

• C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Desenvolvimento de um conceito de bateria - MAD – (MAGnetic spring Disk)**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

### **Development of an ESS concept – MAD battery – (MAGnetic spring Disk)**

**Autor**

**Vitor Emanuel Morais Nascimento**

**Orientador**

**Miguel Rosa Oliveira Panão**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Orientador** Professor Doutor Miguel Rosa Oliveira Panão  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor Fernando Jorge Ventura Antunes  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Coimbra, Setembro, 2018**



*"Do not go where the path may lead,  
go instead where there is no path and leave a trail."*

*Waldo Emerson*

*"Opportunity is missed by most people  
because it is dressed in overalls and looks like work."*

*Thomas A. Edison*

*À família.*



## Agradecimentos

*A dissertação apresentada foi apenas possível devido à contribuição das mais variadas pessoas, às quais desde já, deixo o meu profundo obrigado cuja ajuda se revelou essencial. Por este motivo, quero deixar registado em palavras o meu apreço:*

*Ao meu orientador, o Professor Doutor Miguel Panão, por me transmitir toda a motivação e confiança que me foi faltando, pela paciência, mas principalmente por sempre acreditar neste projeto.*

*A toda a minha família, principalmente à minha mãe e ao meu pai, pelo apoio incondicional e pelo esforço que fizeram para me proporcionar um percurso académico, permitindo-me alcançar este objetivo.*

*À minha namorada por nunca duvidar e por me ajudar a sair dos momentos mais sombrios.*

*A todos os meus amigos que estiveram presentes em algum momento neste longo caminho e que fazem parte das melhores memórias que levo da vida académica.*

*Ao grupo EMWorks pela disponibilização do programa de simulação numérica EMS.*

*À empresa Beiraltina pela disponibilização do espaço, pessoal e maquinaria para a construção do modelo proposto.*

*Ao Luis Carvalho e Cláudio Fonseca pela ajuda e pelo tempo disponibilizado na fase de construção do modelo.*





## Resumo

A integração de sistemas de armazenamento de energia (ESS) na gestão da produção e planejamento de grandes centrais elétricas é um dos objetivos mais cobiçados da atualidade. As tecnologias existentes não são ainda suficientemente capazes de responder ao problema e, não só o planeta mas também a economia começam a sentir as consequências. A ciência e a engenharia têm feito progressos no melhoramento das tecnologias atuais no sentido de alargar as suas aplicabilidades.

Na presente dissertação pretende-se explorar um conceito inovador de ESS baseado na interação magnética entre ímanes permanentes, a bateria MAD.

O texto começará por dar a conhecer alguns dos principais sistemas de armazenamento de energia da atualidade, bem como os vários tipos de áreas onde estes se aplicam e também as características que permitem diferenciar as demais tecnologias. Neste contexto, abordam-se as principais vantagens de ESS incorporados na rede de gestão e produção de energia elétrica bem como as consequências da utilização deficiente dos mesmos.

Seguir-se-á um estudo numérico para averiguar qual a melhor configuração e geometria para posterior construção do modelo MAD, utilizando o software *EMS* da EMWorks. O desenho mais promissor encontrado segue o princípio de uma mola linear como base para o armazenamento de energia potencial, no entanto, este efeito mola surge de forças atrativas e repulsivas entre campos magnéticos.

Cumprindo as premissas resultantes dos estudos numéricos, o texto termina com a construção do modelo proposto, com o objetivo de servir de prova de conceito a esta nova tecnologia.

Algumas das conclusões mais importantes deste trabalho são a possibilidade de conceber um ESS com auto-descarga nula e a demonstração da viabilidade de um conceito alternativo de armazenar energia de forma compacta, sem impactos ambientais negativos e com a vestalidade de poder ser aplicado em qualquer parte do mundo, independentemente de quaisquer fatores geológicos ou geográficos.

**Palavras Chave:** Sistemas de armazenamento de energia, Interação magnética, Efeito mola, Auto-descarga, Bateria MAD





## Abstract

Integrating energy storage systems (ESS), in large management of energy production is probably one of the holy grails of the present days. The existing solutions are not yet enough to face the problem and, not only the environment but also the economy are starting to feel the consequences. Progress is being made to improve the current technologies, to make them viable for such applications.

