá somar à corrente AC, fazendo uma corrente composta com componente AC e DC. Sobreaquecimento e saturação de transformadores poderão ser as causas do trânsito de corrente DC. Podemos observar na figura 9 um exemplo de forma de onda de uma DC Offset.” [32]

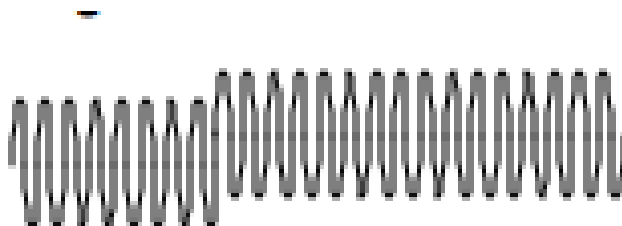


Fig. Nº 9 DC offset [32]

A solução para problemas devido a DC Offset será substituir ou reparar a fonte de origem do problema: retificadores ou onduladores.

- **Harmónicos**

“Uma distorção harmónica é uma distorção da forma de onda como se pode observar na figura 10. A distorção harmónica é a corrupção da forma da onda sinusoidal a frequências múltiplas da fundamental (ex. 150Hz é a terceira harmónica de uma frequência fundamental de 50Hz).

Os sintomas de problemas harmónicos incluem sobreaquecimento em transformadores, condutores de neutro e outros equipamentos de distribuição eléctricos. Os métodos utilizados para minimizar a distorção harmónica serão sobre dimensionar o condutor de neutro e instalar filtros harmónicos. “[32]



Fig. Nº 10 Distorção harmónica [32]

- **Interharmónicas**

“Os interharmónicas são um tipo de distorção da forma de onda que são usualmente o resultado de sinais incluídos por conversores estáticos de frequência, motores de indução, entre outros.

O sintoma mais visível é o efeito visual de tremulação de ecrãs e lâmpadas incandescentes, sobreaquecimento anormal e interferências em aparelhos de comunicação.” [32]

A figura 11 mostra um exemplo de uma forma de onda com distorção Interharmónica.

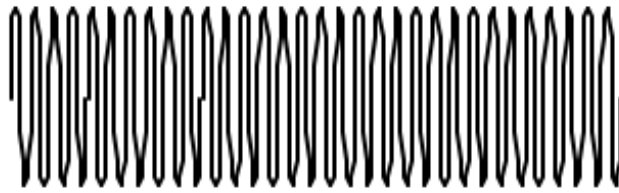


Fig. Nº 11 Distorção Interharmónica [32]

- **Micro – Cortes**

“É uma perturbação periódica de tensão causada por equipamentos eletrónicos, como variadores eletrónicos de velocidade, variadores de intensidade luminosa e fornos de arco em determinadas condições.

Este tipo de perturbação poderá ser descrito como um problema de transitórios impulsivos mas de carácter periódico. As consequências usuais são as falhas de sistema, perda de dados e problemas em transmissão de dados. A figura 12 ilustra um exemplo de uma forma de onda com distorção tipo Micro-Cortes.” [32]



Fig. Nº 12 Distorção tipo “Notching” [32]

- **Ruído**

“Ruído é uma tensão ou corrente de alta frequência sobreposta com a componente fundamental da tensão ou corrente. Pode ser gerado por equipamentos de electrónica de potência, circuitos de controlo, fornos de arco, fontes comutadas, etc.

O ruído conforme visualizado na figura 13, poderá causar problemas de ordem técnica como erros de dados, mau funcionamento de equipamentos, falhas de componentes a longo prazo, avarias em discos duros e visualizações distorcidas de vídeo.” [32]

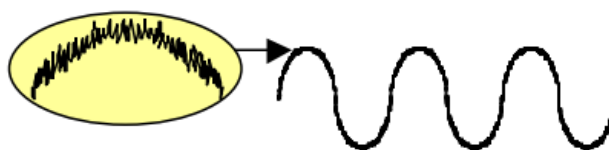


Fig. Nº 13 Ruído [32]

### 2.2.2 Principais soluções para melhorar a QEE

“Os problemas que afetam a QEE podem manifestar-se em diversos pontos do sistema eléctrico: na rede de transporte, na rede de distribuição, no interface entre a rede e as instalações de utilização de energia e no próprio equipamento do cliente. As estratégias para mitigação ou prevenção de problemas de QEE podem ser concretizados a diferentes níveis, como exemplifica a figura 14.” [1]

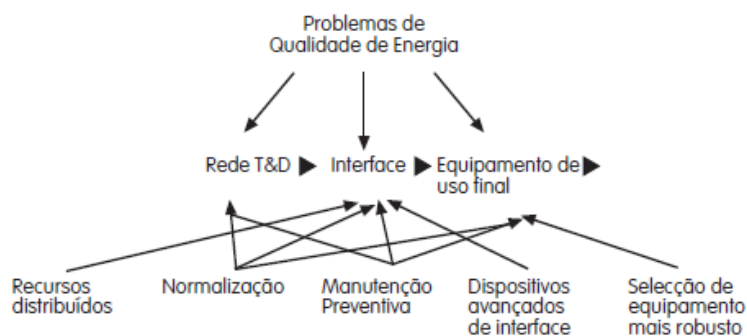


Fig. Nº 14 Diferentes pontos do sistema eléctrico [1]

“Em função do nível de atuação, o custo das soluções pode ser consideravelmente diferente, conforme representado na figura 15.” [1]

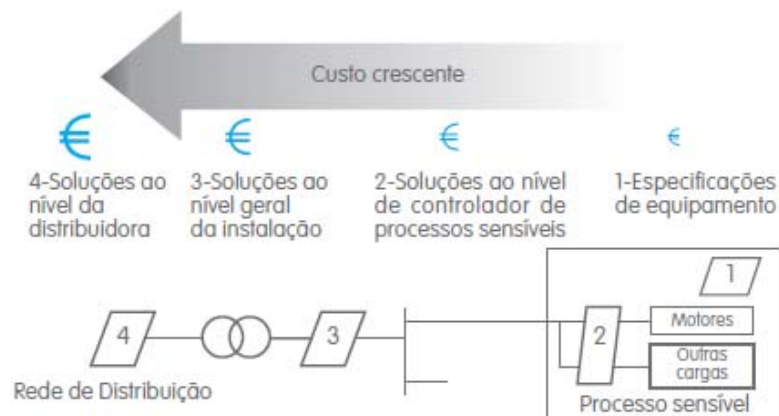


Fig. Nº 15 Custo aos diferentes níveis de intervenção [1]

### *Medidas e meios a adotar*

As soluções para evitar as perturbações distintas são:

- Seleção de equipamentos robustos;
- Sistemas de armazenamento de energia.

#### Seleção de equipamentos robustos

“Muitas vezes, as consequências das perturbações da QEE são mais dispendiosas que as soluções para as evitar. Uma das estratégias mais simples e mais económica para evitar os problemas associados à QEE passa pelo desenvolvimento de equipamento mais imune às perturbações de QEE.

Os fabricantes podem adotar medidas para diminuição da sensibilidade do equipamento, tais como, implementação de pequenos dispositivos de armazenamento de energia.

A maioria das fontes de alimentação do equipamento eletrónico é constituída por retificadores estáticos baseados em díodos. Com este tipo de retificadores, é muito difícil controlar a tensão no barramento DC, sendo o seu valor praticamente dependente da tensão de alimentação. Contudo, em algumas aplicações, já começam a ser utilizados retificadores ativos, baseados em IGBT.

A designação de retificador ativo está relacionada com a possibilidade de controlo permanente da comutação dos IGBT. A unidade de gestão dos IGBT tem capacidade de controlo de tensão do barramento DC e da forma de onda da corrente, o que possibilita a otimização do fator de potência e a diminuição da distorção harmónica da corrente absorvida.

Dada a alta frequência de comutação dos IGBT é possível controlar, com precisão, a tensão do barramento DC, garantindo um valor aproximadamente constante, mesmo com variações significativas da tensão de alimentação.” [1]

### Sistemas de armazenamento de energia

“Os sistemas de controlo de processos são, frequentemente, o equipamento mais sensível a cavas de tensão em alguns processos industriais.

Para atingir maior imunidade no equipamento pode aptar-se por duas estratégias: utilização de componentes mais robustos ou implementação de sistemas integrados de armazenamento de energia.

A sensibilidade de componentes eletrónicos, como fontes de alimentação, relés, contactores e alguns sensores, a perturbações de QEE conduz frequentemente a interrupções intempestivas do funcionamento das respetivas máquinas.

A utilização de componentes mais robustos pode não implicar investimentos muito elevados e evitar grande parte das interrupções intempestivas, garantindo um rápido retorno dos investimentos.” [1]

Podem ser adaptados os seguintes sistemas:

- *Descarregadores de sobretensão*

“Os descarregadores de sobretensão são dispositivos utilizados para proteção de equipamento sensível a eventuais danos causados por sobretensões. Estes dispositivos têm como função desviar as sobretensões para a terra de modo a que estas não sejam perigosas para o equipamento. Devem ser instaladas o mais próximo possível das cargas a proteger, entre a provável origem do defeito ou carga. Nas subestações são geralmente instalados junto aos transformadores, normalmente em AT, mas também podem ser instalados em MT ou em ambos os lados.

Os descarregadores de sobretensões também podem ser instalados nas instalações do cliente, nos quadros principais e junto às cargas sensíveis tal como equipamentos eletrónicos. Estes descarregadores de sobretensões transitórias são normalmente designados por *Voltage Dependent Resistor*.” [1]

- *Filtros de ruído*

“Entende-se por ruído todo o sinal não desejado, para além do sinal fundamental de 50 Hz. O Ruído pode surgir em modo comum ou diferencial. O ruído de modo comum refere-se ao ruído entre condutores ativos, fases ou neutro, e terra. Por outro lado, o ruído de modo diferencial verifica-se entre condutores de fase e neutro.

Os filtros de ruído evitam que as tensões ou as correntes com frequências não desejadas atinjam o equipamento sensível. Por exemplo, a filtragem de frequências mais elevadas pode ser conseguida através da associação de bobines e condensadores de forma a constituírem um filtro passa-baixo.” [1]

- *Transformadores de isolamento*

“Os transformadores de isolamento são frequentemente utilizados para filtragem de ruído e de sobretensões transitórias de reduzida amplitude dos circuitos de alimentação de cargas sensíveis. Os transformadores de isolamento possuem uma blindagem, constituída por um material não magnético, ligada à terra. O ruído de alta frequência e alguns transitórios, provenientes do primário, são conduzidos para a terra através da capacidade estabelecida entre a blindagem e o primário do transformador.” [1]

- *Transformadores de tensão constante*

“Os transformadores de tensão constante, também conhecidos por transformadores Ferro ressonantes, garantem uma tensão de saída aproximadamente constante, mesmo na presença de pequenas variações da tensão de entrada.

Estes transformadores garantem alguma estabilidade da tensão através de dois fenómenos evitados nos transformadores convencionais: ressonância e saturação magnética do núcleo. Verifica-se ressonância nas situações em que a impedância do condensador é igual à impedância do enrolamento ressonante, provocando correntes muito elevadas, que garantem a saturação do núcleo magnético do transformador. Quando o núcleo está saturado, o fluxo magnético no núcleo manter-se-á aproximadamente constante, obtendo-se assim uma tensão aproximadamente constante aos terminais do secundário do transformador.

Em regime de saturação, a tensão de saída destes transformadores pode ser aproximada a uma onda retangular, apresentando uma distorção harmónica bastante significativa. O rendimento destas máquinas é geralmente baixo, podendo situar-se entre 80%, à carga nominal, e 50% em baixo regime de carga. Em situação de ressonância, o ruído provocado pela vibração do núcleo pode atingir valores incomodativos.” [1]

- *Compensadores estáticos de energia reativa*

“Os compensadores estáticos de energia reativa ou *Static VAR Compensator* são constituídos por elementos indutivos e capacitivos, controlados por interruptores eletrónicos de potência, que fornecem ou absorvem potência reativa em função das necessidades. Pelo facto de não possuírem elementos móveis, garantem respostas muito rápidas, elevada fiabilidade e reduzido custo de exploração.

O investimento inicial inviabiliza a generalização dos SVC, sendo utilizados em aplicações muito específicas, como a regulação de tensão em sistemas de Alta Tensão e a mitigação do *flicker* provocado por cargas de grande potência com elevada frequência de variação.” [1]

- *Sistemas de alimentação ininterrupta (UPS)*

“As UPS são normalmente utilizadas para garantia de funcionamento de equipamento crítico, durante interrupções de fornecimento, com investimentos relativamente baixos.

A configuração básica de uma UPS inclui um retificador, um inversor e um sistema de armazenamento de energia. Em regime normal de funcionamento a UPS absorve da rede toda a energia solicitada pela carga protegida e pelo sistema de armazenamento de energia.

Em situação de interrupção de alimentação a energia armazenada é utilizada para alimentação da carga protegida. As UPS mais comuns garantem o armazenamento de energia através de baterias eletroquímicas. Contudo, dados os desenvolvimentos tecnológicos mais recentes, começam a ser utilizadas outras tecnologias como a *flywheel*” [1]

As UPS podem ser dos seguintes tipos:

- *UPS estática On-line*

“A UPS estática é caracterizada pelos seguintes elementos principais:” [1]

- Retificador para conversão de tensão AC/DC;
  - Sistema de armazenamento de energia, tipicamente bateria eletroquímicas;
  - Inversor para conversão de tensão DC/AC;
  - *Bypass* estático para garantia de continuidade de tensão à carga em situações de manutenção ou avaria da UPS e para proteção do retificador e do inversor em caso de curto-circuito ao nível da carga.
- *UPS dinâmica*

“De um modo geral, a UPS dinâmica tem capacidade de fornecer à carga uma tensão perfeitamente sinusoidal, recorrendo a um grupo ou a máquinas elétricas especiais. As UPS dinâmicas são caracterizadas pelos seguintes elementos principais:

- Retificador para conversão de tensão AC/DC;
- Retificador e inversor simplificado para alimentação do grupo motor-alternador;
- *Bypass* estático para garantia de continuidade de tensão à carga em situações de manutenção ou avaria da UPS.

As UPS dinâmicas, através do grupo motor-gerador, garantem correntes de curto-circuito muito mais elevadas que as UPS estáticas. A utilização de UPS dinâmicas permite assegurar mais facilmente a seletividade e a eficácia de atuação dos sistemas de proteção da carga, bem como a alimentação de cargas mais exigentes em termos de potência de curto-circuito.” [1]

- *UPS estática stand-by*

“Em regime normal de funcionamento, as UPS stand-by, não têm qualquer ação sobre a energia elétrica fornecida à carga. As perturbações de QEE de severidade moderada passam integralmente por este tipo de UPS. É possível a instalação de filtros para atenuação destas perturbações, mas é muito difícil garantir uma alimentação à carga completamente imune de perturbações. Quando ocorre uma interrupção de tensão, a alimentação da carga passa a ser efetuada pelo inversor, com recurso à energia armazenada. A comutação da rede para o inversor é bastante rápida, sendo geralmente inferior a 10 milissegundos. Ainda assim, podem verificar-se alguns problemas de funcionamento em cargas mais sensíveis.

Nas UPS *on-line*, a energia flui sempre pelo retificador e pelo inversor, mesmo em modo de funcionamento normal, evitando que as perturbações de QEE atinjam a carga.

No entanto, esta solução apresenta um rendimento inferior, devido às perdas no retificador e no inversor, e absorve corrente com níveis consideráveis de distorção harmónica.” [1]

- *Reguladores dinâmicos de tensão*

“Os reguladores dinâmicos de tensão ou *Dynamic Voltage Restorers* (DVR) são utilizados para atenuação da severidade de cavas de tensão, sobretensões e desequilíbrios de tensão com origem nos sistemas de Transporte e Distribuição. Este equipamento funciona como fonte de tensão e é normalmente instalado, em série, entre a rede de distribuição e o equipamento sensível. A tensão de saída dos DVR é permanentemente monitorizada e compensada sempre que necessário.

A energia ativa necessária para a regulação de tensão é normalmente armazenada em condensadores.

Como referido anteriormente, este equipamento é projetado para a atenuação de perturbações de tensão de reduzida duração, normalmente inferior a 1 segundo. Isto significa que as generalidades das cavas de tensão podem ser resolvidas através da instalação de um DVR.

A eficácia dos DVR na mitigação de cavas de tensão é função da duração e da amplitude destas perturbações de tensão. Os DVR são especialmente interessantes para aplicações de potência superior a 1 Mva. Para potências reduzidas, ainda não são competitivos com as UPS uma vez que não alimentam a carga durante interrupções de tensão. É expectável que o desenvolvimento de novas tecnologias de armazenamento de energia, especialmente os supercondensadores, promova a aplicação de DVR em toda a gama de potências”. [1]

- *Filtros de harmónicos*

“Os filtros de Harmónicos dividem-se em três subcategorias: Filtros Passivos, Filtros Ativos e Filtros Híbridos “. [1]

- *Filtros passivos*

“Existem basicamente dois tipos de filtros passivos de harmónicos: filtros série e filtros paralelos. Os filtros série são caracterizados pela ligação em série com a carga de um condensador e de uma bobina, em paralelo entre si. O seu princípio de funcionamento passa por aumentar a impedância à circulação de correntes harmónicas, mantendo baixa impedância à circulação da componente fundamental (50 Hz). Por vezes, pode ser utilizada apenas uma bobina em série, embora com

redução de eficácia do filtro. Com a utilização de apenas uma bobina consegue-se uma redução da distorção harmónica da corrente para cerca de metade.

Os filtros paralelos são caracterizados pela ligação em paralelo com a carga de uma bobina e de um condensador em série. Este filtro proporciona um circuito de baixa impedância para as componentes harmónicas da corrente, evitando que circulem na rede.

Os filtros paralelos são os menos dispendiosos e, por isso, os mais utilizados. A razão para o custo mais elevado dos filtros série deve-se essencialmente ao facto destes filtros serem dimensionados para a corrente da carga, enquanto os filtros paralelo apenas são dimensionados para as componentes harmónicas a eliminar. No entanto, a aplicação de filtros paralelos implica um projeto mais cuidado, dado o risco de ressonância.

Antes da instalação de um filtro passivo devem ser identificadas as componentes harmónicas mais problemáticas na instalação, uma vez que estes filtros são projetados para atenuarem apenas uma determinada componente harmónica”. [1]

- *Filtros ativos*

“Os filtros ativos também podem ser instalados em série ou em paralelo. À semelhança dos filtros passivos, a ligação em série implica que sejam dimensionados para suportarem a corrente de carga. Na ligação em paralelo, os filtros são dimensionados apenas para as componentes harmónicas da corrente. Especialmente por este motivo, a ligação em paralelo é a mais utilizada. Os filtros ativos, ligados em paralelo, possuem uma unidade de monitorização contínua da distorção harmónica da corrente. Esta unidade controla um gerador da corrente harmónica injetada no circuito. Como as componentes harmónicas da corrente da carga são geradas no filtro ativo, a sua circulação na rede é anulada “. [1]

- *Filtros híbridos*

“Em determinadas situações, pode ser economicamente vantajosa a opção por filtros híbridos. Este tipo de filtros consiste na conjugação de filtros passivos e filtros ativos. Os filtros passivos podem ser usados para filtragem de componentes harmónicas de maior amplitude, enquanto os filtros ativos são normalmente responsáveis pela filtragem das restantes componentes harmónicas da corrente”. [1]

- *UPS Flywheels*

Geralmente, as baterias eletromecânicas são constituídas por uma unidade de controlo e por uma máquina elétrica rotativa, normalmente máquina DC de ímanes permanentes, cujo veio é diretamente acoplado a uma massa inercial. As operações de carga e descarga são efetuadas através da máquina elétrica rotativa, que funciona como motor ou como gerador. Em condições normais, a máquina elétrica rotativa é alimentada pela rede, acionando a massa inercial a velocidades de rotação por vezes superiores a 10.000 rpm. Durante as perturbações de QEE, a máquina elétrica passa a funcionar como gerador, transformando a energia cinética armazenada em energia elétrica para alimentação da carga. As transferências de energia elétrica entre a rede e a bateria eletromecânica são efetuadas através de conversores eletrónicos, garantindo a estabilidade da tensão fornecida à carga.

A *Flywheels* permite uma resolução aos principais problemas de QEE, conforme apresentado na figura 16.