This paper explores a new concept of ESS, the MAD Battery, based on force interactions between permanent magnets.

At first, the reader will be introduced with some of the most important ESS technologies in the market, as well as the tools needed to compare them. At this point, it is going to be discussed some of the most important advantages of integrating ESS on the electric grid, as well as the consequences of the lack of investment in this area.

Later on, will be considered a numeric approach making use of *EMS* software by EMWorks to find the best suitable design before any model construction or experiments. The most promising design found follows the principle of a linear spring as the basis for the storage of potential energy, however, this spring effect arises from attractive and repulsive forces between magnetic fields.

Following the principles that resulted in the numeric studies, this paper ends with what concerns the construction of a model that proves this new MAD concept.

Some of the most important conclusions are the possibility of conceiving an ESS technology without self-discharge, no environmental impacts and with the versatility to be implemented in any place, regardless of any geologic or geographical factors.

**Keywords:** Energy storage systems, Interactions between permanent magnets, Self-discharge, Linear spring, MAD Battery



# Conteúdo

<b>Lista de Figuras</b>	v
<b>Lista de Tabelas</b>	vii
<b>Nomenclatura</b>	ix
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	4
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1 ESS - Áreas da Aplicação . . . . .	5
2.1.1 Sistemas UPS . . . . .	5
2.1.2 Controlo de picos . . . . .	6
2.1.3 Gestão em larga escala . . . . .	6
2.2 Atuais Sistemas de Armazenamento de Energia . . . . .	8
2.2.1 Propriedades dos Sistemas de Armazenamento de Energia . . . . .	8
2.2.2 Tipos de ESS . . . . .	9
<b>3 Estudos Numéricos e Projeto da Instalação</b>	<b>15</b>
3.1 Mola espiral . . . . .	16
3.2 Mola linear . . . . .	18
3.3 Resultados Numéricos . . . . .	22
3.4 Conclusão dos estudos numéricos . . . . .	24
<b>4 Projeto e Construção do Modelo MAD</b>	<b>27</b>
4.1 Ensaio experimentais . . . . .	30
4.1.1 Instalação e Procedimento . . . . .	31

4.1.2 Resultados e Discussão . . . . .	34
4.1.3 Sistema de Transmissão e Gerador . . . . .	37
<b>5 Notas conclusivas e trabalho futuro</b>	<b>41</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>43</b>
<b>Apêndice A: Dimensões</b>	<b>45</b>
<b>Apêndice B: Especificações</b>	<b>49</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1	Diagrama de consumo elétrico em Portugal no dia 18 de Fevereiro de 2018 [Adaptado de <a href="http://www.centrodeinformacao.ren.pt/">http://www.centrodeinformacao.ren.pt/</a> ]	7
Figura 2.2	Resumo dos tipos de ESS e respetivas características (Dunn <i>et al.</i> , 2017)	14
Figura 3.1	Moda espiral. Modelo final em <i>solidworks</i>	17
Figura 3.2	Mola espiral. Esquema representativo do movimento de carga.	17
Figura 3.3	Três arranjos magnéticos diferentes para o anel. Rotação de a) 45°, b) 90° e c) 135	18
Figura 3.4	Modelo com um íman em forma de anel no lugar do estator.	19
Figura 3.5	Configuração IRS	20
Figura 3.6	Configuração IAR	21
Figura 3.7	Resultados para a configuração mola espiral.	22
Figura 3.8	Densidade de fluxo magnético para a configuração ilustrada na Fig. 3.4. No presente passo é possível ver claramente a direção do binário resultante no rotor.	23
Figura 3.9	Resultados para a configuração IRS	23
Figura 3.10	Resultados para a configuração IAR	24
Figura 4.1	Fotografia de um dos volantes móveis	27
Figura 4.2	Fotografia de um dos volantes fixos	28
Figura 4.3	Fotografia do órgão de armazenamento de energia do modelo M.A.D	30
Figura 4.4	Calha de regulação e base móvel	31
Figura 4.5	Modelo fixo à calha por meio de um suporte de madeira	32
Figura 4.6	Procedimento de obtenção dos dados experimentais.	33