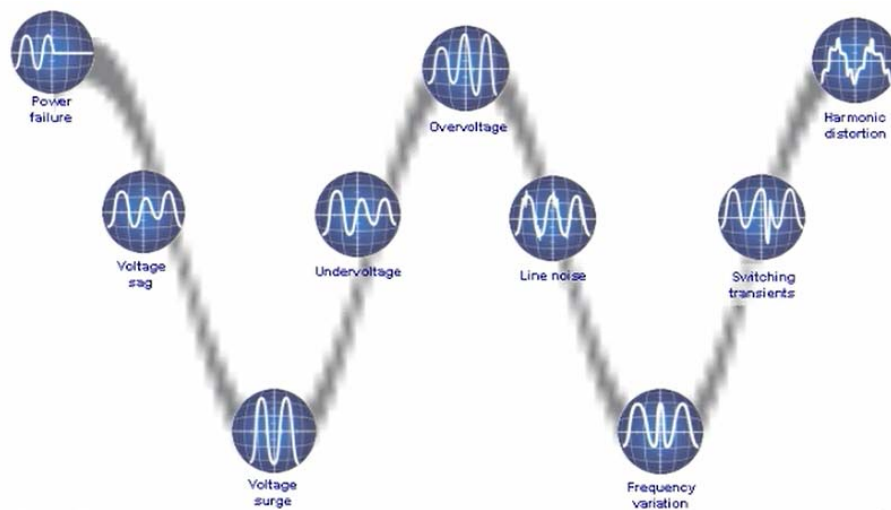


Fig. Nº 16 Principais resoluções duma *Flywheel* como QEE [18]

### *Resumo de soluções para qualidade de energia*

A tabela 2 resume as perturbações de energia mencionadas anteriormente, assim como os seus efeitos, as possíveis causas e soluções para minimizar os efeitos nefastos destes problemas.

Tabela Nº 2 Problemas de QEE e soluções possíveis [2]

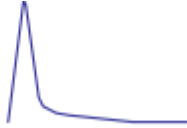
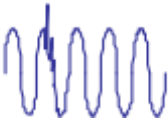



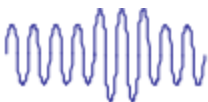



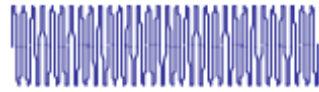

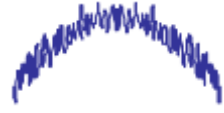
Categoria da Perturbação	Forma de Onda	Efeitos	Causas Possíveis	Soluções Possíveis
<b>1. Transitório</b>				
Impulsivos		Perda de dados, avarias eléctricas, falhas de energia	Trovoada, ESD, comutação de impulsos, disparo por defeito	Descarregadores de sobretensões, UPS, <i>Flywheel</i>
Oscilatórios		Perda de dados, possíveis avarias	Comutação de cargas indutivas ou capacitivas	Descarregadores de sobretensões, UPS, filtros, comutadores de passagem por zero, <i>Flywheel</i>
Categoria da Perturbação	Forma de Onda	Efeitos	Causas Possíveis	Soluções Possíveis
<b>2. Interrupções</b>				
		Perda de dados, possíveis avarias, desgaste	Comutação de cargas, defeitos na rede a montante, disparo de disjuntores, falhas de equipamentos	UPS, <i>Flywheel</i>
<b>3. Subtensões</b>				
Cavas		Paragem de sistema, perda de dados, desgaste	Arranque de cargas, defeitos	Condicionadores de energia, <i>Flywheel</i> , UPS
Subtensões Prolongadas		Paragem de sistema, perda de dados, desgaste	Defeitos na rede, comutação de carga elevada	Condicionadores de energia, <i>Flywheel</i> , UPS
<b>4. Sobretensões</b>				
Swell		Disparos intempestivos, avaria em equipamentos, redução vida útil	Comutação de carga, defeitos na rede a montante	<i>Flywheel</i> , UPS

Tabela 2 Problemas de QEE e soluções possíveis [2] (Continuação)

Sobretensão Prolongada		Avaria em equipamentos, redução vida útil	Comutação de carga, defeitos na rede a montante	<i>Flywheel</i> , UPS
5. Distorção da Forma de Onda				
DC Offset		Aquecimentos de transformadores, correntes de defeito à terra, disparos intempestivos	Falhas em rectificação ou onduladores, regimes de carga anormais de transformadores	Detectar e corrigir a causa do problema
Harmónicas		Aquecimentos de transformadores, aumento das perdas, efeito pelicular, paragem do sistema.	Cargas electrónicas (não-lineares)	Reconfigurar instalação, transformadores tipo K, filtros
Categoria da Perturbação	Forma de Onda	Efeitos	Causas Possíveis	Soluções Possíveis
Interharmónicas		Tremulação da iluminação, aquecimento, interferências em comunicação	Sinais de controlo, equipamento em defeito, ciclo conversores de frequência, motores de indução, fornos de arco	<i>Flywheel</i> , UPS, Filtros
Micro-Cortes		Paragem do sistema, perda de dados	Variadores electrónicos de velocidade, aparelho de soldadura, reguladores de iluminação	<i>Flywheel</i> , UPS, Filtros
Ruído		Paragem do sistema, perda de dados	Transmissores rádio, equipamentos em defeito, fraca terra, proximidades a fontes EMI/RFI	Remover Transmissores, transformadores de isolamento, cabos de malha, deslocar fontes EMI/RFI, <i>Flywheel</i>

## 2.3 Introdução ao *flywheel*

Na década de 1970 a *Flywheel* foi proposta com o objetivo primário de armazenamento nos veículos elétricos e de reserva de energia estacionária. Ao mesmo tempo, rotores de fibras compostas foram construídos, e em 1980 as chumaceiras magnéticas começaram a aparecer. Assim, o potencial da *Flywheel* como sistema de armazenamento de energia elétrica tem sido alvo de estudo e extensas pesquisas.

Melhorias recentes nas matérias, chumaceiras magnéticas e eletrônica de potência tornaram a *Flywheel* num sistema mais valioso comparativamente aos sistemas de armazenamento de energia tradicionais. O progresso na eletrônica de potência nomeadamente do uso de Transistor Bipolar de Porta Isolada (IGBT) e de Transistor de Efeito de Campo (FET) torna possível operar a alta potência. O uso de materiais compostos permite alta velocidade de rotação, com a densidade de potência maior do que as baterias com químicos. Chumaceiras magnéticas oferecem muito baixo atrito permitindo baixas perdas internas durante armazenamento a longo prazo. Alta velocidade é desejável uma vez que a energia armazenada é proporcional ao quadrado da velocidade, mas apenas linearmente proporcional à massa.

Há um certo número de atributos que tornam as *Flywheels* mais úteis do que as atuais unidades de armazenamento, como por exemplo:

- Alta densidade de potência;
- Nenhuma degradação da capacidade, o tempo de vida da *Flywheel* é quase independente da profundidade da descarga e do ciclo de descarga. Pode operar-se igualmente bem em descarga superficial e profunda;
- O estado de carga pode ser facilmente medida, uma vez que é dado pela velocidade de rotação;
- Não é necessária uma manutenção periódica;
- Tempo de recarga curto;
- Tecnologia escalável;
- Materiais com baixo impacto ambiental.

Uma das vantagens principais da *Flywheel* é a capacidade para lidar com níveis de potência elevados. Esta é uma qualidade desejável como por exemplo num veículo, onde é necessária uma grande potência de pico durante a aceleração e, se os travões são utilizados, uma grande quantidade de

energia é gerada num curto espaço de tempo, o que implica uma utilização mais eficiente da energia, resultando em menor consumo de combustível.

A utilização do sistema *Flywheel* como armazenamento de energia depende das vantagens que pode oferecer quando comparado com os outros sistemas de armazenamento de energia. A figura 17 mostra onde a *Flywheel*, como sistemas de armazenamento de energia pode substituir outros sistemas existentes. Como é mostrado, a *Flywheel* oferece uma boa relação entre a densidade de energia e de densidade de potência.

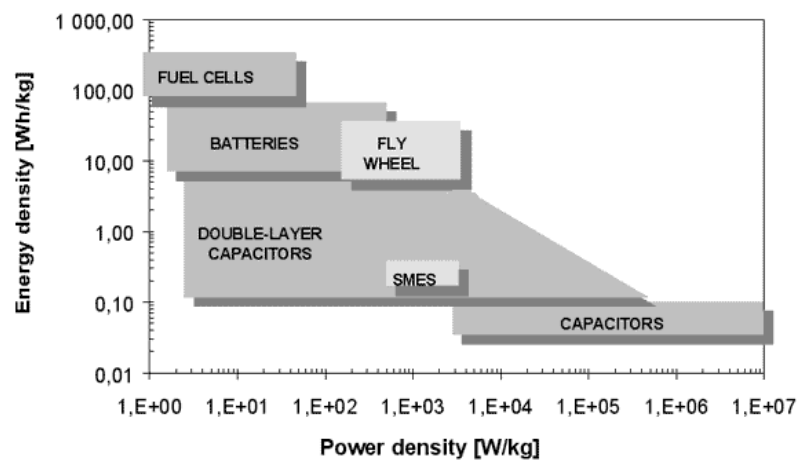


Fig. Nº 17 Gráfico energia / potência [8]

“Na figura 18 pode-se observar esquematicamente os componentes que formam uma *Flywheel* como sistema de armazenamento de energia (FBESS) moderna. A *Flywheel* converte a energia elétrica de uma maneira análoga à das pilhas eletroquímicas com a energia química. O volante, com momento de inércia  $I$ , gira a uma velocidade  $\omega$ , armazenando energia cinética  $E_c$ .” [21]

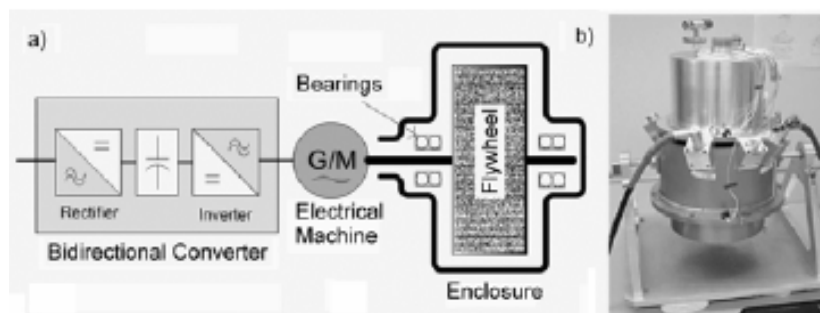


Fig. Nº 18 a) Componentes duma FBESS b) Detalhes duma *Flywheel* moderna [21]

A máquina elétrica transforma a energia cinética em energia elétrica e vice-versa. O conversor de potência bidirecional transforma a energia elétrica AC para DC. Outro conversor bidirecional é necessário para transformar DC para AC a uma frequência de 50/60 Hz e vice-versa.

FBESS são adequados para o intercâmbio de potências médias e altas (kW para MW) durante curtos períodos de tempo (segundos), com uma elevada eficiência energética (> 85%).

Nestas situações, FBESS tem características favoráveis quando comparado com baterias eletroquímicas permitindo que um número muito elevado de cargas e descargas (centenas de milhares). Esta série de ciclos é independente da temperatura e da profundidade da descarga. Portanto, o tempo de vida útil FBESS é muito longo (> 20 anos).

### 2.3.1 Diferentes tipos de aplicações possíveis das *Flywheels*

As *Flywheels* são construções complexas em que a energia é armazenada mecanicamente e transferida para e a partir do volante do motor por uma máquina elétrica.

A máquina elétrica deve funcionar como um motor para transferir energia elétrica para a *Flywheel* e como um gerador para restaurar a energia armazenada na *Flywheel*. Ao agir como um motor, a energia elétrica fornecida ao enrolamento do estator é convertida em energia mecânica, aumentando a velocidade da *Flywheel*. No modo de gerador, a energia cinética armazenada no rotor é transformada em energia elétrica.

A figura 19 ilustra um sistema básico de um sistema de armazenamento de energia numa *Flywheel*.

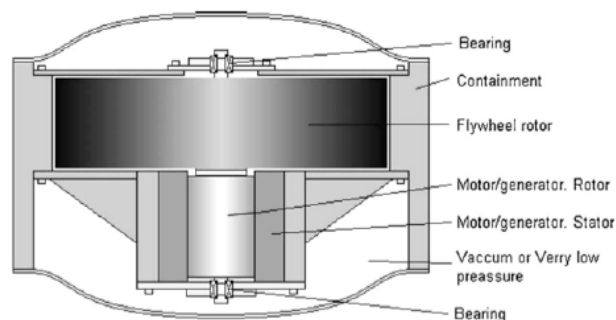


Fig. Nº 19 Layout de um sistema de armazenamento de energia numa *Flywheel* [7]

Em teoria, seria vantajoso construir um gerador que produzisse uma tensão elevada e baixa corrente, o que poderia resultar no fornecimento de energia elevada e com baixa perda de potência. Esta situação é adequada devido à alta velocidade que o volante da *Flywheel* atinge.

Seguidamente vão ser apresentadas várias aplicações possíveis da *Flywheel* em diversas tecnologias, tais como:

**Buffer de potência de pico** – “O volante pode ser usado num veículo elétrico para eliminar as correntes de pico que prolonga a vida útil da bateria.” [3]

**Sistema Eólicos** – “Geradores utilizando uma *Flywheel* como sistema de armazenamento de energia – O objetivo deste sistema consiste numa unidade onde as oscilações de vento regulares são compensadas pela *Flywheel*, permitindo o fornecimento de energia ativa e reativa para compensar tanto a frequência como a tensão na rede.” [3]

***Flywheel* para o sistema Fotovoltaico** – “Apesar dos muitos benefícios do uso de energia solar, a sua indisponibilidade frequente torna inadequado para muitas aplicações. Por conseguinte, é muitas vezes necessário os sistemas fotovoltaicos terem uma capacidade de armazenamento de energia de tal modo que o excesso de produção armazenada podem ser utilizados num momento em que a energia solar já não está disponível. Como exemplo deste tipo de aplicação, a instalação em um edifício situado em Hong Kong que possuía um sistema fotovoltaico, onde o tempo de fornecimento de energia foi prolongado das 9:00 às 15:00 horas para as 8:00 às 18:00 horas, pela instalação de uma *Flywheel*.” [3]

**Harmónicas** – “O princípio básico da *Flywheel* nos compensadores harmónicos é semelhante ao filtro ativo utilizando um inversor. No entanto, um volante de energia tem a capacidade de armazenar energia adicional. Nos filtros ativos, as correntes de compensação são estimadas para reduzir os harmónicos, calculando os harmónicos da corrente de carga. Em seguida, a corrente estimada é gerada por um inversor. Diferentes volantes são usados para compensar os harmónicos em baixa tensão. Até a harmónica XI, regista-se um decréscimo de cerca de 50%.” [3]

**Rede de distribuição** – “Pode ser utilizada uma *Flywheel* para manter a alta qualidade na potência elétrica e garantir uma fonte de alimentação fiável a partir da rede de distribuição (que foi capaz de manter a tensão na rede de distribuição dentro de 98-102%, além de ter a capacidade de fornecer 10 kWh durante 15 minutos).” [3]

**High power UPS system** – “Para um sistema de armazenamento alto de potência, foram ligados em paralelo 25 volantes, com possíveis aplicações no fornecimento de energia. Foi usado em experiência de plasma, acelerações de massas pesadas e sistemas UPS. Também já foram testadas em autocarros de trânsito urbano e sistemas ferroviários com uma redução de energia na ordem dos 40%.” [3]

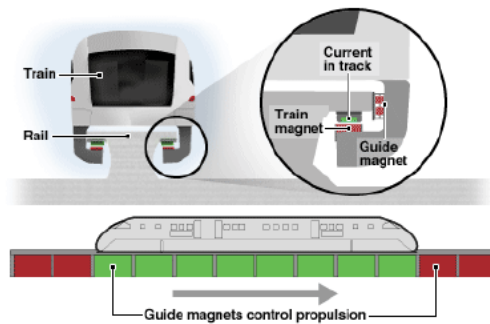


Fig. Nº 20 *Flywheel* chumaceiras magnéticas usados em sistemas ferroviários [3]

**UPS System** – “Como exemplo deste tipo de aplicação, quatro *Flywheels* foram ligados à rede de distribuição, que resultou em uma melhora significativa na qualidade da energia. Um transformador foi necessário entre o sistema de armazenamento do volante e a rede de média tensão.” [3]

**Aplicações Aeroespaciais** – “A bordo da Estação Espacial Internacional, uma unidade de armazenamento *Flywheel* substituiu uma bateria. Uma comparação, entre o volante e a bateria NiH<sub>2</sub>, mostrou que a *Flywheel* é 35% mais leve e tem uma redução de 55% no volume ocupado.” [3]

## 2.4 Principais partes constituintes duma *Flywheel*

### 2.4.1 Materiais que constituem uma *Flywheel*

A velocidade de rotação máxima  $\omega$  é determinada pela capacidade do material para resistir às forças centrífugas que afetam o volante, isto é, a resistência à tração do material. As forças centrífugas são proporcionais à massa e à velocidade de rotação.

A tabela 3 compara todas estas características mencionadas para os materiais metálicos e materiais compósitos normalmente utilizados em volantes.

Tabela Nº 3 Características para diferentes materiais das *flywheels* [21]

Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_{t,u}$ [MPa]	$e_v$ [MJ/m <sup>3</sup> ]	$e_m$ [kJ/kg]
Aluminum	2700	500	251	93
Steel	7800	800	399	51
Glass E/Epoxy	2000	1000	500	250
Graphite HM/Epoxy	1580	750	374	237
Graphite HS/Epoxy	1600	1500	752	470

A fim de obter a energia específica elevada, os materiais do volante tem de ser leves, com densidades  $\rho$  baixas. Têm de ter elevada resistência à tração, o que permite elevadas velocidades de rotação, tais como materiais compósitos modernos. Os metais são pesados e não permitem alcançar altas velocidades de rotação, mas os preços são 20 a 30 vezes menores do que os dos materiais compósitos.

#### 2.4.2 Forma da *flywheel*

A figura 21 mostra as formas principais e os valores de K para materiais isotrópicos homogêneos normalmente usado para materiais metálicos e compósitos.

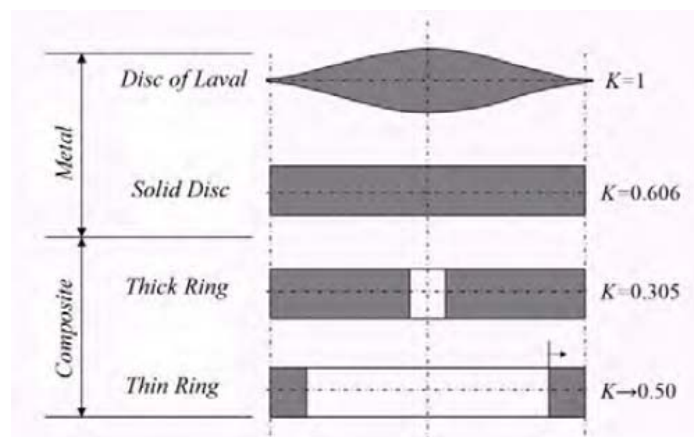


Fig. Nº 21 Diferentes formas possíveis da *flywheel* [21]

#### 2.4.3 Máquina elétrica

A máquina elétrica dum *flywheel* quando atua como gerador retarda o volante transformando a sua energia mecânica em energia elétrica. Quando atuando como motor, acelera o volante aumentando

a sua energia mecânica e armazenamento de energia mecânica. A Tabela 4 resume as características principais das máquinas elétricas adequadas para ser usado por uma FBESS.

As máquinas assíncronas são usadas para aplicações de alta potência por causa da sua construção robusta, alto binário e baixo custo.

A máquina síncrona de ímã permanente (PMSM) tornou-se a escolha mais usual para FBESS devido ao seu alto rendimento. A PMSM não tem perdas no rotor e é adequada para funcionar em vácuo. Mas, os ímãs permanentes têm alto custo e baixa resistência à tração. A fim de resolver estas desvantagens, tem sido propostas máquinas de relutância variável VRM para FBESS.

Com as VRM não se corre nenhum risco de desmagnetização uma vez que o binário é exclusivamente devido à variação de relutância. O material para construção das VRM têm alta resistência à tração e baixo custo.

Em FBESS de alta velocidade, a máquina elétrica e o volante de inércia são totalmente integrados formando um elemento único e compacto. Em FBESS de baixa velocidade são separados em partes ou apenas parcialmente integrado num invólucro comum.

Tabela Nº 4 Principais características das máquinas elétricas usadas por FBESS [21]

<b>Machine</b>	<b>Asynchronous</b>	<b>Variable reluctance</b>	<b>Permanent Magnet Synchronous</b>
<b>Power</b>	High	Medium and low	Medium and low
<b>Specific Power</b>	Medium ( $\approx 0.7$ kW/kg)	Medium ( $\approx 0.7$ kW/kg)	High ( $\approx 12$ kW/kg)
<b>Rotor Losses</b>	Copper and Iron	Iron due to slots	None
<b>Spinning losses</b>	Removable by annulling flux	Removable by annulling flux	Non-removable, Static flux
<b>Efficiency</b>	High (93.4%)	High (93%)	Very High (95.2%)

Tabela Nº 4 Principais características das máquinas elétricas usadas por FBESS (Continuação) [21]

Machine	Asynchronous	Variable reluctance	Permanent Magnet Synchronous
Control	Vector Control	Synchronous: Vector control. Switched: DSP	Sinusoidal: Vector control. Trapezoidal: DSP
Size	1.8 l/kW	2.6 l/kW	2.3 l/kW
Tensile strength	Medium	Medium	Low
Torque ripple	Medium (7.3%)	High (24%)	Medium (10%)
Maximum / base speed	Medium (> 3)	High (> 4)	Low (< 2)
Demagnetization	No	No	Yes
Cost	Low (22€/kW)	Low (24€/kW)	High (38 €/kW)

O armazenamento de energia máximo possível por uma FBESS é determinado pela sua velocidade máxima de rotação, porque a potência exigida é igual à transferência de binário vezes a velocidade.

Para além do motor/gerador de íman permanente utilizado em quase todos os volantes, há também a possibilidade de utilizar um gerador de motor síncrono.

A tabela 5 mostra as vantagens e desvantagens da máquina de ímanes permanentes e máquinas de indução, para este tipo de aplicações.

Tabela Nº 5 Principais vantagens e desvantagens de máquinas de ímanes permanentes e de indução [14]

Máquina:	Vantagens:	Desvantagens:
Íman Permanente	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta capacidade de sobrecarga;</li> <li>Campo magnético é produzido sem perdas de excitação;</li> <li>Desenho do Rotor menos complexas;</li> <li>Possibilidade de atingir um rendimento superior.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Risco de desmagnetização e diminuição da coercividade intrínseca devido ao aumento da temperatura;</li> <li>Requer materiais mais robustos devido as forças centrífugas.</li> </ul>

Tabela Nº 5 Principais vantagens e desvantagens de máquinas permanente e de indução (Continuação) [14]

Máquina:	Vantagens:	Desvantagens:
Íman Permanente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Campo Magnético é produzido sem perdas de excitação.</li> <li>• O desenho do Rotor é mais fácil, não necessitando de fios elétricos no Rotor;</li> <li>• Possibilidade de conseguir um nível grande de rendimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risco de desmagnetização e diminuição da coercividade intrínseca devido ao aumento da temperatura;</li> <li>• Estator construído de ferro permite perdas no binário;</li> <li>• Requer materiais mais robustos devido as forças centrífugas.</li> </ul>
Indução	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não existe preocupação com a desmagnetização.</li> <li>• Não precisa de excitação para o binário, não existindo perdas eletromagnéticas;</li> <li>• Pode ser construído com matérias robustos mas mais baratos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risco de desmagnetização e diminuição da coercividade intrínseca devido ao aumento da temperatura;</li> <li>• Pobre capacidade de sobrecarga, devido à alta corrente no estator;</li> <li>• Transformação e retificação levam a perdas eletromagnéticas do campo magnético.</li> </ul>

A tabela 6 resume alguns motores/geradores descritos em vários artigos, para a aplicação de *flywheels*. Esta tabela foi organizada de forma a identificar, para cada tipo de máquina, o país de desenvolvimento, o ano do desenvolvimento e os parâmetros correspondentes da máquina.

Tabela Nº 6 Diferentes tipos de aplicações das *flywheels*

País onde foi Desenvolvido	Tipo de Máquina	Ano	Parâmetros da Máquina
USA [22]	Halbach-Array Motor/Gerador	2001	Rotor: 1,5Nm de binário; 28 000 rpm; 2 kWh;  Máquina: 208V; 3 Fases; 20.2 cm de Diâmetro; Espessura 0.6 cm do disco; Altura de 15.5 cm

Tabela Nº 6 Diferentes tipos de aplicações das *flywheels* (Continuação)

Japão [23]	Motor/Gerador Síncrono	2000	Máquina: 180 W; 200 V; 1,2 A; 4 Polos
Japão [24]	Motor/Gerador Permanente Magnético Síncrono	2006	Máquina: 4 Polos;
China [25]	Motor/Gerador "Surface" Permanente Magnético Síncrono	2006	Rotor: 50 000 rpm; Máquina: 1,2 kW; 400 V; 2,8 A; 6 polos;
NASA, USA [26]	Motor/Gerador Permanente Magnético Síncrono	2004	Rotor: 320 Wh; 60 000 rpm; Máquina: 1 kW; 2 polos; 3 Fases; Tensão BUS DC 130 V
Suécia [14]	Motor/Gerador Permanente Magnético "Axial-Flux"	2007	Rotor: 5 kWh; 8 000 rpm; 30 Kg, 1 m de Diâmetro; Máquina: 200 kW; 3 fases; 1 kV; 115,5 A;
USA [27]	Motor/Gerador Permanente Magnético Síncrono	1998	Rotor: 11 000 rpm; 11,9 kW/Kg
Japão [28]	Motor/Gerador Permanente Magnético	2007	Máquina: 3 fases; 4 polos 1,5 kW
Japão [29]	Motor/Gerador Permanente Magnético "Axial-Flux"	2003	Rotor: 3 000 rpm; Máquina: 4,20 kW; 153 V; 15,9 A; (17 kW para 10 000 rpm)

Em conclusão, o sistema mais utilizado é a máquina síncrona de ímanes permanentes, inclusive nos trabalhos mais recentes. Esta máquina foi escolhida devido ao seu rendimento, menor tamanho e um controlo mais fácil comparativamente com outras como a de indução.

#### 2.4.4 Conversor de potência

A FBESS liga-se a um barramento DC por meio de um conversor DC/AC, resultando em um inversor de fonte de tensão VSI, controlada pela largura de pulso modulada PWM. A seleção mais adequada para os interruptores (MOSFET, IGBT, etc) dependerá das tensões e da corrente de bloqueio, bem como da frequência de comutação. Filtros LC podem ser necessários para ligar o inversor à máquina elétrica, fornecendo correntes sinusoidais sem *ripple*.

O inversor é controlado para que a máquina elétrica se comporte como um gerador ou como um motor de acordo com a necessidade instantânea. A maior frequência de comutação reduz a corrente elétrica.

O Controlo da máquina elétrica compreende dois circuitos fechados. O anel interior é mais rápido correspondendo às correntes do estator, o anel exterior é mais lento correspondendo ao binário de aperto. É necessário controlar as correntes de modo a evitar problemas de instabilidade de circuito fechado, tal como a dinâmica das máquinas elétricas são inerentemente instáveis.

Para se ligar a FBESS a uma rede AC é necessário um outro conversor de potência (DC / AC), funcionando como um retificador. Este retificador permite tanto fornecer como recuperar potência ativa e reativa para a rede AC com correntes sinusoidais. Maior frequência de comutação reduz o *ripple* da corrente, e aumenta a largura de banda de controlo.

A máquina elétrica é geralmente controlada para variar o binário, necessário para manter o barramento CC em tensão constante. Isso é possível graças à coordenação aceleração e desaceleração da *flywheel*. Assim a máquina comporta-se como uma fonte ideal de tensão DC análoga a uma pilha eletroquímica convencional. O retificador ligado a esta tensão constante DC simplesmente estabelece corrente de referências para produzir ou consumir a energia ativa e reativa necessária.

### 2.4.5 Rolamento magnético

"Um rolamento magnético é um rolamento que suporta uma carga usando levitação magnética sem contacto físico, por exemplo, eles podem levitar um eixo de rotação e permitir o movimento relativo sem atrito ou desgaste. Eles estão em serviço em aplicações industriais como a produção de energia elétrica, refinação de petróleo, operação de máquinas-ferramentas e gasodutos. " [6]



Fig. Nº 22 Exemplo dum rolamento magnético [9]

“Existem três tipos de rolamentos: os rolamentos passivos, os ativos e os híbridos. Os apoios magnéticos passivos (PMB) são os de abordagem mais simples e baseiam-se em um ímã permanente. Este ímã permanente é concebido de modo a apoiar e a levitar um objeto, tornando-o liberto do contacto com o resto da estrutura. Os apoios magnéticos ativos (AMB) são constituídos por uma bobina que ao ser alimentado por uma corrente produz uma força magnética que provoca a levitação o objeto. No tipo de apoios AMB, as bobinas podem ser de condutor simples, mas nos protótipos desenvolvidos recentes são utilizados condutores de alta temperatura (HTSC).

Os rolamentos magnéticos híbridos (HMB) combinam os méritos do PMB e do AMB. Este tipo de rolamento usa um ímã permanente para compensar a gravidade e a força resultante da velocidade excessiva, usando uma bobina magnética para compensar as instabilidades.” [6]

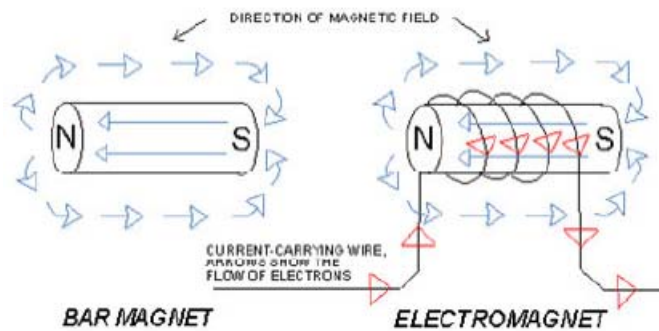


Fig. Nº 23 Exemplo esquemático usando campo magnético [10]

As vantagens principais das chumaceiras magnéticas são:

- Ausência de atrito;
- Baixa manutenção;
- Tolerância contra o calor, vácuo, frio e produtos químicos;
- Baixas perdas;
- Velocidades de rotação muito elevadas.

Existem algumas desvantagens, tais como:

- Complexidade;
- Alto custo inicial / investimento.

### Rolamentos passivos

Como mencionado anteriormente, uma relação magnética passiva consiste num ímã permanente colocado numa posição tal que pode levitar um objeto tornando-o livre de contacto. Há duas maneiras de obter a força eletromagnética: os ímãs podem ser colocados de modo a atrair o objeto, ou por colocação de dois ou mais ímãs que repelem a peça.

Para além disso, o íman pode ser apresentado em duas formas diferentes: radial e vertical. Os rolamentos radiais são estudados para aplicações espaciais. São muito difícil projetá-los, devido à gravidade da Terra. Por essa razão, na superfície da Terra é típico utilizar rolamentos verticais.

Existem algumas vantagens no uso dos PMB, sendo económicas, práticos e de fiabilidade. Os PMB são considerados uma solução económica por não terem os custos inerentes à sua operação, devido ao facto de que não existem circuitos ativos. Assim, o consumo de energia é insignificante. Este tipo de rolamentos é prático porque, quando comparado com outros tipos, não tem perdas por efeito de Joule, não necessita de detetores de posição nem de bobinas. A sua constituição é simples e não necessita de manutenção, bem como de qualquer tipo de instalação de *hardware* ou mecanismo de controlo.

### Rolamentos ativos

Para os sistemas que exigem alta performance, os rolamentos ativos são a melhor escolha. O AMB é composto por bobinas de cobre ou em alguns casos, condutores de alta temperatura, o que irão proporcionar o fluxo magnético, assegurando o contacto livre entre as peças. Estes também podem ter sensores de monitorização permanentemente, um microprocessador e um sistema de alimentação controlado. Com estes componentes, a corrente nas bobinas é controlada de modo a permanecer em equilíbrio.

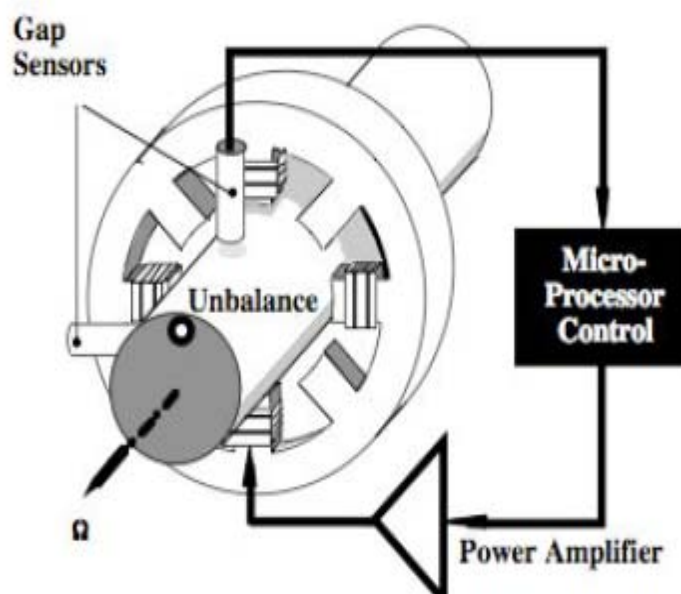


Fig. Nº 24 Estrutura dum rolamento ativo [11]

O AMB tem um bom desempenho e é controlado por um microprocessador que compensa qualquer instabilidade que ocorre no sistema. Devido à corrente de polarização, as perdas de energia neste tipo de rolamento são muito elevadas. Como resultado deste facto, alguns AMB foram substituídos por HTSC, que são mais eficientes.

### Chumaceiras híbridas

As chumaceiras híbridas reúnem as vantagens dos rolamentos magnéticos permanentes com as vantagens dos enrolamentos magnéticos ativos.

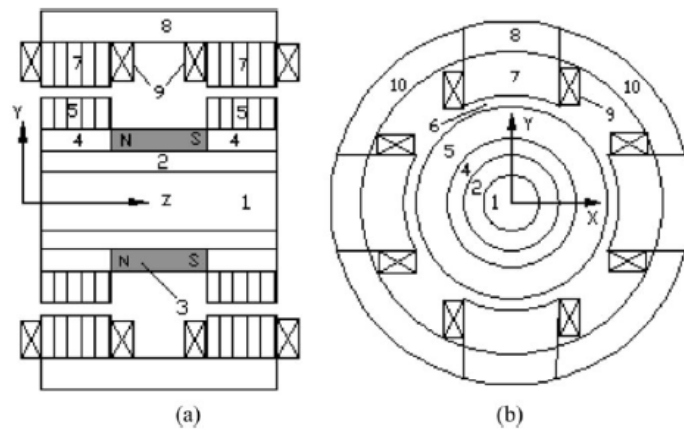


Fig. Nº 25 Rolamento híbrido magnético [12]

A Figura 25 mostra um rolamento híbrido magnético, com os ímãs permanentes ligados ao rotor. A *flywheel* tem um rolamento radial magnético e gira em torno do eixo z. O ímã permanente garante um sistema livre de contactos sobre a roda. Uma abertura de sensor acoplado a um sistema de alimentação compensa as instabilidades que podem ser observadas.

Assim, neste tipo de rolamento, o desempenho de um AMB é garantido sem existir o tipo de perdas de um AMB. A bobina pode ser constituída por condutor de cobre, solução utilizada em alguns protótipos. De qualquer forma, este tipo de conceção tem encontrado algumas dificuldades, tais como a complexidade do circuito e problemas de arrefecimento.

#### 2.4.6 Involucro

O binário de atrito da aerodinâmica é proporcional à velocidade de rotação e à densidade e pressão do gás que envolve o volante. A fim de reduzir as perdas aerodinâmicas, é efetuado o vácuo parcial (a pressão reduzida), ou o ar é substituído por um gás menos denso do que o ar, por exemplo Hélio.

A caixa deve ser capaz de suportar os impactos dos fragmentos do volante, em caso de destruição acidental devido ao excesso de velocidade. As fibras de materiais compósitos desintegram-se progressivamente em numerosos fragmentos, principalmente, com o movimento de rotação. O aço explode violentamente em alguns fragmentos, com o movimento de translação, tornando-se mais difícil de ser retido pelo invólucro. Portanto, a FBESS de alta velocidade exige um involucro com um peso igual a metade do peso do volante, enquanto a FBESS de baixa velocidade exige um involucro cujo peso seja duas vezes e meia o peso do volante.

## Capítulo 3 – Estudo da *flywheel*

---



### 3.1 Equações fundamentais para o desenvolvimento duma *flywheel*

A energia armazenada na *flywheel* é dada pela seguinte equação:

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (3.1)$$

onde **E** é a energia cinética armazenada, **I** é o momento de inercia e  $\omega$  a velocidade angular da *flywheel*

O momento de inercia é dado em função da sua forma e massa:

$$dI = m \cdot r^2 \quad (3.2)$$

Para cilindros sólidos, a expressão para o momento de Inércia (**I**) é dada pela equação:

$$I = \frac{1}{2} \cdot r^4 \cdot \pi \cdot h \cdot \rho \quad (3.3)$$

Onde **h** é a altura do cilindro, **r** é o raio e **p** a densidade do material aplicado na construção do cilindro.

Uma outra forma dominante é um cilindro oco, na qual resulta a seguinte equação:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot h \cdot \rho \cdot (r_0^4 - r_i^4) \cdot \omega^2 \quad (3.4)$$

onde  $r_0$  é o raio externo e  $r_i$  é o raio interno.

A energia, em MJ, que pode ser armazenada na *flywheel* em função da sua velocidade e do raio interno e externo será:

$$E_{MJ} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot h \cdot \rho \cdot (r_0^4 - r_i^4) \cdot \omega^2 \quad (3.5)$$

Conforme a equação (3.1) 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,  $\sigma$ ”

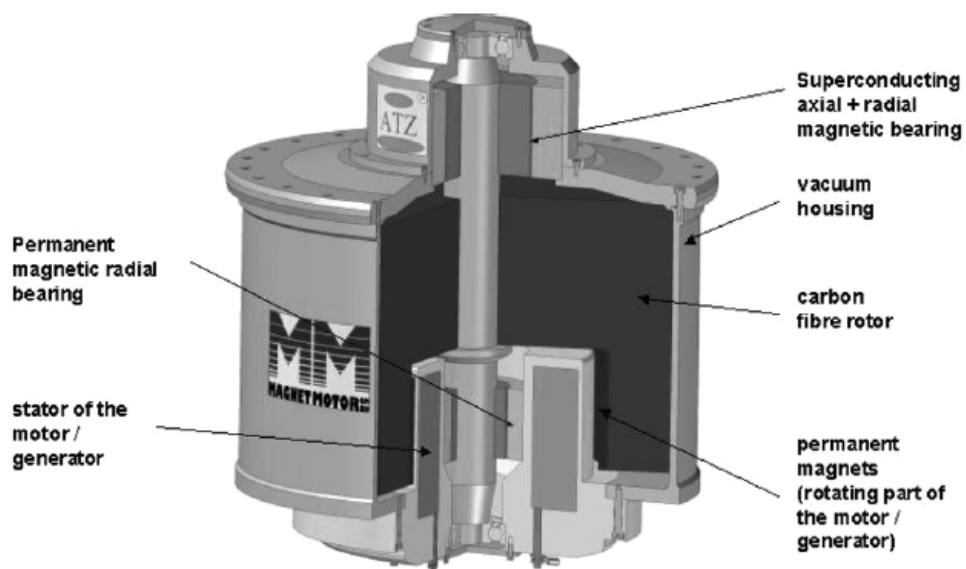


Fig. Nº 26 Layout duma flywheel [30]

## Análise das tensões

A análise das tensões é muito importante para o cálculo da dimensão da roda.

Num sistema de rotação temos dois tipos de força, a radial e a tangencial, respetivamente  $\sigma_r$  e  $\sigma_t$ .

Considerando uma roda com espessura e densidade uniforme  $\rho$  (figura 27.a), o resultado da força centrífuga pode ser dado pela seguinte expressão:

$$dF_c = dm \cdot r \cdot \omega^2 = \rho \cdot h \cdot r^2 \cdot d\varphi \cdot dr \cdot \omega^2 \quad (3.6)$$

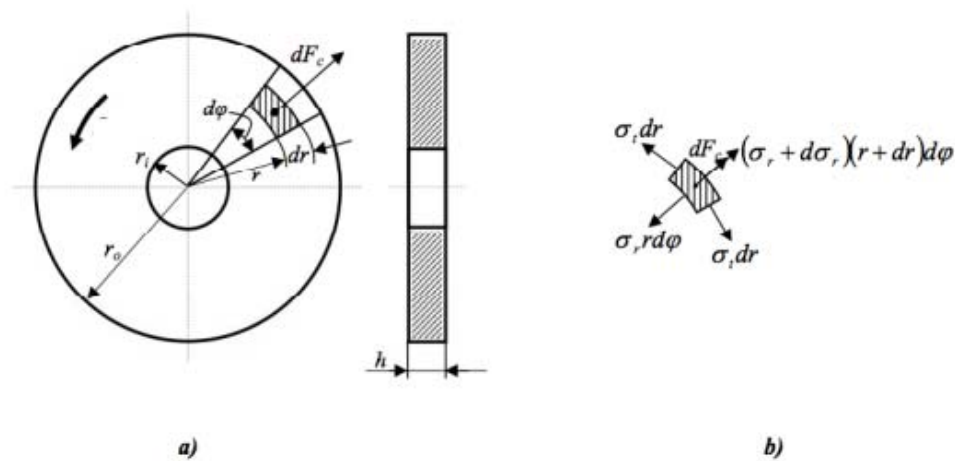


Fig. Nº 27 Forças e restrições numa roda com espessura e densidade uniforme [13]

Considerando os elementos separados do disco (figura 26.b), é obtida a seguinte expressão:

$$(\sigma_r + d\sigma_r) \cdot (r + dr) \cdot d\varphi - \sigma_r \cdot r \cdot d\varphi - 2 \cdot \sigma_t \cdot dr \cdot \sin \frac{d\varphi}{2} + \rho \cdot h \cdot r^2 \cdot d\varphi \cdot \omega^2 = 0 \quad (3.7)$$

A partir da figura 27 e da equação (3.7) é possível obter as tensões, para um cilindro oco com materiais isotrópicos. A tensão radial é representada pela equação (3.8) e a tensão tangencial e representada pela equação (3.9).

$$\sigma_r(r) = \frac{3+\nu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot \left( r_0^2 + r_i^2 - \frac{r_0^2 \cdot r_i^2}{r^2} - r^2 \right) \quad (3.8)$$

$$\sigma_t(r) = \frac{3+\nu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot \left( r_0^2 + r_i^2 + \frac{r_0^2 \cdot r_i^2}{r^2} - \frac{1+3\nu}{3+\nu} \cdot r^2 \right) \quad (3.9)$$

Onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson, que é uma constante do material do rotor (esta relação é descrita no anexo 1).