Figura 4.7	Relação entre a força e o deslocamento obtida com base na energia armazenada.	34
Figura 4.8	Diagrama do binário produzido por um motor mono-cilíndrico em todas as etapas de funcionamento (Khurmi & Gupta, 2008).	35
Figura 4.9	Diagrama do binário produzido por um motor multi-cilíndrico (Khurmi & Gupta, 2008).	36
Figura 4.10	Fotografia do sistema de transmissão de potência.	38
Figura 4.11	Fotografia do primeiro modelo M.A.D completo.	40
Figura 1	Dimensões da peça fixa	45
Figura 2	Dimensões da peça móvel	46
Figura 3	Dimensões dos elementos de transmissão	47
Figura 4	Especificações do motor	49

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Principais características dos sistemas: PHS, CAES e TES.	11
Tabela 2.2	Principais características dos sistemas: Baterias eletroquímicas, Fuel cell de hidrogénio, Supercondutores, Flywheels.	14
Tabela 3.1	Propriedades dos materiais selecionados	22





# Nomenclatura

$g$	Aceleração gravítica	$m\ s^{-2}$
$e$	Energia específica	$J/kg$
$E_{st}$	Energia armazenada	$J$
$E_{ut}$	Energia útil	$J$
$P$	Força peso	$N$
$p$	Potência específica	$W/kg$
$P_{max}$	Potência disponível máxima	$W$
$W$	Trabalho realizado	$J$

## Números Adimensionais

$M$	Módulo de dentado
$R$	Coefficiente de correlação de Pearson

## Símbolos Gregos

$\eta$	Eficiência
--------	------------

## **Siglas**

ESS Energy Storage Systems

CAES *Compressed Air Energy Storage*

CNC *Computer Numerical Control*

IAR Interação Atrativa-Repulsiva

IRS Interação Repulsiva Simples

LED *Light-Emitting Diode*

MAD *MAGnetic spring Disk*

PHS *Pump Hidro Systems*

SSCAES *Small-Scale Campressed Air Energy Storage*

TES *Thermal Energy Storage*

# 1 Introdução

## 1.1. Enquadramento

A temática da energia é um assunto interdisciplinar e com um enorme impacto no estilo de vida das sociedades contemporâneas. O seu domínio abrange áreas como a economia, política, saúde, ecologia e muitas outras. O facto de haver uma grande dependência da energia coloca sérias questões do risco que representaria uma eventual falha nos sistemas afetos a esta, mesmo que por breves minutos. Por essa razão se investe em desenvolvimento de tecnologia que assegure uma rede de fornecimento com uma elevada fiabilidade e com a capacidade suficiente para chegar a todos os consumidores.

Segundo [Thomas \(2017\)](#), *Chief Energy Advisor* da empresa Shell, cerca de 18% da energia consumida no mundo é sobre a forma elétrica, enquanto os outros 82% correspondem a consumo direto de combustíveis fósseis. A influência dos combustíveis fósseis situa-se, sobretudo, no sector industrial e nos transportes, enquanto a eletricidade se impõe na área residencial e serviços.

Apesar da supremacia dos combustíveis fósseis, a pressão político-social tem evoluído no sentido de aumentar o contributo da energia elétrica no consumo mundial, situação essa que já gerou importantes efeitos no fornecimento de energia elétrica de fonte renovável como, por exemplo, pelo crescente desenvolvimento dos carros elétricos. Estima-se que em 2025, a influência da eletricidade cresça para 34% do consumo mundial ([Ibrahim et al., 2008](#)).

Durante muitos anos, no ramo da eletricidade, pretendia-se apenas garantir uma produção de energia e rede de distribuição capaz de suprir as necessidades em todos os períodos de consumo, independentemente da sua eficiência e produção de desperdícios. Esta política de “consumo aquando da produção” foi-se enraizando, e toda a tecnologia cresceu em torno destes princípios.