A figura 28 ilustra um exemplo demonstrativo para ajudar a entender as forças tangenciais e radiais.

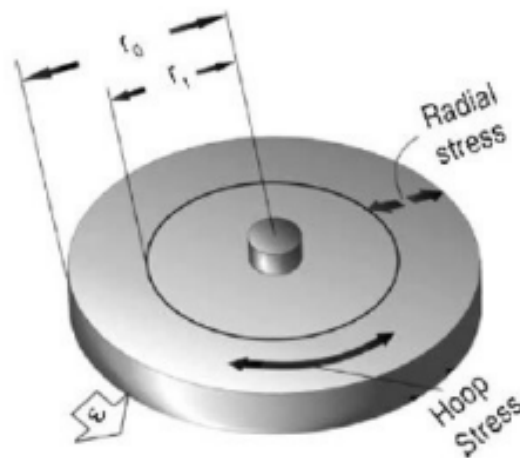


Fig. Nº 28 Força tangencial e radial num pequeno cilindro [15]

### 3.2 Raio interior, raio exterior e velocidade de rotação

Para podermos dimensionar uma roda devemos ter em conta a relação entre raio Interno, raio externo e as tensões.

Usando as equações (3.8) e (3.9), força radial e tangencial em ordem a  $\frac{r_i}{r_0}$ , obtemos a seguinte expressão:

$$\sigma_r = \frac{3+v}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot \left( r_0^2 + r_i^2 - \frac{r_0^2 \cdot r_i^2}{r^2} - r^2 \right) = \frac{3+v}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r_0^2 \cdot \left( 1 + \frac{r_i^2}{r_0^2} - \frac{r_i^2}{r_0^2} \cdot \frac{r_0^2}{r^2} - \frac{r^2}{r_0^2} \right) \Leftrightarrow \frac{\sigma_r}{\rho \cdot \omega^2 \cdot r_0^2} = \frac{3+v}{8} \cdot \left( 1 + \frac{r_i^2}{r_0^2} - \frac{r_i^2}{r_0^2} \cdot \frac{r_0^2}{r^2} - \frac{r^2}{r_0^2} \right) \quad (3.10)$$

$$\sigma_t = \frac{3+v}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot \left( r_0^2 + r_i^2 + \frac{r_0^2 \cdot r_i^2}{r^2} - \frac{1+3 \cdot v}{3+v} \cdot r^2 \right) = \frac{3+v}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r_0^2 \cdot \left( 1 + \frac{r_i^2}{r_0^2} + \frac{r_i^2}{r_0^2} - \frac{1+3 \cdot v}{3+v} \cdot \frac{r^2}{r_0^2} \right) \Leftrightarrow \frac{\sigma_t}{\rho \cdot \omega^2 \cdot r_0^2} = \frac{3+v}{8} \cdot \left( 1 + \frac{r_i^2}{r_0^2} + \frac{r_i^2}{r_0^2} - \frac{1+3 \cdot v}{3+v} \cdot \frac{r^2}{r_0^2} \right) \quad (3.11)$$

Usando as equações (3.10) e (3.11) e  $a = \frac{r}{r_0}$  com diferentes valores foi realizado um estudo relativamente aos valores de  $\frac{\sigma_t}{\rho \cdot \omega^2 \cdot r_0^2}$  e  $\frac{\sigma_r}{\rho \cdot \omega^2 \cdot r_0^2}$ , que é apresentado na figura 29.

### Radial and tangential stresses for different values of $r_i/r_0$

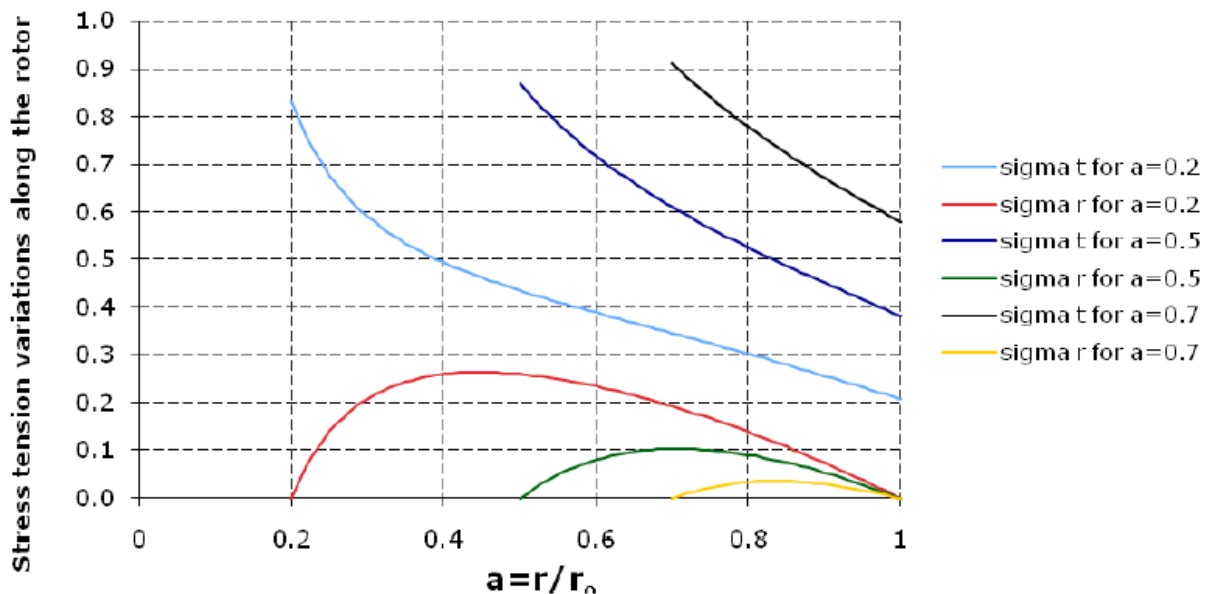


Fig. Nº 29 Radial e tangencial tensão para diferentes valores de  $a = 0.2$ ;  $a=0.5$  e  $a=0.7$  [6]

Observando o gráfico da figura 29, para diferentes valores de  $a$ , observamos que a força tangencial é mais importante do que a força radial, o que faz da força tangencial a mais crítica.

A força tangencial máxima é aproximadamente igual a 1, ver figura 29, e podemos concluir que:

$$\frac{\sigma_t}{\rho \cdot \omega^2 \cdot r_0^2} \cong 1$$

Para um limite  $\sigma_t, \sigma_r = 825MPa$  (que é o máximo admitido por questões de segurança), o raio exterior e a velocidade de rotação estão relacionados e quando o raio exterior é escolhido, a velocidade da *flywheel* é limitada, conforme apresentado no gráfico da figura 30.

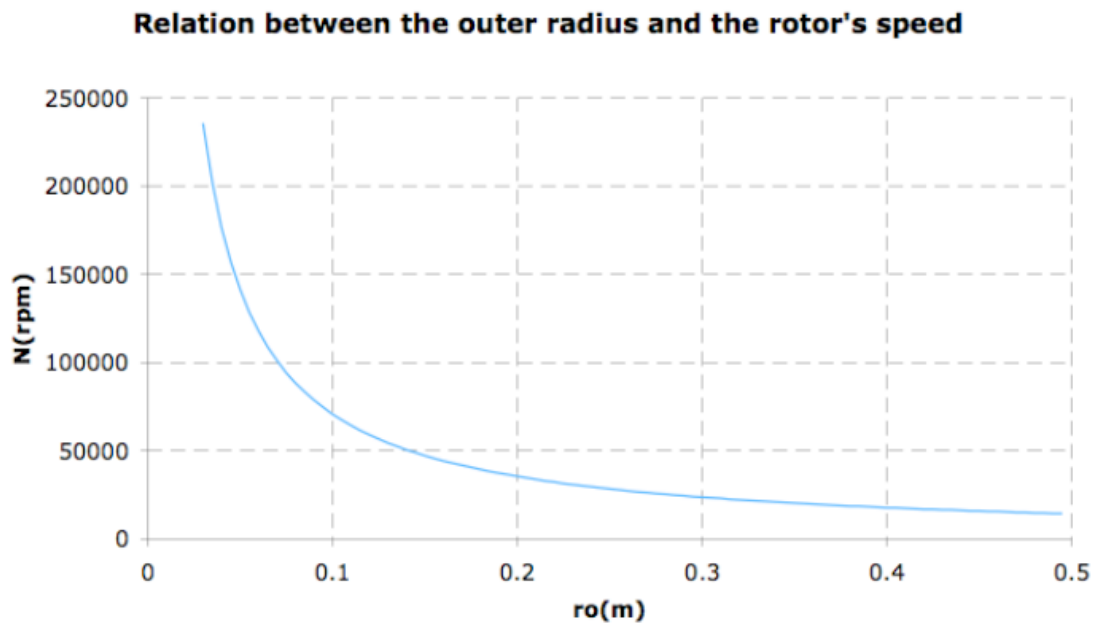


Fig. Nº 30 Relação entre raio externo e a velocidade, neste caso para carbono AS4C [6]

Ao achar o valor máximo das equações (3.8) e (3.9), estas são um importante fator para o estudo das tensões.

O máximo da equação (3.8) a quando  $r = \sqrt{r_0^2 \cdot r_i^2}$ , podemos concluir que:

$$\sigma_{r,max} = \frac{3 + \nu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot (r_0 - r_i)^2$$

A equação (3.9) fica crítica quando  $r = r_i$ , sendo assim a equação crítica é dada pela seguinte equação:

$$\sigma_{t \max} = \frac{3+\nu}{8} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r_0^2 \cdot \left( 2 + \left( 1 - \frac{1+3\nu}{3+\nu} \right) \cdot \left( \frac{r_i}{r_0} \right)^2 \right) \quad (3.12)$$

Usando aproximação  $\frac{\sigma_t}{\rho \cdot \omega^2 \cdot r_0^2} \cong 1$ , na equação (3.5), a energia limite (em [MJ]) pode ser obtida:

$$E_{lim} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot h \cdot \left( 1 - \left( \frac{r_i}{r_0} \right)^4 \right) \cdot r_0^2 \cdot \sigma_t \quad (3.13)$$

Tendo em conta a consideração anterior, a energia limite por unidade de volume (em [MJ/m<sup>3</sup>]) é dada pela seguinte equação (com  $a = \frac{r_i}{r_0}$ ):

$$E_{lim\_per\_volume} = \frac{1}{4} \cdot (1 - a^4) \cdot \sigma_t \quad (3.14)$$

A energia limite por volume de massa de rotação (em [MJ/m<sup>3</sup>]) é representada pela seguinte equação:

$$E_{lim\_per\_volume\_massa} = \frac{1}{4} \cdot \frac{(1-a^4) \cdot \sigma_t}{1-a^2} = \frac{1}{4} \cdot \frac{(1-a^2)(1+a^2)}{1-a^2} \cdot \sigma_t = \frac{1}{4} \cdot (1 + a^2) \cdot \sigma_t \quad (3.15)$$

Tendo estas duas equações (representadas na figura 31), é possível encontrar a melhor relação entre raio interno e raio externo,  $a = \frac{r_i}{r_o}$ .

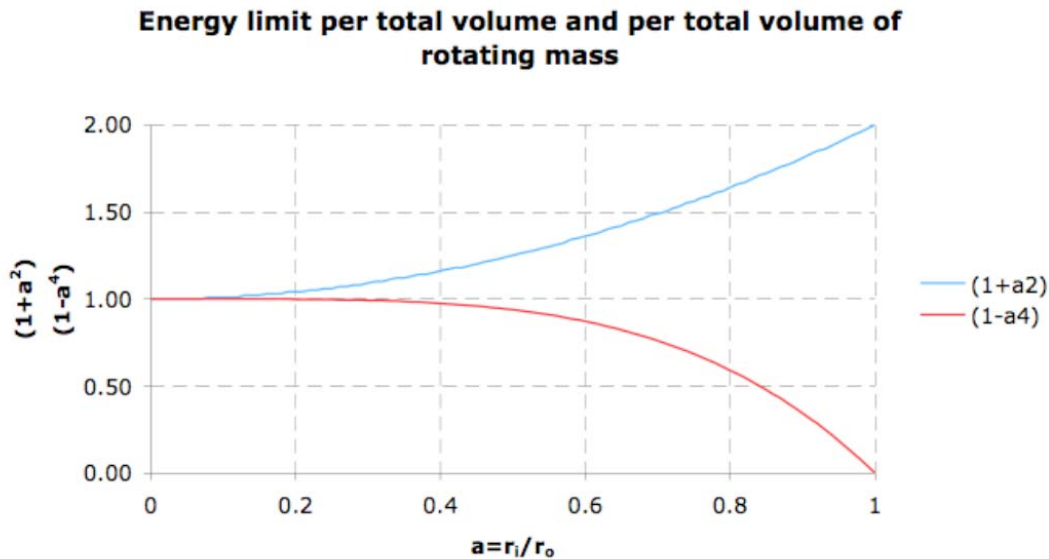


Fig. Nº 31 Representação do limite de energia por volume [6]

Como podemos observar a melhor relação entre o raio externo e raio interno é por volta de 0,7.

Este valor será confirmado nos cálculos seguintes.

**Cálculo para achar a melhor relação entre raio externo e raio interno,  $a = \frac{r_i}{r_o}$**

Para achar a melhor relação entre  $r_i$  e  $r_o$ , é muito importante maximizar a relação entre o volume da roda e a sua massa.

$$F = \alpha \cdot (1 - a^4) + (1 - \alpha) \cdot (1 + a^2)$$

Com  $\alpha = \frac{1}{2}$ , para obter a melhor relação entre energia por unidade de massa e energia por unidade de volume, a equação em cima resulta:

$$2F = (1 - a^4) + (1 + a^2)$$

Esta equação será agora derivada em ordem a “a” para obter o máximo valor de a:

$$\frac{dF}{da} = -4 \cdot a^3 + 2 \cdot a = 0 \Rightarrow a^2 = \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{\sqrt{2}}{2}$$

Como podemos observar, a melhor relação entre raio externo e raio interno é  $\frac{\sqrt{2}}{2}$ .

### 3.3 Geometria e material do rotor da *flywheel*

**Relação entre a capacidade de energia a armazenar e a geometria da *flywheel*.**

A velocidade conforme já fora mencionado é limitada pelas forças de tensão desenvolvidas, chamadas forças de tração  $\sigma$ .

A expressão geral para a máxima densidade de energia, válida para todos os tipos de *flywheels*, é dada pela seguinte equação:

$$e_v = K \cdot \sigma \quad (3.16)$$



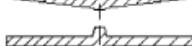

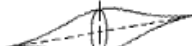


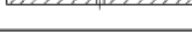

$$e_m = \frac{K \cdot \sigma}{\rho} \quad (3.17)$$

Onde  $e_v$  é a energia cinética por unidade de volume e  $e_m$  por unidade de massa, K é o factor de forma,  $\sigma$  e o stress máximo na *flywheel* e  $\rho$  e a densidade da massa.

O fator de forma K é uma constante que representa a geometria de corte transversal e o seu valor é inferior a 1, conforme apresentado na tabela 7.

A geometria adotada foi de um cilindro oco, devido ao seu fabrico simples e ao seu baixo custo, quando comparados com outras geometrias.

Tabela Nº 7 Fator K para diferentes formas geométricas [15]

Fly wheel geometry	Cross section	Shape factor K
Disc		1.000
Modified constant stress disc		0.931
Conical disc		0.806
Flat unpierced disc		0.606
Thin firm		0.500
Shaped bar		0.500
Rim with web		0.400
Single bar		0.333
Flat pierced bar		0.305

Uma vez que o cilindro oco não é representado na tabela, o valor escolhido é o mesmo que “Thin Firm” (K=0,5), por ter uma geometria similar.

### Material do rotor:

Os materiais que compõem o rotor da *flywheel* limitam a velocidade de rotação, devido às forças de tensão desenvolvidas. Os materiais mais leves desenvolvem baixas cargas de inércia, para uma dada velocidade, materiais compósitos, com baixa densidade e alta resistência à tração, são excelentes para armazenamento de energia cinética.

A tabela 8 mostra diversos materiais usados nas *wheels*. Uma análise da tabela confirma que os materiais compósitos de carbono são os que mais maximizam a densidade de energia. Por esta razão, os materiais compósitos são a nova geração de materiais utilizados, por serem mais leves e mais fortes que os convencionais.

Tabela Nº 8 Características de diversas matérias para rotor 's comuns [16]

Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Tensile strength (MPa)	Max energy density (for 1 kg)	Cost (\$/kg)
Monolithic material 4340 Steel	7700	1520	0.19 MJ/kg = 0.05 kWh/kg	1
<i>Composites</i>				
E-glass	2000	100	0.05 MJ/kg = 0.014 kWh/kg	11.0
S2-glass	1920	1470	0.76 MJ/kg = 0.21 kWh/kg	24.6
Carbon T1000	1520	1950	1.28 MJ/kg = 0.35 kWh/kg	101.8
Carbon AS4C	1510	1650	1.1 MJ/kg = 0.30 kWh/kg	31.3

### 3.4 Exemplos

No anexo 2 encontra-se alguns exemplos de cálculos para diferentes tipos de cargas.



## Capítulo 4 – Comparação entre diversos sistemas

---



## 4.1 Introdução

Como já foi referido em capítulos anteriores, a *flywheel* apresenta algumas vantagens em comparação com os sistemas de armazenamento de energia tradicionais, com baterias como armazenamento de energia.

Neste capítulo irá ser efetuada uma comparação de algumas marcas, cujas especificações foram fornecidas pelas empresas que desenvolveram os respetivos equipamentos de armazenamento de energia.

Conforme podemos analisar nas tabelas 9, 10 e 11, recolheu-se toda a informação possível nas seguintes marcas:

- STET-CAT;
- Liebert;
- PowerWare;
- MGE;
- Piller.

Algumas destas marcas apresentam tanto as baterias como o sistema *flywheel* como soluções de armazenamento de energia, como por exemplo a Liebert.

Na tabela 9, utilizou-se a STET-CAT como a marca que utiliza o sistema *flywheel* e as restantes marcas utilizam as baterias como armazenamento de energia. Os equipamentos têm todos a mesma potência (150 kVA) para serem comparáveis.

Na tabela 10, efetuou-se uma comparação similar com a tabela 9, mas neste caso para uma potência aproximadamente de 600 kVA, onde a STET-CAT e a Piller utilizam o sistema *flywheel* e a Liebert e PowerWare baterias como sistemas de armazenamento de energia.

Na tabela 11, manteve-se a mesma filosofia mas para uma potência aproximada de 1200 kVA. STET-CAT e Piller utilizam a tecnologia *flywheel* e a Liebert e MGE as baterias.

## 4.2 Comparação para a potência de 150 kVA

Na tabela 9 elaborou-se uma comparação com diversos modelos de UPS para uma potência de 150 kVA. Nesta comparação usou-se a UPS da STET-CAT como sistema *flywheel* e as restantes marcas como baterias convencionais.

Tabela Nº 9 Comparação de 150 kVA

	Discrição	Vantagens	STET-CAT	Liebert	Liebert	Powerware	Powerware
Modelo	MODELO UPS		UPS150	Npower-130	Series 610	9315	9315
kVA	Potência Nominal kVA	Se a UPS funcionar fora dos seus limites nominais, certas especificações como regulação de tensão, regulação de frequência não são validas. Se a unidade está sobrecarregada a UPS irá efetuar a transferência de modo a ignorar, deixando a carga critica não protegida.	150	130	150	130	160
kW	Potência Nominal kW		120	104	120	104	128
Power Factor	Fator de Potência pf		0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
UPS Footprint (m <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>	Quantidade de espaço consumido pelos equipamentos		2,98	3,38	3,35	3,26	3,26
Bateria Footprint (m <sup>2</sup> )	Espaço para Baterias (assumindo a necessidade de algumas baterias)		0	3,32	3,32	5,69	5,69
System Footprint (m <sup>2</sup> )	Somatório da UPS & bateria	Tem que ser considerado o tamanho total incluindo o armazenamento de energia.	2,98	6,71	6,67	8,96	8,96
Peso da UPS (Kg)	UPS peso da Caixa e componentes eletrónicos		-	1723	1292	1428	1428
Peso da Bateria (Kg)	Peso da Bateria		-	2472	2472	-	-
Peso total do sistema (Kg)	Somatório da UPS mais o peso da bateria		-	4195	3764	1428	1428
Custo Energia - eficiência (\$.07/kW-hr)	kW x 8760hrs/yr x (100-efficiency) x \$.07kW-hr	Maior eficiência equivale a uma maior poupança numa base anual.	\$2 943	\$3 189	\$4 415	\$4 464	\$5 494

Tabela Nº 9 Comparação de 150 kVA (Continuação)

<b>INPUT</b>							
Voltagem	Voltagem Nominal (V)		480	208, 220, 240, 480, or 600	-	208, 480, 600	208, 480, 600
Input voltage range	Tensão de entrada permitida antes do bypass (V)		+10 %, -15 % (regulação programável)	+10 %, -15 %	-	+10 %, -16 %	+10 %, -16 %
Input frequency range	Variação da frequência (Hz)		+/- 10 % (programável)	+/- 5 Hz	-	+/- 5 Hz	+/- 5 Hz
Input power factor	Proporção de kW para kVA	STET -CAT UPS tem capacidade para corrigir o PF	0,98 a 100% (carga resistiva)	Acima de 0,96	-	0,95 em plena carga com filtro de entrada	0,95 em plena carga com filtro de entrada
Reflected THD	Total Distorção harmônica refletida para a fonte, geralmente sob a forma de corrente. Tipicamente, menos de 5% é considerável aceitável	Normalmente THD tem impacto sobre o dimensionamento do gerador. Quando maior THD maior o gerador.	2.5% Com carga a 100%, 4.5% com carga a 50%	10% Com carga a 100% e filtro, 30% THD com carga a 100% sem filtro	-	Abaixo de 10% com filtro	Abaixo de 10% com filtro
Rectifier walk-in	Define que percentagem de carga é transferida da UPS para o sistema	Permite que o grupo gerador seja isolado de modo alimentar serviços de emergência	1 até 10 segundos	20 segundos	-	1 até 10 segundos	1 até 10 segundos
Surge protection	Proteção contra aumento súbito de tensão de entrada		ANSI C62.41, IEEE 587	ANSI C62.41, IEEE 587	-	ANSI C62.41, IEEE 587	ANSI C62.41, IEEE 587
Input Current Limit	Limitação de corrente de entrada		Ver em overload	115% em plena carga	-	-	-
Magnetizing inrush current	Correntes de arranque elevadas associadas a dispositivos magnéticos como por exemplo transformadores		NA	-	-	6 vezes mais do que o nominal	6 vezes mais do que o nominal
<b>OUTPUT</b>							
Voltage regulation	Variação percentual da tensão de saída relativamente ao nominal	Através da alta tecnologia de manipulação, a tensão é monitorizada e regulada com precisão digital	+/-2% cargas equilibradas, +/-2% para 100% cargas não equilibradas (flywheel mode)	+/-5% cargas equilibradas, +/-1% para 50% cargas não equilibradas	-	+/-1 %	+/-1 %
Dynamic voltage regulation	Variação percentual da tensão de saída comparado com a tensão nominal.		+/-5 % para 100 % da carga	+/- 2.5% para 100% da carga	-	+/-5 % para 100 % da carga	+/-5 % para 100 % da carga
Voltage adjustment - manual	Percentagem de tensão manual que pode-se ajustar		NA	+/-5 %	-	+/-5 %	+/-5 %
Voltage recovery	Tempo para a tensão voltar ao valor nominal após um fenómeno transitório.		2 % em 4 ms	Estado de equilíbrio dentro de um ciclo.	-	1% dentro 16 ms	1% dentro 16 ms

Tabela Nº 9 Comparação de kVA (Continuação)

Output THD	Distorção Harmónica com cargas resistivas.		3 % THD com 100 % carga	1% THD com 100% carga	-	3 % THD com 100% carga	3 % THD com 100% carga
Frequency regulation	Variação da frequência em comparação com a frequência nominal.		+/- 0.2 % (flywheel mode)	+/- 0.1%	-	+/- 0.1%	+/- 0.1%
Overload capacity  (normal mode)	Um aumento percentual na carga acima do valor nominal, durante um certo tempo sem causar danos		125% para 10 min  200% para 60 sec 500% para 1 sec  1000 % para 10 ciclos	125% para 10 min  150% para 1 minuto  -	-  -  -	125% para 10 min  150% para 30 sec 300% para 10 ciclos  -	125% para 10 min  150% para 30 sec 300% para 10 ciclos  -
<b>AMBIENTE</b>							
Efficiency	Relação entre a potência de saída (Watts) e a potência de entrada, normalmente com carga a 100% (resistiva).	Maior eficiência equivale a uma maior poupança.	96 % a 100 % com carga.	-	94 % a 100 % com carga.	92-94 % a 100% com carga	92-94 % a 100% com carga
Operating temp (no derating)	Temperatura ambiente a que o fornecimento de energia irá ser executado.		0 to 40 C	0 to 40 C	-	0 to 40 C	0 to 40 C
Storage Temp	Temperatura permitida dos componentes eletrónicos & controlos		-25 to 70 C	-20 to 70 C	-	-20 to 70 C	-20 to 70 C
Altitude	A altitude máxima que o sistema foi projetado para funcionar corretamente.		3000 ft.	6600 ft.	-	5000 ft.	5000 ft.
Humidity	Percentagem de humidade que os componentes eletrónicos toleram para funcionar corretamente.		5% to 95% (sem-condensação)	0% to 95% (sem-condensação)	-	5% to 95% (sem-condensação)	5% to 95% (sem-condensação)
Noise (audible)	Medida de ruído em db. 35db é considerado ruído ambiente de escritório		70 dBA	65 dBA	-	<65 dBA	<65 dBA

### 4.3 Comparação para 600 kVA

Na tabela 10 é realizada uma descrição entre sistemas *flywheels* neste caso da STET-CAT e da Piller, e nomeadamente Liebert e Powerware como sistemas tradicionais (baterias).

Tabela Nº 10 Comparação de 600 kVA

	Descrição	Vantagens	STET-CAT	Piller	Liebert	Powerware
<b>General</b>						
Modelo	MODELO UPS #		UPS600	UNIBLOCK-TD	Series 610	9315-625
kVA	Potência Nominal kVA	Se a UPS funcionar fora dos seus limites nominais, certas especificações como regulação de tensão, regulação de frequência não são mais validos. Se a unidade está sobrecarregada a UPS irá efetuar a transferência de modo a ignorar, deixando a carga critica não protegida.	600	700	625	625
kW	Potência Nominal kW		480	560	500	562
Power Factor	Fator de Potência pf		0,8	0,8	0,8	0,9
UPS Footprint (m <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>	Quantidade de espaço consumido pelos equipamentos		27,13	-	9,91	12,28
Battery Footprint (m <sup>2</sup> )	Espaço para Baterias (assumindo a necessidade de algumas baterias)		-	-	-	-
System Footprint (m <sup>2</sup> )	Somatório da UPS & bateria	Tem que ser considerado o tamanho total incluindo o armazenamento de energia.	27,13	-	9,91	12,28
UPS Weight (Kg)	UPS peso da Caixa e componentes eletrónicos		5057	-	4799	-
Battery Weight (Kg)	Peso da Bateria		-	-	-	-
System Weight (Kg)	Somatório da UPS mais o peso da bateria		5057	-	4799	-
Energy Cost - Efficiency (\$/kW-hr)	kW x 8760hrs/yr x (100-efficiency) x \$.07kW-hr	Maior eficiência equivale a uma maior poupança numa base anual.	\$8 830	\$-	\$19 929	\$10 339
Power Conversion Topology	Line Interactive or Double Conversion		Flywheel	Flywheel	Double Conversion	Double Conversion
Energy Storage	Static (Battery) or Flywheel		Flywheel	Flywheel	Battery	Battery
<b>Input</b>						
Tensão	Tensão Nominal (V)		480	480	208, 480, 600	208, 480, 600
Input voltage range	Tensão de entrada permitida antes do bypass (V)		+10 %, -15 % (regulação programável)	+15 %, -20 %	+10 %, -15 %	+10 %, -15 %

Tabela Nº 10 Comparação de 600 kVA (continuação)

Input frequency range	Varição da frequência		+/- 10 % (programável)	+/-5 % (programável)	+/- 5 %	+/-5 %
Input power factor	Proporção de kW para kVA	STET -CAT UPS tem capacidade para corrigir o PF.	0,98 a 100 % Carga Resistiva	0,94 a 100% da carga	0,85 ou 0,92 com filtro	0,95 ou 0,1 % da carga com filtro
Reflected THD	Total Distorção harmônica refletida para a fonte, geralmente sob a forma de corrente. Tipicamente, menos de 5% é considerável aceitável	Normalmente THD tem impacto sobre o dimensionamento do gerador. Quando maior THD maior o gerador.	2.5 % com carga a 100% (carga resistiva) 4.5 % com carga a 50 % (carga resistiva)	-	4% com carga total. Com 12-pulse retificador e filtro	<10% com filtro
Rectifier walk-in	Define que percentagem de carga é transferida da UPS para o sistema	Permite que o grupo gerador seja isolado de modo alimentar serviços de emergência	1 até 10 segundos;	-	15 segundos;	10 segundos;
Surge protection	Proteção contra aumento súbito de tensão de entrada		ANSI C62.41, IEEE 587	Flywheel acima de 115 % voltagem	ANSI C62.41, IEEE 587	ANSI C62.41, IEEE 587
Input Current Limit	Limitação de corrente de entrada		Ver em overload	Ver em overload	125 % Máximo	-
Magnetizing inrush current	Correntes de arranque elevadas associadas a dispositivos magnéticos como por exemplo transformadores		NA	NA	5-8 vezes o normal para 12 pulsos retificador	6 vezes o normal
<b>Output</b>						
Voltage regulation	Varição percentual da tensão de saída relativamente ao nominal	Através da alta tecnologia de manipulação, a tensão e monitorizada e regulada com precisão digital	+/- 2 % cargas equilibradas, +/- 2 % para 100 % para cargas desequilibradas (flywheel mode)	+/- 1 % cargas equilibradas	+/- 5 % cargas equilibradas, +/- 2 % para 50% para cargas desequilibradas	-
Dynamic voltage regulation	Varição percentual da tensão de saída comparado com a tensão nominal.		+/- 5 % para 100 % da carga	+/-5 % para 50% da carga	+/- 7 % para 100 % da carga	+/- 5% para 100% da carga
	Percentagem de tensão manual que pode-se ajustar		+/- 2 % para AC power outage		+/- 1 % for AC power outage	
	Tempo para a tensão voltar ao valor nominal após um fenómeno transitório.		+/- 2 % do inversor para o bypass		+/- 4 % do inversor para o bypass	
Voltage adjustment - manual	Varição percentual da tensão de saída relativamente ao nominal	Através da alta tecnologia de manipulação, a tensão e monitorizada e regulada com precisão digital	NA	NA	+/-5 %	+/-5 %
Voltage recovery	Varição percentual da tensão de saída comparado com a tensão nominal.		2 % dentro de 4 segundos	2 % dentro de 200 segundos	1 % dentro de 16 segundos	1 % dentro de 16 segundos
Output THD	Distorção Harmônica com cargas resistivas.		3% THD w/ 100% linear	2.5% THD w/ 100% linear	4% THD w/ 100% linear	3% THD w/ 100% linear

Tabela Nº 10 Comparação de 600 kVA (continuação)

Frequency regulation	Varição da frequência em comparação com a frequência nominal.		+/- 0.2% (flywheel mode)	+/-0.3% (flywheel mode)	+/- 0.1% (tracks bypass or goes to battery)	+/- 0.1% (tracks bypass or goes to battery)
Overload capacity  (normal mode)	Um aumento percentual na carga acima do valor nominal, durante um certo tempo sem causar danos		125 % para 10 min  200 % para 60 segundos  500 % para 1 segundo  1000 % para 10 ciclos	125 % para 10 min  150 % para 2 min  300 % para 5 segundos	125 % para 10 min  150 % para 30 segundos  104% continuado	125 % para 10 min  150 % para 30 segundos  300 % para 10 ciclos
<b>Ambiente</b>						
Efficiency	Relação entre a potência de saída (Watts) e a potência de entrada, normalmente com carga a 100% (resistiva).	Maior eficiência equivale a uma maior poupança.	97 % a 100 % da carga	89-96 % a 100 % da carga	93.5 % a 100 % da carga	93 % a 100 % da carga
Operating temp (no derating)	Temperatura ambiente a que o fornecimento de energia irá ser executado.		0 até 40 C	0 até 40 C	0 até 40 C	0 até 40 C
Storage Temp	Temperatura permitida dos componentes eletrónicos & controlos		-25 até 70 C	-20 até 70 C	-20 até 70 C	-20 até 70 C
Altitude	A altitude máxima que o sistema foi projetado para funcionar corretamente.		3000 ft.	3300 ft.	4000 ft.	5000 ft.
Humidity	Porcentagem de humidade que os componentes eletrónicos toleram para funcionar corretamente.		5 % até 95 % (sem-condensação)	0 % até 95 % (sem-condensação)	0 % até 95 % (sem-condensação)	5 % até 95 % (sem-condensação)
Noise (audible)	Medida de ruído em db. 35db é considerado ruído ambiente de escritório		70 dBA	71-77 dBA	69 dBA	72 dBA

## 4.4 Comparação para 1200 kVA

Na tabela 11 fizemos uma descrição entre sistemas *flywheels* neste caso da STET-CAT e da Piller, e nomeadamente Liebert, Powerware e MGE como sistemas tradicionais (baterias).

Tabela Nº 11 Comparação de 1200 kVA

	Discrição	Vantagens	STET-CAT	Piller	Liebert	MGE	Liebert
Modelo	UPS Model #		UPS1200 - 3 wire	UNIBLOCK-TD	Series 610 - 1000	EPS 8000	Series 610 - 750
kVA	Potência Nominal kVA	Se a UPS funcionar fora dos seus limites nominais, certas especificações como regulação de tensão, regulação de frequência não são mais validos. Se a unidade está sobrecarregada a UPS irá efetuar a transferência de modo a ignorar, deixando a carga critica não protegida.	1200	1300	1000	800	750
kW	Potência Nominal kW		960	1040	900	720	675
Power Factor	Fator de Potência		0,8	0,8	0,9	0,9	0,9
UPS Footprint (m <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>	Quantidade de espaço consumido pelos equipamentos		21,03	17,37	16,46	11,16	9,91
Battery Footprint (m <sup>2</sup> )	Espaço para Baterias (assumindo a necessidade de algumas baterias)		-	-	-	-	-
System Footprint (m <sup>2</sup> )	Somatório da UPS & bateria	Tem que ser considerado o tamanho total incluindo o armazenamento de energia.	21,03	17,37	16,46	11,16	9,91
UPS Weight (Kg)	UPS peso da Caixa e componentes eletrónicos		-	10401	7574	5896	5388
Battery Weight (Kg)	Peso da Bateria		-	-	-	-	-
System Weight (Kg)	Somatório da UPS mais o peso da bateria		-	10401	7574	5896	5388
Energy Cost - Efficiency (\$/kW-hr)	kW x 8760hrs/yr x (100-efficiency) x \$.07kW-hr	Maior eficiência equivale a uma maior poupança numa base anual.	\$18 206	\$27 959	\$41 539	\$33 231	\$28 774
Power Conversion Topology	Line Interactive or Double Conversion		Line Interactive	Line Interactive	Double Conversion	Double Conversion	Double Conversion
Energy Storage	Static (Battery) or Flywheel		Flywheel	Flywheel	Battery	Battery	Battery

Tabela Nº 11 Comparação de 1200 kVA (Continuação)

<b>Input</b>							
Voltagem	Voltagem Nominal		480 - 3 wire	480/277 - 4 wire	480, 600	480	208, 480, 600
Input voltage range	Tensão de entrada permitida antes do bypass		+10 %, -15 % (regulação programável)	+15 %, -20 %	+10 %, -15 % (sem descarga da bateria – 20%)	+/-15 %	+10 %, -15 % (sem descarga da bateria –20%)
Input frequency range	Variação da frequência		±10 % (programável)	±5 % (programável)	±5 %	+10 %	±5 %
Input power factor	Proporção de kW para kVA	STET -CAT UPS tem capacidade para corrigir o PF.	0,98 para 100 % carga resistiva	0,94 para 100% da carga	0,85, ou 0,92 com filtro	0,9	.92 com filtro ou .85 sem filtro
Reflected THD	Total Distorção harmónica refletida para a fonte, geralmente sob a forma de corrente. Tipicamente, menos de 5% é considerável aceitável	Normalmente THD tem impacto sobre o dimensionamento do gerador. Quando maior THD maior o gerador.	2.5 % para 100 % da carga resistiva, 4.5% para 50% da carga resistiva	-	7% para carga total e com filtro;	5% com filtro de entrada	4% para carga total e com filtro
Rectifier walk-in	Define que percentagem de carga é transferida da UPS para o sistema	Permite que o grupo gerador seja isolado de modo alimentar serviços de emergência	1 para 10 segundos	-	15 segundos	10 segundos	15 segundos
Surge protection	Proteção contra aumento súbito de tensão de entrada		ANSI C62.41, IEEE 587	Flywheel above 115% voltage	ANSI C62.41, IEEE 587	ANSI C62.41, IEEE 587	ANSI C62.41, IEEE 587
Input Current Limit	Limitação de corrente de entrada		Ver em overload	Ver em overload	125% Máximo	-	125% Máximo
Magnetizing inrush current	Correntes de arranque elevadas associadas a dispositivos magnéticos como por exemplo transformadores		NA	NA	8 vezes mais do que a carga nominal	600% da carga nominal	5-8 vezes mais do que a carga nominal
<b>Output</b>							
Voltage regulation	Variação percentual da tensão de saída relativamente ao nominal		± 1% Cargas equilibradas, ±2% para 100% cargas desequilibradas (flywheel mode)	±1 % cargas equilibradas	±.5% cargas equilibradas, ±2% para 50% cargas desequilibradas	±.5% cargas equilibradas, ±5% para 100% cargas desequilibradas	±.5% cargas equilibradas, ±2% para 50% cargas desequilibradas
Dynamic voltage regulation	Variação percentual da tensão de saída comparado com a tensão nominal. Percentagem de tensão manual que pode-se ajustar Tempo para a tensão voltar ao valor nominal após um fenómeno transitório.		±5 % para 100 % da carga  ±2 % AC power outage  ±2% do inversor para o bypass	±5 % para 50 % da carga	±7 % para 100 % da carga  ±1 % for AC power outage  ±4% do inversor para o bypass	±5 % para 100 % da carga  ±1 % for AC power outage  ±1% do inversor para o bypass	±7 % para 100 % da carga  ±1 % for AC power outage  ±4% do inversor para o bypass
Voltage adjustment - manual	Variação percentual da tensão de saída relativamente ao nominal		NA	NA	±5%	±5%	±5%
Voltage recovery	Variação percentual da tensão de saída comparado com a tensão nominal.		2% dentro de 4 msec	2% dentro de 200 msec	1% dentro de 50 msec	1% dentro de 16 msec	1% dentro de 50 msec

Tabela Nº 11 Comparação de 1200 kVA (Continuação)

Output THD	Distorção Harmônica com cargas resistivas.		3% THD w/ 100% linear	2.5% THD w/ 100% linear	4% THD w/ 100% linear	2% THD w/ 100% linear	4% THD w/ 100% linear
Frequency regulation	Variação da frequência em comparação com a frequência nominal.		±0.2% (flywheel mode)	±0.3% (flywheel mode)	±0.1% (tracks bypass or goes to battery)	±0.1% (tracks bypass or goes to battery)	±0.1% (tracks bypass or goes to battery)
Overload capacity	Um aumento percentual na carga acima do valor nominal, durante um certo tempo sem causar danos		125% para 10 min	125% para 10 min	125% para 10 min	125% para 10 min	125% para 10 min
(normal mode)			200% para 60 sec 500% para 1 sec	150% para 2 min 300% para 5 sec	150% para 30 sec	150% para 60 sec 167% instantâneo	150% para 30 sec
<b>Ambiente</b>							
Efficiency	Relação entre a potência de saída (Watts) e a potência de entrada, normalmente com carga a 100% (resistiva).	Maior eficiência equivale a uma maior poupança.	97% para 100% da carga	95.8% para 100% da carga 95.1% para 77% da carga 94.4% para 58% da carga 93.3% para 38% da carga	93% para 100% da carga	93% para 100% da carga	93.5% para 100% da carga
Operating temp (no derating)	Temperatura ambiente a que o fornecimento de energia irá ser executado.		0 to 40 C	0 to 40 C	0 to 40 C	0 to 40 C	0 to 40 C
Storage Temp	Temperatura permitida dos componentes eletrônicos & controles		-25 to 70 C	-20 to 70 C	20 to 70 C	-20 to 70 C	-20 to 70 C
Altitude	A altitude máxima que o sistema foi projetado para funcionar corretamente.		3000 ft.	3300 ft.	4000 ft.	4000 to 5500 ft. (temp dep)	4000 ft.
Humidity	Porcentagem de humidade que os componentes eletrônicos toleram para funcionar corretamente.		5% to 95% (sem-condensação)	0% to 95% (sem-condensação)	5% to 95% (sem-condensação)	5% to 95% (sem-condensação)	5% to 95% (sem-condensação)
Noise (audible)	Medida de ruído em db. 35db é considerado ruído ambiente de escritório		70 dBA	83 dBA	69 dBA	72-75 dBA	65-72 dBA

## 4.5 Conclusão

Na análise efetuada para a categoria de 150 kVA, podemos concluir que a STET apresenta um maior rendimento nos custos de energia. Comparativamente às dimensões a STET também apresenta os melhores valores, neste caso de 2,98 m<sup>2</sup> sendo o espaço ocupado pelos equipamentos, um aspeto importante a ter em conta. Quando ao peso total dos vários sistemas, não foi possível obter informação de quanto pesaria o sistema da STET, e este como sendo a única a utilizar o sistema *flywheel* seria um ponto-chave para poder efetuar uma comparação com os outros sistemas. No que diz respeito à tensão de entrada, a STET ficou simplesmente pelos 480 V, mas os restantes sistemas têm mais opções para as tensões de entrada. No que diz respeito à distorção harmónica refletida para a fonte, a *flywheel* consegue ter os melhores valores, na ordem dos 2,5%, enquanto as restantes andam à volta dos 10%. Outro aspeto muito importante é o tempo que demora a ser feita a transferência da UPS para o sistema, tanto na *flywheel* como nas baterias, a transferência em menos de 10 segundos. Ainda outro aspeto importante é o tempo que leva para a tensão atingir o valor nominal, após um fenómeno transitório, 4 ms na *flywheel* e uma média de 16 ms para os restantes sistemas. Relativamente ao ruído a *flywheel* apresenta o maior valor 70dBA, nas restantes o valor médio anda pelos 65dBA.