Nas últimas décadas, o conceito de desenvolvimento sustentável ganhou maior ex-

pressão no discurso político mundial, seja pela preocupação com o efeito antropogénico sobre o planeta, ou pela escassez de recursos associada a um crescente do consumo de energia. Neste sentido têm sido feitos esforços em todos os setores tecnológicos para aumentar a eficiência dos equipamentos, reduzindo, assim, tanto no consumo como na produção de energia e, também, em perdas no sector dos transportes.

O problema incontornável é que, a hipótese de consumir ao mesmo tempo que se produz, apresenta problemas intrínsecos com o desenvolvimento sustentável. O consumo apresenta elevadas flutuações, tanto diárias como sazonais, incompatíveis com as flutuações da produção de energia. Os picos no consumo chegam, frequentemente, a ser 10 vezes superiores à média diária e os nossos sistemas de produção de energia têm que estar naturalmente sobre-dimensionados para responder a todos os períodos de consumo (Ibrahim *et al.*, 2008). Uma grande parte das centrais elétricas estão paradas quase todo o ano apenas para garantir que existe energia disponível em alturas de pico.

A sobre-produção de energia acarreta problemas sobre exploração de recursos e gestão dos excessos em alturas de baixo consumo. Quanto ao primeiro problema, a tecnologia associada às energias renováveis veio ajudar bastante, mas ao mesmo tempo agravou o segundo ponto. Parar um sistema centralizado de produção é algo que acarreta grandes custos, ou seja, incompatível com o acompanhamento da flutuação do consumo numa janela diária. Acontece, então, que a entidade produtora de energia é obrigada a baixar o preço da mesma, incitando o consumo em períodos de excessos na produção, algo que parece até contraproducente tendo em conta os princípios de sustentabilidade que motivaram as últimas décadas de avanços tecnológicos. Caso não se consiga lidar adequadamente com estes excessos, os sistemas podem mesmo entrar em sobrecarga e correr o risco de ficar danificados. Relatam-se casos em que a energia foi vendida a um preço negativo para proteger as centrais, tal como refere Reed (2017) num artigo publicado no *New York Times*, onde se dá conta desse mesmo acontecimento na Alemanha devido ao recente investimento em energia eólica. Segundo Reed (2017), os preços negativos são um sinal de que a rede elétrica alemã, como muitas outras pelo mundo fora, não se adaptou à crescente produção de energia renovável.

Neste momento, há várias propostas em curso que procuram diminuir estes efeitos negativos, com a utilização de carros elétricos carregados em alturas de baixo consumo e a substituição de sistemas centralizados por sistemas individuais de produção de

energia, mas tais soluções parecem apenas surgir como uma solução transitória e não de carácter permanente.

A solução para todos estes problemas terá que passar obrigatoriamente pela incorporação de sistemas capazes de armazenar grandes quantidades de energia com um rendimento suficiente para que se tornem viáveis e competitivos.

Em 2008, a potência de armazenamento de energia mundial rondava os 90 GW face aos 3400 GW de potência produzida (Ibrahim *et al.*, 2008). Ou seja, apenas cerca de 2.6% da potência mundial foi armazenada. Segundo o portal de estatística Statista (2018), a capacidade mundial de armazenamento de energia, a meio de 2017, seria cerca de 133 GW em que 128.1 GW correspondem a sistemas de bombagem hidráulica, PHS (*Pump Hydro Systems*).

Verificamos, assim, que se deu um aumento de mais de 48% nos últimos nove a dez anos, aumento este que acompanhou a subida da produção de energia eléctrica que, segundo Statistical Review of World Energy (2017), terá sido de, aproximadamente, 17.7% entre 2008 e 2016.

Aparentemente, pode pensar-se que um aumento de quase 50% no armazenamento de energia nos últimos anos é um sinal de que o investimento na investigação e desenvolvimento dos Sistemas de Armazenamento de Energia (ESS - *Energy Storage Systems*) está a dar resultados bastante positivos. No entanto, talvez não seja bem esse o caso. Na verdade, olhando com mais atenção verificamos que, tendo em conta o aumento da produção, apenas cerca de 3.3% da energia total produzida é atualmente armazenada,

**IMPORTÂNCIA DOS ESS**

De picos no consumo são frequentemente 10x superiores à média diária.