Para a categoria de 600 kVA, podemos concluir que, no que diz respeito ao espaço necessário e peso para os diversos equipamentos, a *flywheel* (STET) é a que apresenta os maiores valores, podendo ser um obstáculo, principalmente pelo tamanho necessário de 27,13 m<sup>2</sup> (STET) para uma média de 11,10 m<sup>2</sup> nos restantes (Liebert e Powerware). Quanto à eficiência, a STET apresenta os melhores resultados, 225% mais baixo do que a Liebert e 117% mais baixo do que a Powerware. Respetivamente à tensão de entrada, os sistemas que utilizam a *flywheel* só utilizam os 480 V enquanto os restantes permitem mais opções de escolha (208 V, 480 V e 600 V). A distorção harmonizada refletida para a fonte, faltando os dados da Piller, a STET é a que apresenta os melhores resultados 2,5% para 4% e inferior a 10% respetivamente para Liebert e Powerware. Um outro aspeto importante é o tempo que demora a ser feita a transferência da UPS para o sistema, é obtido na *flywheel* (STET) entre 1 e 10 segundos, nas baterias ronda os 15 segundos e os 10 segundos. Relativamente à possibilidade de se variar a tensão de saída relativamente à nominal, esta só é realizada na Liebert e Powerware, respetivamente utilizando as baterias convencionais. No que diz respeito ao ruído, todos os sistemas encontram-se no mesmo patamar de valores.

No que diz respeito à categoria de 1200 kVA, em termos de espaço a STET apresenta os maiores valores, 21,03 m<sup>2</sup>, para 17,37 m<sup>2</sup> Piller (*Flywheel*) e uma média de 12,51 m<sup>2</sup> para os restantes sistemas utilizando as baterias. Quanto ao peso, nesta gama e só tendo os dados da Piller, a *flywheel* é em média 116% mais pesada comparada com os restantes sistemas (Liebert e MGE). No que diz respeito ao rendimento, a STET apresenta os melhores valores, aproximadamente 153% relativamente à Piller, 228% mais baixo para a Liebert, 182% mais baixo para a MGE e 158% mais baixo para a Liebert serie 610 – 750. No que diz respeito às tensões de entrada existe uma diversificação mediante as várias marcas, sendo a Liebert serie 610-750 como a mais completa apresentando mais opções neste caso de 208 V, 480 V e 600 V. A distorção harmoniza refletida para a fonte, faltando os dados da Piller, a STET é a que apresenta os melhores resultados 2,5% para 7%, 5% e 4% respetivamente para Liebert, MGE e Liebert serie 610-750. Outro aspeto importante é o tempo que demora a ser feita a transferência da UPS para o sistema, é obtido na *flywheel* (STET) entre 1 e 10 segundos, nas baterias ronda os 15 segundos e 10 segundos. No que diz respeito ao ruído, todos os sistemas se encontram no mesmo patamar de valores, salientando que a Piller é a que apresenta o maior valor de 83dBA.

Em suma podemos concluir que a *flywheel* apresenta os melhores valores em termos de eficiência, fiabilidade, baixos custos de manutenção, operação, em tempos de arranques esta apresenta os melhores valores e a nível de impacto ambiental é praticamente nulo pós construção. Como menor valia, podemos concluir que são sistemas que requerem mais espaço, são mais pesados, não permitem tantas regulações nomeadamente variação da tensão de saída relativamente ao nominal, nas gamas mais baixas (600 kVA) produzem mais ruído.

A tabela 12 apresenta um resumo da comparação entre as diversas tecnologias.

Tabela Nº 12 Vantagens de uma *flywheel* face às baterias

	<b>Flywheel</b>	<b>Baterias</b>
<b>Vida Útil</b>	>20 anos	1-7 anos
<b>Ciclos de Descarregamento</b>	>10 000	50-60
<b>Fiabilidade</b>	Alta	Baixa
<b>Efeito de Alta Temperatura</b>	Nenhum	Diminui a Vida Útil
<b>Efeito de Baixa Temperatura</b>	Nenhum	Diminui a Capacidade
<b>Impacto Ambiental</b>	Nenhum	Fabrição, Operação, e Disposição
<b>Manutenção</b>	Nenhum	6 meses
<b>Fonte de Energia</b>	Fornecimento Mecânico	Fornecimento Químico
<b>Tempo de Arranque</b>	Instantâneo	Instantâneo
<b>Tempo de Recarregamento</b>	<1 hora	10-20 horas
<b>Custos de Operação</b>	Reduzidos	Muito Elevados



## Capítulo 5 – Simulação duma *flywheel* numa draga

---



## 5.1 Princípio geral

A fim de analisar as vantagens do uso do sistema *flywheel* como sistema de armazenamento de energia foi estudada e elaborado uma simulação do uso da *flywheel* numa draga. Uma vez que existem muitos processos cíclicos eletromecânicos e na qual se poderá beneficiar do uso de um sistema de armazenamento de energia capaz de absorver, armazenar e ceder grandes quantidades de energia.

Os resultados da simulação mostram uma redução de 25% do consumo de energia, uma redução de 37% no consumo de combustível (gasóleo) e uma redução entre 80% a 90% em todas as categorias de emissões.

Os resultados apresentados bem como as especificações do modelo da draga são baseados numa Draga Clamshell. O modelo consiste principalmente em pequenas peças, nomeadamente um tambor de guincho e um redutor de velocidade. Podemos observar na figura 32 um exemplo de uma draga Clamshell.



Fig. Nº 32 Exemplo duma draga [32]

## 5.2 Critérios adotados

Dividiu-se o modelo em estudo nos seguintes tópicos:

- Apresentação dos sistemas eletromecânicos utilizados no balde;
- Apresentação das características dos motores;
- Apresentação das características dos guinchos e cabos;
- Características do balde;
- Como é efetuado o controlo do balde;
- Cálculos apresentados;
- Sistema de controlo;
- Metodologia aplicada;
- Critérios apresentados;
- Simulação;
- Resultados obtidos.

Será feita uma análise exaustiva pela mesma ordem dos vários tópicos apresentados.

### 5.2.1 Sistemas eletromecânicos utilizados

O modelo pode ser dividido nos seguintes sistemas eletromecânicos utilizados no balde da draga:

- Os motores para o guincho e cabo de aço para abrir e fechar o balde da draga;
- Os motores para o guincho e cabo de aço para mover para cima e para baixo o balde da draga;
- Os motores para o movimento rotativo da draga;
- O motor usado no guincho para estabilizar o balde durante o seu movimento.
- O motor para levantar e baixar a estrutura que suporta o balde da draga;

Os componentes usados são motores, redutores de velocidade, guinchos e cabos.

### 5.2.2 Características dos motores

Os motores utilizados são máquinas de indução AC, convertendo a energia elétrica em binário mecânico diretamente aplicado a uma inércia rotativa, com um constante rendimento de 95%. As

características dos motores são limitadas pela velocidade/binário e entre outros parâmetros tais como taxa de varrição, limites de velocidade entre outros.

Todos os motores elétricos têm de ser capazes de regenerar energia, também com um rendimento de 95%. Os motores estão acoplados a um redutor de velocidade, a caixa de velocidades é modelada por um dispositivo que multiplica o binário e divide a velocidade pelo rácio de transmissão.

Todos os conjuntos de motores utilizados para esta simulação encontram-se ilustrados na tabela 13.

**Tabela Nº 13 Motores utilizados [32]**

Tipo	Quantidade	Potencia Nominal (KW)	Velocidade nominal (rad/s)	Redutores de velocidade
Abrir e fechar o balde	2	439	1,4	1
Mover para cima e para baixo o balde	2	439	1,4	1
Rodar a draga	2	111	167	1000
Estabilizar o balde	1	104	105	10
Levantar e baixar estrutura	1	187	105	300

Os motores são os únicos dispositivos elétricos considerados. Os restantes equipamentos não foram considerados nesta simulação, como por exemplo sistemas de ventilação, iluminação, entre outros.

### 5.2.3 Guinchos e cabos

Os tambores do guincho são modelados como dispositivos com inércias rotativas que convertem o binário em força linear. Além disso, eles têm um certo raio e comprimento, que juntamente com o diâmetro do cabo é determinado o comprimento do cabo por cada camada no tambor. Quando uma camada enche, o raio total do tambor do guincho aumento em conformidade. Os cabos são modelados como molas amortecidas conforme o comprimento. A tabela 14 mostra alguns detalhes dos guinchos e cabos utilizados nesta simulação.

Tabela Nº 14 Detalhes dos guinchos e cabos [32]

Tipo	Comprimento (m)	Raio (m)	Diâmetro do Cabo (cm)
Abrir e fechar o balde	1,8	0,89	5,08
Mover para cima e para baixo o balde	1,8	0,89	5,08
Estabilizar o balde	1	0,5	3,81
Levantar e baixar estrutura	1,3	0,44	3,81

A draga ao fazer o movimento rotativo não utiliza nenhum cabo para esse efeito, como tal não é apresentado na tabela 14.

### 5.2.4 Características do balde

A dinâmica e a cinética do balde foram modeladas de acordo com as dimensões gerais apresentadas na figura 33. O balde tem a capacidade de cerca de 17m<sup>3</sup> e pesa 28 toneladas em vazio.

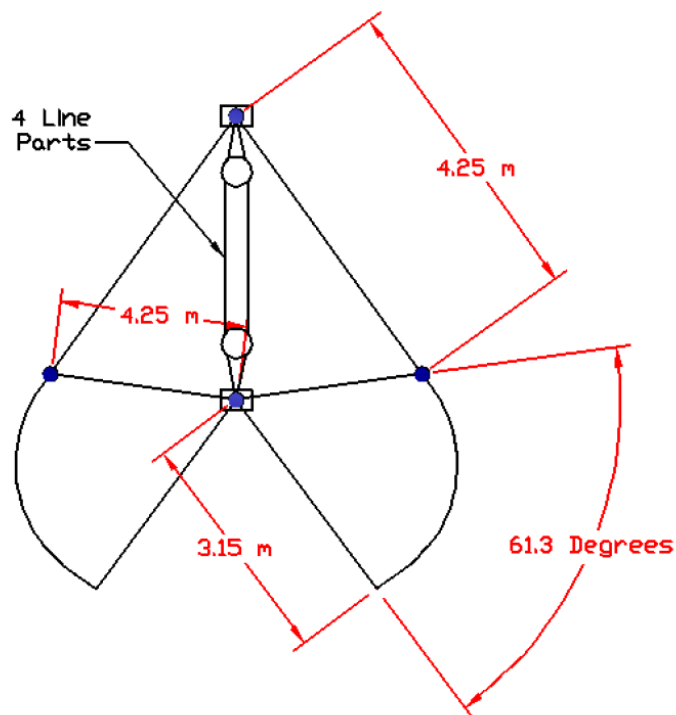


Fig. Nº 33 Dimensões do balde [32]

### 5.2.5 Controlo do balde

É necessário determinar quais as funcionalidades que o balde permite, uma vez que será implementado um sistema de controlo mediante as suas funcionalidades. Para esta simulação determinou-se os seguintes controlos:

- Baixar o Balde;
- Fechar o balde;
- Abrir o balde;
- Movimento do balde e baixar em simultâneo;
- Subir o Balde;
- Movimento do balde e subir em simultâneo.

### 5.2.6 Cálculos apresentados

#### Sistema *flywheel*:

Trata-se dum sistema de torção (um motor/gerador de indução AC), acoplado a um rotor de grande momento de inércia.

$$T = I\omega + T_d$$

onde,  $T$  é o binário do eixo,  $T_d$  é o binário aerodinâmico da draga,  $I$  é a inércia de rotação e  $\omega$  é a derivada temporal da velocidade angular.

A quantidade total de energia cinética contida na massa de rotação é:

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

A aerodinâmica da draga relativamente a *flywheel* é estimada considerando o esforço da draga numa superfície plana alinhada paralelamente a um fluido.

$$F = \frac{1}{2} \cdot C_{DF} \cdot \rho AV^2$$

Onde,  $F$  é a força da draga,  $C_{DF}$  é o coeficiente de esforço da draga,  $\rho$  é a densidade do fluido e  $V$  é a velocidade linear.

Assumindo que a *flywheel* é cilíndrica com uma espessura  $D$ , podemos integrar a equação acima referida em toda a superfície da *flywheel* e deduzir o binário total da draga.

$$T = \iint F \cdot r dA = \pi \cdot \rho \cdot C_{DF} \cdot \omega^2 \left( \frac{2}{5} \cdot r^5 + D r^4 \right)$$

Onde,

$$C_{DF} = \frac{0,455}{(\log(Re))^{2,58}}$$

Onde  $Re$  é calculado a partir do raio e velocidade da *flywheel*.

As especificações relativamente à *flywheel* podem-se visualizar na tabela 15. Estas especificações foram escolhidas em função do teu peso total, a capacidade de armazenar energia, a dissipação de energia entre outros fatores.

Nota-se que o motor de indução funciona numa gama de velocidade acima da sua velocidade nominal, a *flywheel* tem de ser capaz de transmitir potência nominal independente da sua velocidade.

Tabela Nº 15 Características da *flywheel* [32]

<b>Motor/gerador</b>		
Velocidade nominal	1200	RPM
Potência nominal	746	kW
<b>Flywheel</b>		
Diâmetro	1.9	M
Espessura	0.31	M
Inércia	3100	Kg.m <sup>2</sup>
Intervalo de velocidade	120-200	Rad/s
Capacidade de Energia	40.3	MJ
Dissipação	71	kW

### 5.2.7 Sistema de controlo

A Flywheel, ou outro sistema de armazenamento de energia tem dois objetivos principais. Primeiro deve armazenar e reutilizar a energia gerada, em segundo deve regularizar as exigências de energia para o referido equipamento, desta maneira a fonte de alimentação devera ter uma carga constante, sem picos ou mesmo sem falhas de corrente.

No entanto, no interesse de otimização de custos, é desejável que a dimensão do dispositivo seja de acordo com a sua capacidade máxima estipulada pelas necessidades da máquina, por exemplo o peso bruto do balde é aproximadamente 56 toneladas, a máxima altura atingida pelo balde na vertical é de 40 m, o que equivale a uma energia potencial de 22 MJ. Um bom sistema de controlo deve conseguir regular o funcionamento da *flywheel* de modo a que haja capacidade suficiente para absorver um possível pico de tensão, devendo existir reserva de energia suficiente para alimentar essa tensão de pico.

### 5.2.8 Metodologia aplicada

Nesta simulação foram considerados quatro principais fontes de geração e ou consumo de energia, nomeadamente:

- A principal fonte de energia, neste caso a rede elétrica ou grupo gerador;
- O equipamento, neste caso todo o equipamento associado a draga;
- O sistema de armazenamento de energia, a *flywheel*;
- Um dissipador de energia.

Note-se que esta classificação refere-se unicamente aos princípios de funcionamento do controlo da *flywheel*, a topologia dos equipamentos eletrónicos de potência não foi considerada. Os quatro sistemas estão ligados a uma caixa central que coordena a transferência de energia entre os sistemas, conforme ilustrado na figura 34.

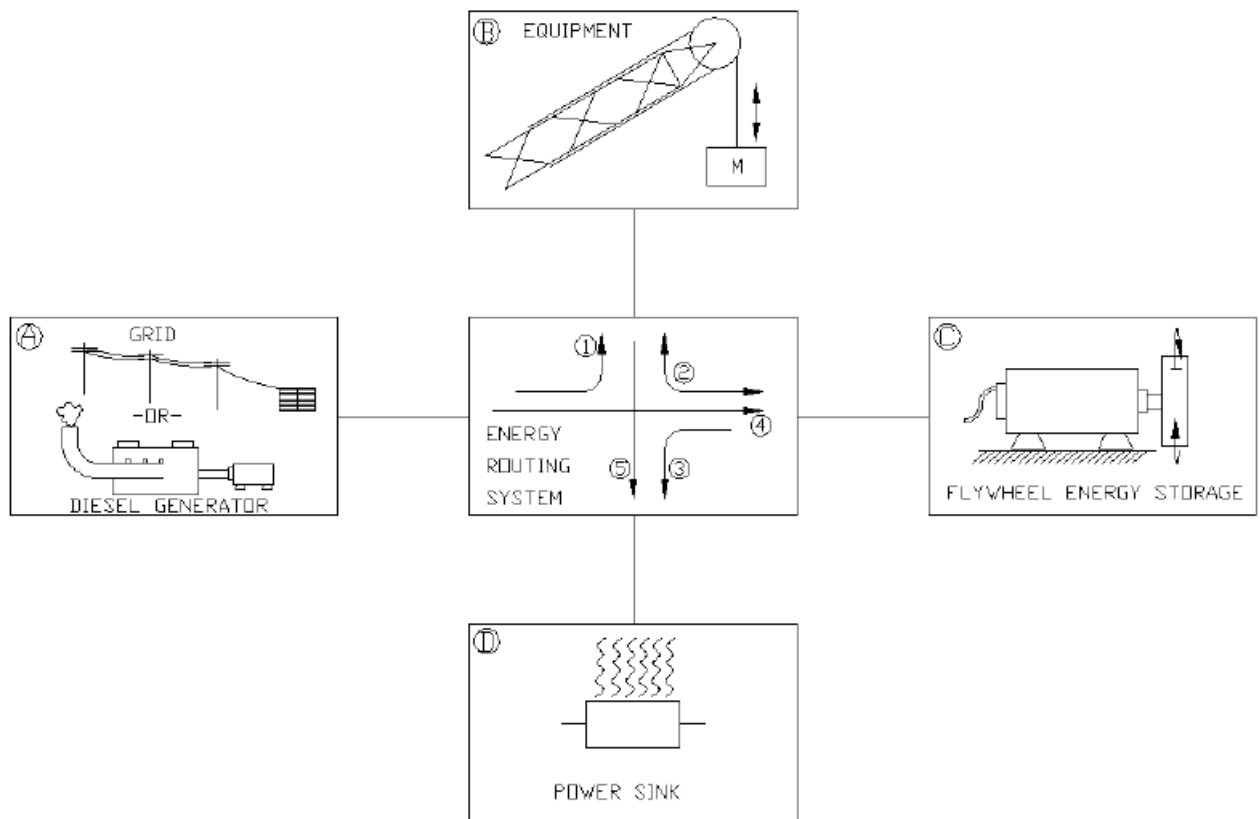


Fig. Nº 34 Quadro de transferência [32]

Conforme podemos observar na figura 34, foi designado por “A” a rede elétrica ou grupo gerador, por “B” todo o equipamento associado ao balda da draga, por “C” a *flywheel* e por “D” o dissipador. A caixa apresentada a meio foi designada por caixa de controlo, que coordena as transferências de energia consoante as necessidades.

A tabela 16 representa essas transferências de energia, por exemplo caso precise de alimentar o equipamento “B” existe duas maneiras possíveis, R1 e R2, nomeadamente pela rede elétrica/grupo gerador ou pela *flywheel*.

Tabela Nº 16 Tabela de transferência de energia [32]

Energy transfer between the 4 systems				
	To A	To B	To C	To D
From A	<del>-</del>	R1	R4	-
From B	-	<del>-</del>	R2	R5
From C	-	R2	<del>-</del>	R3
From D	-	-	-	<del>-</del>

### 5.2.9 Critérios apresentados

Uma vez estipulado o quadro de transferência é necessário estudar alguns critérios importantes, nomeadamente:

- A energia necessária para o equipamento B está satisfeita;
- A *flywheel* (C) trabalha dentro dos seus limites pré-estabelecidos;
- A potência extraída da fonte de alimentação principal (A) é quase constante;
- A *flywheel* contém energia suficiente para abastecer a potência necessária para o equipamento (B);
- A *flywheel* é suficiente para absorver os picos de energia;
- Uma quantidade mínima de energia é encaminhada para o dissipador de energia (D).