**10X**

As centrais eléctricas funcionam quase ininterruptamente fornecendo energia mesmo quando o seu consumo não justifica.

Reativar uma central eléctrica é um processo demorado e de elevado custo, o que impossibilita desativar as mesmas apenas para acompanhar as flutuações diárias no consumo.

**RENASCIMENTO DAS ENERGIAS VERDES**

Integrar ESS (*Energy Storage Systems*) nas tecnologias renováveis possibilita o armazenamento da energia verde quando está disponível, mas utilizar apenas quando é necessário.

A capacidade mundial dos ESS terá que crescer dos 4.67 TWh em 2017 para um valor entre 11.89 e 15.72 TWh se a contribuição das energias renováveis duplicar em 2030. (Amin, 2017)

**FORNECIMENTO DINÂMICO**

Munir a rede eléctrica de ESS poderosos permite não só aumentar a contribuição das energias renováveis como também obter um acompanhamento dinâmico ao consumo eliminando desperdícios.

**APENAS 1 EM CADA 30 GW DE POTÊNCIA PRODUZIDA É ARMazenADA**

ou seja, um aumento de apenas 0.7% em quase 10 anos! Além disso reparamos que a grande maioria do progresso foi feito pela contribuição dos PHS. Menos de 4% do armazenamento total é da responsabilidade de outros ESS e, ao contrário do que possa parecer intuitivo, a contribuição das baterias eletroquímicas não ultrapassa os 1.2% (Statista, 2018).

Segundo Amin (2017), a capacidade mundial dos ESS terá que crescer dos 4.67 TWh em 2017 para um valor entre 11.89 e 15.72 TWh se a contribuição das energias renováveis duplicar em 2030. A possibilidade de atingir este objetivo com as atuais políticas de investigação e desenvolvimento atuais nos ESS é ainda questionável, abrindo espaço para a procura de novas soluções.

## 1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como principal objetivo demonstrar a prova de conceito de um sistema de armazenamento de energia alternativo, MAD (*MAGnetic spring Disk*), onde se armazena a energia mecânica decorrente de campos magnéticos intrínsecos a ímãs permanentes. O fornecimento da energia armazenada provém da realização de trabalho útil acoplado a um alternador para conversão da energia mecânica em energia elétrica.

Assim, para atingir estes objetivos serão realizados os seguintes passos que, na prática, constituem a organização desta dissertação.

- Idealizar diferentes configurações para um ESS com base no conceito MAD;
- Estudar a validade das várias alternativas;
- Definir e simular numericamente as alternativas mais válidas;
- Projetar e construir um modelo de prova de conceito;
- Projetar e construir um sistema capaz de converter a energia armazenada em eletricidade;
- Provar o conceito MAD e estruturar uma linha de trabalhos futuros.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1. ESS - Áreas da Aplicação

Existem sobretudo três grandes áreas de aplicação para o armazenamento de energia integrado na rede de produção e distribuição de energia: 1) sistemas UPS (Uninterruptible Power Supply), 2) controlo de picos de consumo e 3) gestão em larga escala.

Cada área tem as suas características variando no tipo de tecnologia que lhes está associado. Diferentes áreas pedem diferentes sistemas de armazenamento pelo que se deve sempre entender que dificilmente se irá encontrar uma solução que seja ótima em todos os tipos de aplicações, e, sim, um conjunto de sistemas que juntos atuam no sentido de otimizar o consumo sustentável de energia.

#### 2.1.1. Sistemas UPS

As UPS são sistemas de alimentação ininterrupta instalados com a função de fornecer energia quando há uma falha na fonte primária. O objetivo é eliminar quebras no fornecimento aos consumidores, garantindo, assim, maior fiabilidade na rede de fornecimento de energia elétrica.

Existem, também (e serão talvez até mais comuns), unidades UPS individuais, instaladas em locais onde não se pode ficar sem eletricidade (por exemplo, hospitais, servidores de dados, etc.). Um sistema ESS utilizado para estes fins pretende-se que seja: fiável, rápido na resposta e capaz de fornecer grandes quantidades de energia num período de tempo limitado. No entanto, não será necessário um sistema de elevado rendimento pelo facto do fornecimento de energia ser limitado no tempo, já que se espera que as falhas na rede elétrica principal sejam pouco frequentes e de curta duração.