Existem várias maneiras possíveis para se efetuar a transferência de energia, conforme ilustrado na tabela 16 e a figura 34. As rotas não marcadas são impossíveis ou impraticáveis em situações da vida real, e não são consideradas.

Por cada rota indicada, o índice de energia ( $I_e$ ) e um índice de potência ( $I_p$ ) é definida, tanto que varia de -1 a +1. O índice de energia está relacionado com a carga da *flywheel* e o índice de potência está relacionado com a potência a ser exigida pela aplicação. A quantidade de energia a ser transferida ao longo de cada percurso é em função destes dois índices.

É definido para a trajetória R4 e R5 um gráfico tridimensional. O valor de  $I_e$  e  $I_p$  pode ser considerado como um ponto de coordenadas que definem na superfície. A altura da superfície (varia entre -1 e 1) é uma medida de quantidade de energia a ser transferida ao longo desses percursos. Estas superfícies têm de ser escolhidas de modo com as prioridades.

Como exemplo, considerar a rota R5, que controla a quantidade de energia encaminhada a partir do equipamento para o dissipador de energia, conforme a figura 35. Neste caso,  $I_e$  e  $I_p$  estão diretamente relacionados com o fornecimento de energia da *flywheel*. A superfície associada tem altura 0 quase em toda a parte menos onde  $I_e > 0,9$  e  $I_p < 0$ . Em outras palavras, quando o fornecimento de energia é negativo o volante está quase carregado, e o sistema começa a dissipar energia através do dissipador.

Os índices de potência e energia estão diretamente relacionados com a necessidade de energia ou com o fornecimento de energia através da *flywheel*. Do mesmo modo, a altura da superfície é de alguma forma relacionada com a quantidade de energia transferida ao longo desse percurso.

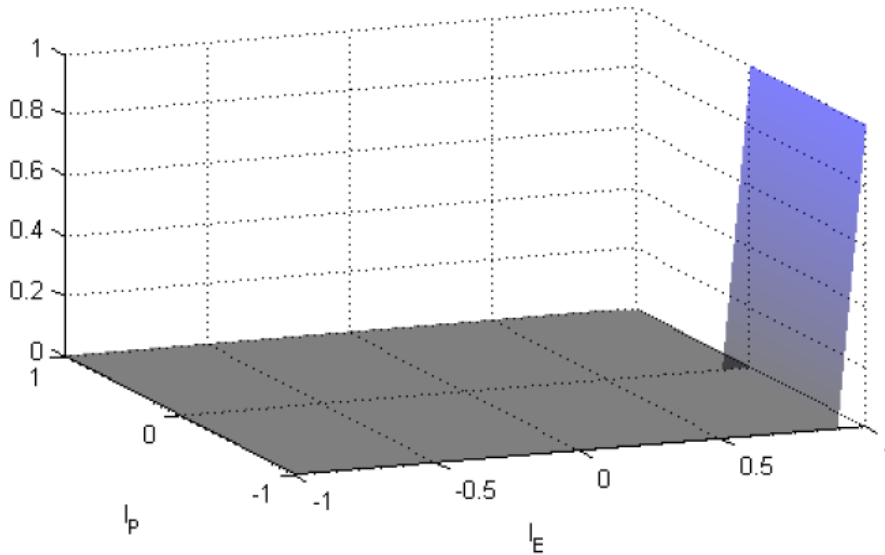


Fig. Nº 35 Gráfico da trajetória R5 [32]

Por exemplo, para a rota R4, a transferência de energia é escalada, por um fator obtido pela passagem de um sinal perante a necessidade de energia do equipamento, através de um filtro passa baixo com frequência de corte tal que a alimentação é continuamente distribuída com uma corrente relativamente constante até R4. A superfície da figura 36 tem a seguinte forma onde conseguimos visualizar uma corrente relativamente constante, exceto quando a necessidade de potência é alta e a *flywheel* está quase esgotada, é quando a *flywheel* está perto da carga máxima.

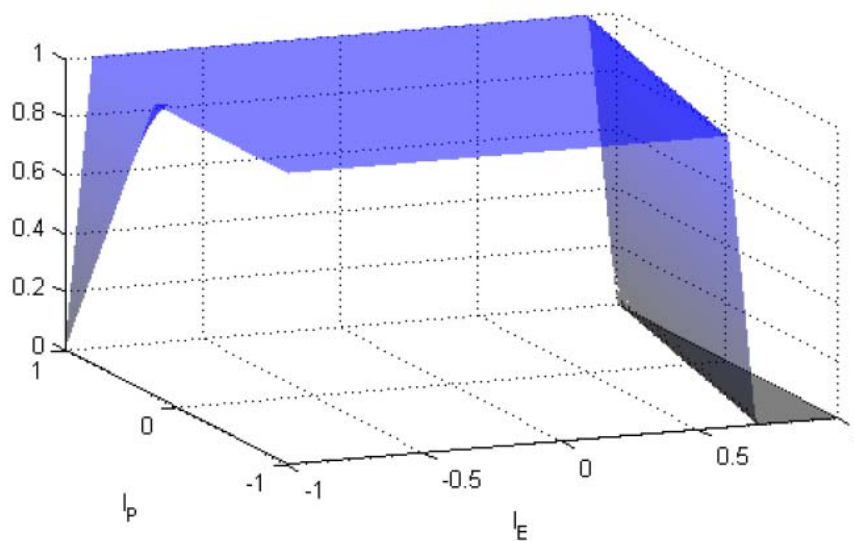


Fig. Nº 36 Gráfico da trajetória R4 [32]

Além do sistema de controlo principal, podem ser adicionados algumas logicas de modo a otimizar o desempenho do sistema. Normalmente estas implementações são em grande parte limitadores de picos, o que limita o consumo máximo de energia da rede ou grupo gerador para um valor pré-definido. O sistema é facilmente adequado a outras aplicações.

### 5.3 Simulação

Todas as simulações foram desenvolvidas e executadas utilizando *simulink*, um pacote de *software* que é usado em conjunto com o MATLAB. Este fornece uma interface gráfica para modelar sistemas dinâmicos altamente complexos.

A simulação é dividida em duas partes separadas. Em primeiro lugar, a simulação dinâmica da Draga é executada por um determinado período de tempo (400 segundos). Esta simulação gera, entre outras coisas a exigência de energia da Draga (perfil de carga). Este perfil de carga é posteriormente utilizado para a simulação da dinâmica da *flywheel* e o sistema de controlo da carga. A simulação é dividida por várias razões.

A primeira é a modularidade, a simulação da *flywheel* pode aceitar qualquer perfil de carga com base no tempo de entrada, seja ela gerada por simulação ou por dados reais medidos.

A outra razão é a eficiência computacional, uma vez que existe apenas um único caminho entre a dinâmica de dragagem e a *flywheel* a simulação poder ser dividida em duas partes, cada parte utilizando o seu próprio agente de resolução ótima.

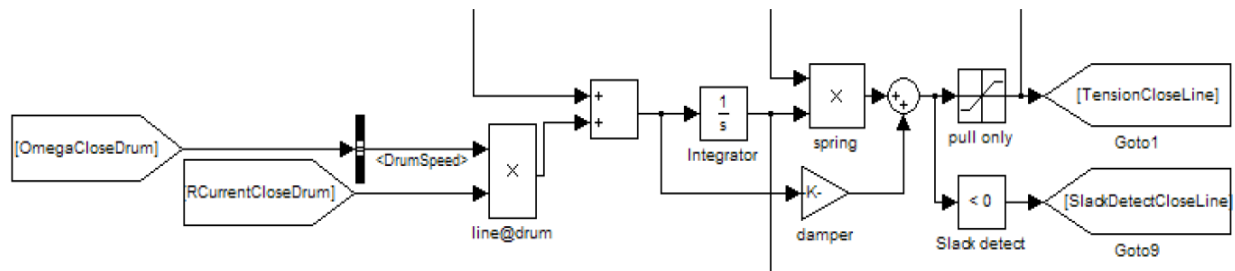


Fig. Nº 37 Bloco de simulação [32]

#### Solver:

A natureza matemática da simulação dinâmica da draga é completamente diferente do sistema de controlo da *flywheel*. O modelo da simulação da Draga é uma equação diferencial linear. Isto significa que a solução pode algumas vezes mudar abruptamente.

A simulação do sistema de controlo da *flywheel* contém muitos componentes baseados na lógica, que podem mudar os seus estados diretamente.

#### Processo de Simulação:

Antes da simulação iniciada, é necessário utilizar bastantes parâmetros que inclui configurações de simulação, os parâmetros de dragagem e configurações do sistema de controlo da *flywheel*. Primeira a simulação da Draga é executada, e em seguida a quantidade de energia necessária é carregada na simulação da *flywheel* como entrada. O resultado mais importante da simulação da *flywheel* é o consumo de energia total do sistema. Esta saída é usado no pós-processamento, obtendo custos da energia elétrica ou gerador. A figura 38 ilustra a simulação efetuada.

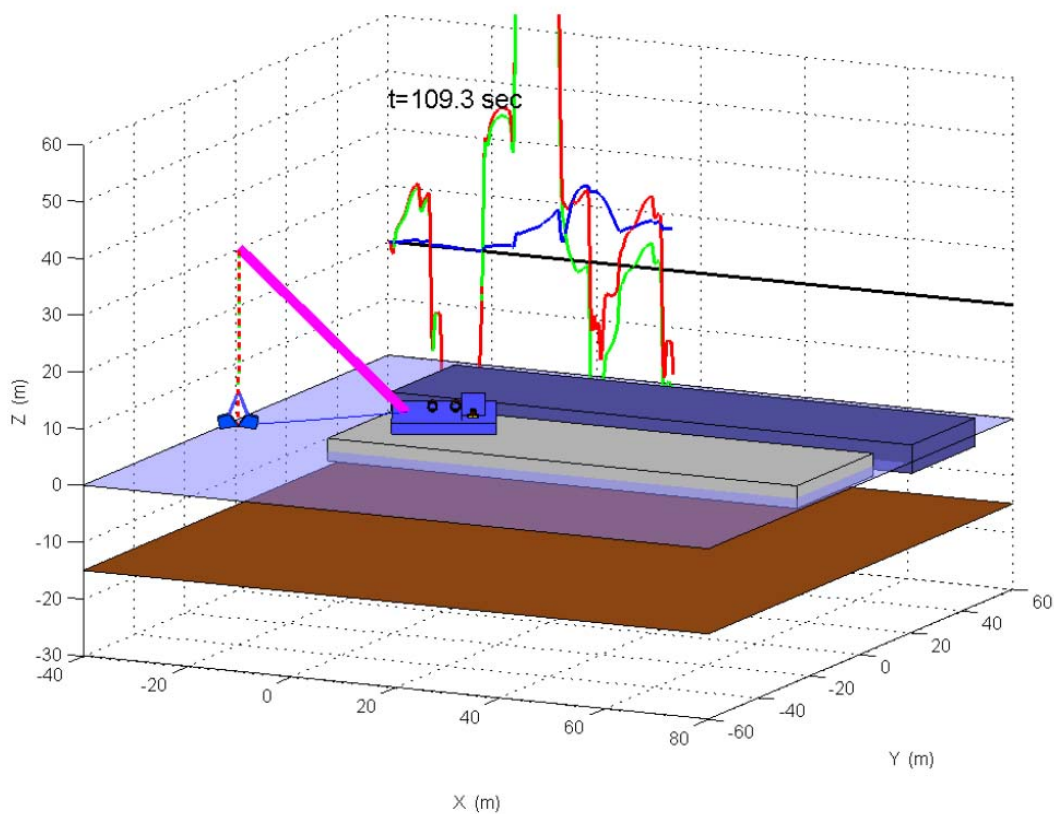


Fig. Nº 38 Simulação da draga [32]

## 5.4 Resultados

### Consumo de energia:

Relativamente ao consumo de energia esta melhorou significativamente na implementação da *flywheel*, conforme podemos observar na tabela 17.

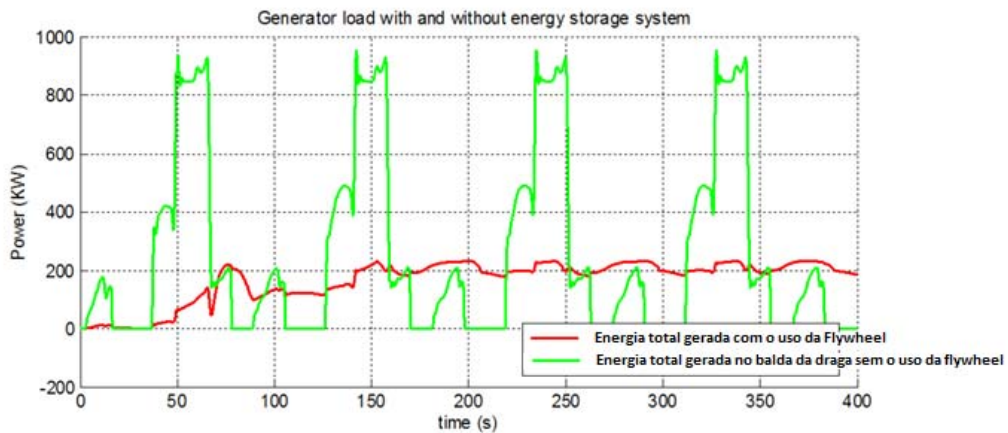
Tabela Nº 17 Energia usada [32]

Potência usada						
	Total potência necessária		Energia gerada com o uso da <i>flywheel</i>		Energia gerada sem o uso da <i>flywheel</i>	
Pico	937	kW	233	kW	937	kW
Média	184	kW	209	kW	277	kW

Os picos elevados (que coincidem com a elevação do balde) são totalmente preenchidos pela energia armazenada na *flywheel*, e o perfil de consumo de energia mostra apenas algumas flutuações.

O efeito da *flywheel* pode ser visto na tabela 18, que traça o consumo total da alimentação externa da Draga com e sem a utilização da *flywheel*.

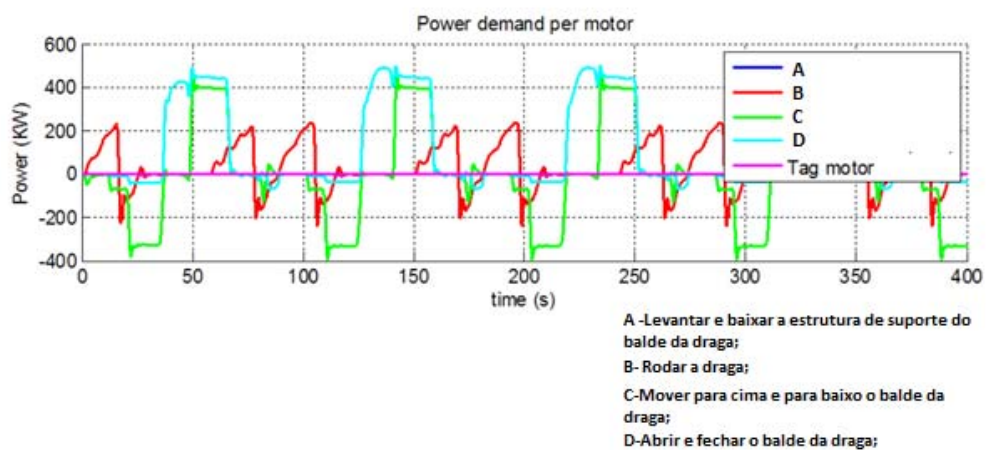
Tabela Nº 18 Carga de energia com e sem o uso da *flywheel* [32]



Conforme fora mencionado os picos de potência apresentados a verde corresponde à necessidade de energias na altura em que o balde é puxado para cima. Este pico de energia necessária poderá estar compreendido num intervalo entre 30 a 35 segundos.

A tabela 19 mostra a representação gráfica da necessidade de potência entre os diferentes motores.

Tabela Nº 19 Energia necessária por motor [32]



### Custo de energia:

Os resultados do consumo de energia foram utilizados para calcular o custo de energia quando é utilizada como principal fonte de alimentação para a draga.

### Custo combustível:

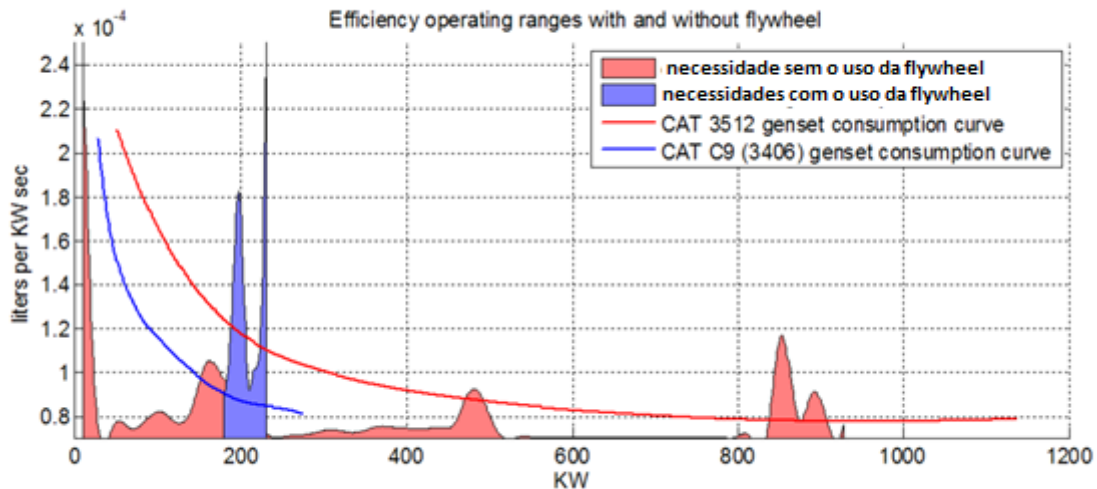
A outra fonte de energia possível é a utilização de um grupo gerador, neste caso pode-se utilizar um grupo gerador de menor dimensão, uma vez que a *flywheel* amortece as várias tensões de pico.

### Uso do combustível:

Uma draga que não esteja equipada com uma *flywheel* necessita dum gerador de 1150 kW CAT 3512, enquanto se utilizar uma *flywheel* um gerador de 275 kW é suficiente.

A tabela 20 ilustra as curvas de eficiência de combustível.

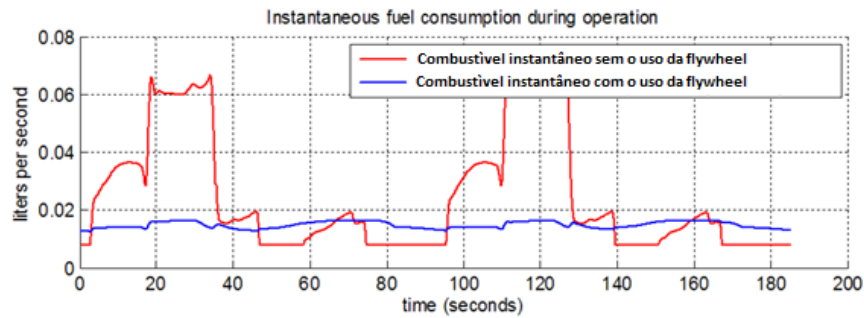
Tabela Nº 20 Eficiência operacional com e sem o uso da *flywheel* [32]



As curvas de eficiência mostram que um grupo gerador é mais eficiente quando funciona perto da sua potência máxima. Os histogramas são utilizados para medir a quantidade de energia que a draga exige num certo intervalo de tempo. Sem o auxílio da *flywheel*, as grandes quantidades de energia (perto de 900 kW) são obtidas por curtos períodos de tempo, mas a maior parte do tempo, o gerador funciona a menos de metade da sua capacidade. Uma Dragagem equipada com uma *flywheel* consome energia muito mais consistente (constante em torno dos 200 kW). Sendo assim um grupo gerador

adequado apenas irá operar perto do seu ponto de eficiência resultando numa economia em combustível. Conforme ilustrado na tabela 21, o consumo de combustível médio foi reduzido em 37%.

Tabela Nº 21 Consumo de combustível com e sem o uso da *flywheel* [32]

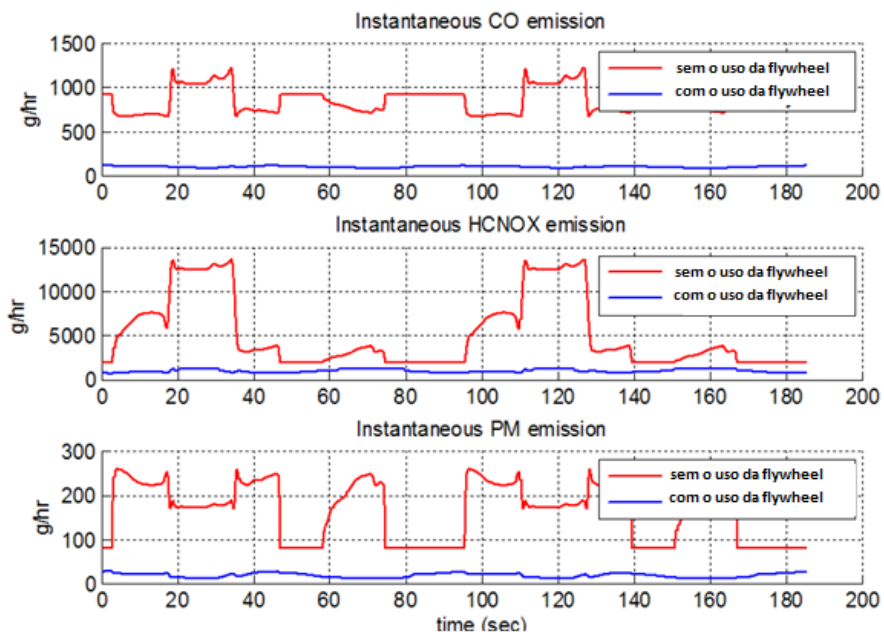


### Emissões:

Benefício de emissões pode ser calculado, utilizando os dados fornecidos pela Caterpillar.

A tabela 22 mostra os resultados para as três principais categorias. Instantâneo

Tabela Nº 22 Emissões libertadas com e sem o uso da *flywheel* [32]



As emissões são reduzidas em 80% a 90% para as três categorias de emissões.

## 5.5 Conclusão e pontos críticos

Apesar de ser uma simulação baseada num estudo aplicado a um caso real, não foi possível obter a desejável simulação em Matlab, seria de todo o interesse confirmar os valores ilustrados nas simulações da draga conforme foram apresentados neste relatório.

Um outro ponto crítico na qual poderia ser mais aprofundado era apresentar uma topologia mais descritiva referenciando os vários momentos a que a *flywheel* entraria em funcionamento. Conforme referenciado entraria em funcionamento na elevação do balde, tendo este uma altura de 40 m e necessitando uma potência de 22 MJ.

No que diz respeito à *flywheel*, faltou especificar o tipo de material que constitui o rotor da *flywheel*, se é em compostos de carbono, ou outros materiais possíveis. No entanto usando a fórmula 3.13, e os dados especificados na tabela 15, conseguimos obter  $\sigma_t$ :

$$E_{lim} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot h \cdot \left(1 - \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^4\right) \cdot r_o^2 \cdot \sigma^t \rightarrow E_{lim} = \frac{3}{16} \cdot \pi \cdot h \cdot r_o^2 \cdot \sigma^t \rightarrow E_{lim} = \frac{3}{8} \cdot \pi \cdot r_o^3 \cdot \sigma^t$$

Onde,

$$E_{lim} = \frac{3}{8} \cdot \pi \cdot r_o^3 \cdot \sigma^t \rightarrow 40.3 \times 16^6 = \frac{3}{8} \cdot \pi \cdot 0,95^3 \times \sigma^t \rightarrow \sigma^t = 3,98 \times 10^7$$

A força tangencial máxima é aproximadamente 1, podemos calcular a densidade do material a partir de:

$$\frac{\sigma_t}{\rho \cdot \omega^2 \cdot r_0^2} \cong 1 \rightarrow \frac{3,98 \times 10^7}{\rho \cdot 200^2 \cdot 0,95^2} \cong 1 \rightarrow \rho = 1102,49 \text{ Kg/m}^3$$

Concluimos que trata-se dum material leve, possivelmente composto de carbono.

No que diz respeito as características da *flywheel* apresentadas na tabela 15, esta poderia apresentar mais detalhes técnicos, tanto na *flywheel* como no motor, uma vez que por exemplo esta podia especificar a massa do rotor, eficiência da *flywheel*, altura do rotor, entre outros aspetos a ter em conta. Quanto aos valores apresentados na tabela, estes apresentam algumas dúvidas, nomeadamente no valor da sua energia armazenada, calculando através da fórmula 3.1,obtemos:

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2, \text{onde}$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot (3100 \text{ kg} \cdot \text{m}^2) \cdot \left(200 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)^2 \rightarrow E = 62 \text{ MJ}$$

O que não corresponde ao mencionado na tabela, possivelmente algum dado para o cálculo da energia cinética da *flywheel* encontra-se incorreto.

No que diz respeito ao sistema de controlo, foi referido que o peso do balde em bruto é aproximadamente de 56 toneladas e atingia uma altura máxima de 40 metros, o que equivalia a 22MJ, no entanto fazendo alguma análise crítica, conclui-se que os valores não são os mencionados. Segundo os dados podemos necessitar aproximadamente:

$$E_{pg} = m \cdot g \cdot h \rightarrow E_{pg} = 56000 \times 9,8 \times 40 = 219,52 \text{ MJ}$$

Em sumo, podemos concluir que existiram alguns valores incorretos, podendo comprometer os objetivos esperados, mas pressupõe que exista alguma falha não no resultado dos valores obtidos mas em certas especificações, podemos concluir que existe uma melhoria significativa na poupança de energia, conforme podemos observar na tabela 18, ou em caso de utilizar um grupo gerador, podemos reduzir a sua potência para a ordem dos 275 kW, outrora seria na ordem dos 1150 kW. Respetivamente à poupança de combustível esta pode ser visualizada na tabela 21, existindo o que se previa uma diminuição do consumo do combustível. Relativamente às emissões libertadas, os valores foram fornecidos pela Caterpillar, analisados conseguimos obter uma redução nas três categorias de emissões.

Em geral, o uso da *flywheel* permitiu melhorias em todos os aspetos, energia, ambientais e económicos. Ficando como ponto que deveria ser analisado num futuro próximo, seria o custo, energia e o impacto ambiental que necessita para a construção duma *flywheel* no seu processo de montagem.

## Capítulo 6 - Conclusão

---



Para a realização deste trabalho foi efetuada uma pesquisa tendo em vista um estudo sobre a qualidade de energia elétrica e a *flywheel* como dispositivo futuro para armazenamento de energia. Numa primeira abordagem foram realizadas pesquisas das diversas perturbações na energia elétrica, tendo sido apresentadas algumas das possíveis causas para o problema em questão. Foram ilustradas as diversas formas de ondas consoante as perturbações em causa, e foram apresentadas soluções para minimizar ou corrigir os diversos problemas na qualidade de energia elétrica.

Foi realizado um estudo sobre o estado da arte da *flywheel*, referenciaram-se as diversas partes constituintes da *flywheel*, algumas aplicações onde foi usada, mencionadas as maiores valias na sua utilização, entre muitas outras características. Foram apresentadas as diversas considerações a ter em conta para um possível desenvolvimento de uma *flywheel*, nomeadamente a forma da *flywheel*, o material a ser usado, as tensões a que se encontra sujeito o material, entre muitas outras, a ter em consideração para o seu desenvolvimento.

Foram realizadas algumas comparações em três níveis de potência (150 kVA, 600 kVA e 1200 kVA). Foi feita uma comparação entre diversos fornecedores, que utilizam a *flywheel* e baterias como dispositivo de armazenamento de energia. Foram analisadas características importantes como: peso, eficiência, custos de energia, espaço necessário, regulações, capacidade, ruído, entre muitas outras características.

Foi elaborado um estudo sobre um modelo onde é aplicado uma *flywheel* numa draga. Os resultados de modelo são muito bons, mas admite-se que tais resultados poderão ser melhorados com a parametrização mais pormenorizada por parte do uso da *flywheel*. Dos resultados obtidos foi possível concluir uma redução de 25% do consumo de energia, uma redução de 37% no consumo de óleo e uma redução entre 80% a 90% em todas as categorias de emissões.

Em suma, o uso da *flywheel* permite obter algumas melhorias em diversos aspetos, como a obtenção de uma melhor qualidade de energia elétrica, conforme a própria análise elaborada neste trabalho utilizando a *flywheel* para picos de tensão elevados, proporcionando uma redução nos consumos de energia elétrica. Após o seu fabrico não existe impacto ambiental, entre muitas outras vantagens. Um aspeto a desenvolver neste tipo de tecnologia é a necessidade de melhorar a sua capacidade de armazenamento.



## REFERENCIAS

- [1] “Manual da qualidade da energia elétrica”, edp, Dezembro 2005.
- [2] Joseph Seymour; Terry Horsley; “Sete tipos de problemas no fornecimento”, APC, no. 18, 2005.
- [3] Maria Inês Lopes Marques; “ 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] Satish Samineni; “Modeling and Analysys of a Flywheel Energy Storage System for Voltave Sag Correction”, Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Eletrotécnica, Dezembro 2003.
- [5] António Manuel Vasconcelos Miranda; “Tecnologias de armazenamento de energia – Identificação do potencial e aplicações”, Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Junho 2011
- [6] Luís André dos Reis Covão; “ Preliminary Approach Designing an Electromagnetic Bearing for Flywheel Energy Systems”, Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Julho 2008.
- [7] Bjorn Bolund, Hans Bernhoff, Mats Leijon; “Flywheel energy and power storage systems”, Janeiro 2005.
- [8] <http://www.mpoweruk.com/>
- [9] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Magneticbearing3.jpg>

- [10] Hillyard, Jeef, “Magnetic Bearings”, Technische Universität München, 2006.
- [11] Schweitzer, G.; “Active Magnetic Bearings – Chances and Limitations”, International Center for Magnetic Bearings, ETH Zurich, CH–8092 Zurich.
- [12] Yanlians, Xu; Yueqin Dun; Xiuhe Wang; Yu, Kong; “Analysis of Hibrid Magnetic Bearing with permanent Magnet in the Rotor by FEM”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, NO. 4, April, 2006.
- [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] Bolund, Bjorn; Bernhoff, Hans; Leijon, Mats; “Flywheel Energy and Power Storage Systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, pp 235–258, 2007.
- [15] MS-196. Project all electric vehicle (AEV). RTP 16.02 inom WEAG. Technical Report No. 1; Nov–Dec 2001.
- [16] Taylor, P.; Johnsson, L.; Reichert, K.; DiPietro, P.; Philip, J.; Butler, P.; “A summary of the state of the art of superconducting magnetic energy storage systems, flywheel energy storage systems and compressed air energy storage systems”, SAND99-1854, unlimited release; Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550: Sandia National Laboratory; 1999.
- [17] [http://www.engineeringtoolbox.com/poissons-ratio-d\\_1224](http://www.engineeringtoolbox.com/poissons-ratio-d_1224).
- [18] <http://www.caterpillar.com>.

- [19] Budynas, Richard G.; Nisbett, J. Keith; “Shigley’s Mechanical Engineering Design”, Eight Edition, McGraw–Hill, 2008.
- [20] <http://www.vyconenergy.com>.
- [21] R.Peña Alzola; R. Sebastián; J.Quesada,A.Colmenar;”Review of Flywheel based Energy Starage Systems”, International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Málaga, Espanha, Maio 2011.
- [22] Mulcahy, Thomas M.; Hull, John R.; Uherka, Kenneth L.; Abboud, Robert G.; Juna, John J.; “Test Results of 2-kWh Flywheel Using Passive PM and HTS Bearings”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 11, no. 1, pp. 1729–1732, March 2001.
- [23] Senjyu, Tomonobu; Shingaki, Takeshi; Uezato, Katsumi; “Sensorless Vector Control of Synchronous Reluctance Motors with Disturbance Torque Observer”, University of the Ryukyus, Okinawa, Japan, IEEE, pp. 381–386, 2000.
- [24] Senjyu, Tomonobu; Tamakia, Satoshi; Muhandoa, Endusa; Urasakia, Naomitsu; Kinjoa, Hiroshi; Funabashib, Toshihisa; Fujitac, Hideki; Sekinea, Hideomi; “Wind Velocity and Rotor Position Sensorless Maximum Power Point Tracking Control for Wind Generation System”, Japan, Renewable Energy, nº 31, pp. 1764–1775, 2006.
- [25] Song, Zhengqiang; Hou, Zhijian; Jiang, Chuanwen; Wei, Xuehao; “Sensorless Control of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor Using a New Method”, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Energy Conversion and Management, nº47, pp. 2451–2460, 2006.
- [26] McLallin, Kerry; “NASA Flywheel System Development”, Glenn Research Center, NASA, USA, Space Power Workshop, April 4, 2001.

- [27] Bitterly, Jack G.; “Flywheel Technology Past, Present, and 21st Century Projections”, US Flywheel Systems, IEEE AES Systems Magazine, 0885-8985/98, pp. 13–16, August 1998.
- [28] Tsukamoto, O.; Utsunomiya, A.; “HTS Flywheel Energy Storage System with Rotor Shaft Stabilized by Feed-Back Control of Armature Currents of Motor-Generator”, Tsukamoto Laboratory, Faculty of Engineering, Yokohama National University, Yokohama, Japan; *Physica C: Superconductivity*, vol. 463–465, pp. 1267–1270, 2007.
- [29] Nagaya, S.; Kashima, N.; Kawashima, H.; Kakiuchi, Y.; Hoshino, A.; Isobe, S.; “Development of the Axial Gap Type Motor/Generator for the Flywheel with Superconducting Magnetic Bearings”, Japan, *Physica C*, vol. 392–396, pp. 764–768, 2003.
- [30] Werfel, Frank N.; Floegel-Delor, Uta; Riedel, Thomas; Rothfeld, Rolf; Wippich, Dieter; Goebel, Bernd; Reiner, Gerhard; Wehlau, Niels; “A Compact HTS 5 kWh/250 kW Flywheel Energy Storage System”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*
- [31] H.J. de Jong; K.R. Williams; “Development and Simulation of a Flywheel – Based Energy Storage System on a Clamshell Dredge”, KRW technologies.
- [32] André Fernando Ribeiro de Sá; “Gestão de Energia e Eficiência Energética”, 2 edição, 2010.
- [33] <http://www.tbcranes.com.br>

## ANEXO 1

### Coeficiente De Poisson

---



Uma breve introdução ao coeficiente de Poisson

**Coeficiente de Poisson** é uma constante física dos materiais, definida pela relação entre a deformação lateral e a deformação longitudinal conforme ilustrado na figura 39 e representado pela equação A1.1:

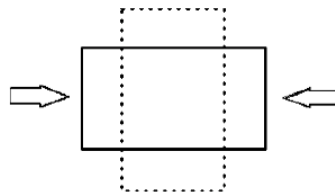


Fig. Nº 39 Material esticado em uma direção [17]

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} \quad (\text{A1.1})$$

Onde  $\varepsilon_{yy}$  representa a deformação transversal e  $\varepsilon_{xx}$  é a tensão longitudinal. O coeficiente de Poisson normalmente situa-se entre 0,25 e 0,35 para a maioria dos metais, matérias como borracha tem um coeficiente de Poisson perto de 0,5.

Teoricamente materiais com um coeficiente de Poisson de exatamente 0.5 são verdadeiramente incompressíveis, uma vez que a soma de todas as suas forças leva a um volume de zero.

Cortiça por exemplo, por outro lado tem um coeficiente de Poisson muito próximo de zero.

O coeficiente de Poisson é delimitado por dois limites teóricos, que deve ser superior a 1 e inferior ou igual a 0.5.

$$-1 < \nu < \frac{1}{2} \quad (\text{A1.2})$$

No entanto, é raro encontrar materiais de engenharia com índices negativos de Poisson.

A maioria das materiais está compreendido entre,

$$0 < \nu < \frac{1}{2} \quad (\text{A1.2})$$

Os tecidos de fibras de carbono de acordo com o coeficiente de Poisson é de 0.3.



## ANEXO 2

Cálculos de um rotor de uma *flywheel* para diferentes tipos de cargas

---



Para a concepção de uma *flywheel* em que o material usado é o carbono AS4C, onde a sua densidade é de  $\rho = 1510\text{kg/m}^3$

A força de tração máxima para este tipo de material é de 1.650 MPA. Será usado metade do valor de  $\sigma^t$ , como fator de segurança.

$$\sigma^t = \frac{1650}{2} \text{MPA} = 825 \text{MPA}$$

A relação entre raio interior e exterior é de  $\frac{r_i}{r_o} = \frac{\sqrt{2}}{2}$ , e a relação entre altura e raio externo é de  $h = 2 \cdot r_o$  (por motivos de tamanho).

$$\frac{r_i}{r_o} = \frac{\sqrt{2}}{2} \rightarrow \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^4 = \frac{1}{4}$$

$$h = 2 \cdot r_o$$

Usando a equação (3.13), podemos concluir:

$$E_{lim} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot h \cdot \left(1 - \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^4\right) \cdot r_o^2 \cdot \sigma^t \rightarrow E_{lim} = \frac{3}{16} \cdot \pi \cdot h \cdot r_o^2 \cdot \sigma^t \rightarrow E_{lim} = \frac{3}{8} \cdot \pi \cdot r_o^3 \cdot \sigma^t$$

Para a velocidade linear e a relação de força de tração, vai ser usada a seguinte equação:

$$\frac{\sigma_t}{\rho \cdot \omega^2 \cdot r_o^2} \approx 1$$

- 1º *Serie* de cálculos para  $\sigma^t = 825 \text{MPa}$

Para estes primeiros cálculos, a energia da *flywheel* foi fixada, a dimensão e a velocidade do rotor vão ser calculados.

$$E_{lim} = 2.5 \text{Kwh} = 9 \text{Mj}$$

$$E_{lim} = \frac{3}{8} \cdot \pi \cdot r_o^3 \cdot \sigma^t \rightarrow 9 \times 10^6 = \frac{3}{8} \cdot \pi \cdot r_o^3 \cdot 825 \times 10^6 \rightarrow r_o = 0.21 \text{m}$$

$$h = 2 \cdot r_o \rightarrow 2 \times 0.21 = 0.42 \text{m}$$

$$\frac{r_i}{r_o} = \frac{\sqrt{2}}{2} \rightarrow r_i = 0.148 \text{m}$$

Calculo da Velocidade Angular para  $r_o = 0.21m$

$$\frac{\sigma_t}{\rho \cdot \omega^2 \cdot r_o^2} = 1 \rightarrow \omega^2 = \frac{825 \times 10^6}{1510 \times 0.21^2} \rightarrow \omega = \frac{3519.95 \text{ rad}}{s} = 33613 \text{ rpm}$$

- 2º Serie de cálculos para  $\sigma^t = 825 \text{ MPa}$

Nestes cálculos o valor máximo da velocidade da *flywheel* é fixado bem como as suas dimensões.

$$\omega = 60000 \text{ rpm} = 6283.19 \text{ rad/s}$$

$$\frac{\sigma_t}{\rho \cdot \omega^2 \cdot r_o^2} = 1 \rightarrow r_o^2 = \frac{825 \times 10^6}{1510 \times 6283.19^2} \rightarrow r_o = 0.118 \text{ m}$$

$$h = 2 \cdot r_o = 2 \times 0.118 = 0.235 \text{ m}$$

$$\frac{r_i}{r_o} = \frac{\sqrt{2}}{2} \rightarrow r_i = 0.083 \text{ m}$$

Calculo da energia armazenada para  $r_o = 0.118 \text{ m}$ :

$$E_{lim} = \frac{3}{8} \cdot \pi \cdot r_o^3 \cdot \sigma^t \rightarrow E_{lim} = \frac{3}{8} \cdot \pi \cdot 0.118^3 \cdot 825 \times 10^6 = 1.58 \text{ MJ} = 0.441 \text{ KWh}$$

- 3º Serie de cálculos para  $\sigma^t = 825 \text{ MPa}$

Estes cálculos destinam-se a testar os limites de segurança. Tanto o limite de energia como a velocidade foram especificados sendo o tamanho e a resistência à tração calculadas para os valores específicos.

$$E_{lim} = 2.5 \text{ Kwh} = 9 \text{ MJ}$$

$$\omega = 60000 \text{ rpm} = 6283.19 \text{ rad/s}$$

$$\frac{\sigma_t}{\rho \cdot \omega^2 \cdot r_o^2} = 1 \leftrightarrow \sigma_t = \rho \cdot \omega^2 \cdot r_o^2$$

$$E_{lim} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot h \cdot \left(1 - \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^4\right) \cdot r_o^2 \cdot \sigma^t \rightarrow E_{lim} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot h \cdot \left(1 - \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^4\right) \cdot r_o^2 \cdot \rho \cdot \omega^2 = \frac{3}{16} \cdot \pi \cdot h \cdot r_o^2 \cdot \rho \cdot \omega^2$$

$$E_{lim} = \frac{3}{8} \cdot \pi \cdot r_o^5 \cdot \rho \cdot \omega^2 \rightarrow 9 \times 10^6 = \frac{3}{8} \cdot \pi \cdot r_o^5 \cdot 1510 \cdot 6283 \times 19^2 \rightarrow r_o = 0.167 \text{ m}$$

$$h = 2 \cdot r_o = 2 \times 0.167 = 0.333m$$

$$\frac{r_i}{r_o} = \frac{\sqrt{2}}{2} \rightarrow r_i = 0.118m$$

Calculo das forças de stress para  $r_o = 0.167m$  :

$$\sigma_t = \rho \cdot \omega^2 \cdot r_o^2 \rightarrow \sigma_t = 1653.59MPA$$

Este valor é superior ao valor máximo admissível para o material em causa.