### 2.1.2. Controlo de picos

O controlo de picos consiste em aproximar o gráfico do consumo a uma linha horizontal. Ou seja, pretende-se uniformizar o consumo de energia de forma a evitar o sobre-dimensionamento de centrais de produção elétrica.

Atualmente, este é um dos principais desafios e onde os EES podem contribuir e fazer a diferença. De momento, os esforços centram-se no consumidor, no sentido de influenciar o mesmo a utilizar mais energia nas horas de menor procura. Isto é feito através de uma queda nos preços da energia durante estes mesmos períodos introduzidas por tarifas multi-horárias (horário cheio e horário de vazio, por exemplo). Apesar de estas medidas terem um efeito positivo no controlo dos picos de consumo, são também muito imprevisíveis e, por isso, de fiabilidade questionável quando tomadas em consideração na hora de projetar o dimensionamento e instalação de centrais elétricas.

Pelo contrário, com a possibilidade do armazenamento de energia, o consumo iria estabilizar em torno de um valor médio, reduzindo, drasticamente, os desperdícios. Assim, os ESS seriam carregados nas chamadas “horas de vazio” (horas de baixa utilização de energia) e, nas horas de pico, a energia armazenada seria fornecida à rede.

Para este efeito, pretendem-se equipamentos com as seguintes características: elevado número de ciclos de carga até ao fim da vida, capacidade de fornecer energia durante algumas horas, elevada eficiência e baixos valores de auto-descarga (perda de carga quando o sistema não se encontra em uso).

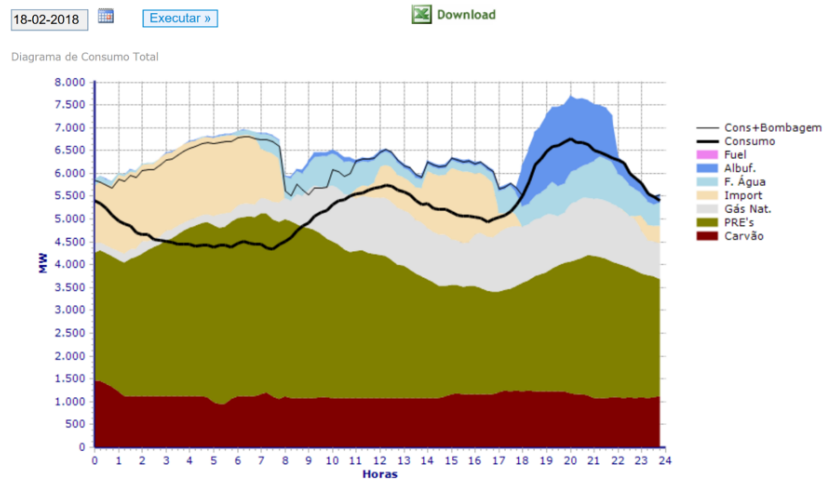
Na Fig. (2.1) pode observar-se, um gráfico do consumo elétrico num determinado dia em Portugal, uma situação onde a utilização de ESS para controlo de picos seria uma mais valia. É de notar que no dia 18 de Fevereiro a produção excedeu o consumo.

### 2.1.3. Gestão em larga escala

Nesta área abordam-se questões no âmbito do planeamento do fornecimento e produção de energia em grande escala. Trata-se por isso de gerir grandes quantidades de energia para abastecimento de uma grande área geográfica ou populacional. Decisões como a abertura ou encerramento de grandes centrais elétricas são o assunto principal.

Procuram-se, por isso, sistemas de armazenamento que funcionem como autênticos depósitos de energia, de proporção tal que possam substituir por completo um central elétrica durante longos períodos de tempo (dias), podendo assim desempenhar um papel





**Figura 2.1:** Diagrama de consumo elétrico em Portugal no dia 18 de Fevereiro de 2018 [Adaptado de <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/>]

importante na estratégia de planeamento da gestão de topo das entidades produtoras.

Quanto às características dos EES para estas aplicações, pretende-se: capacidade de armazenamento de grandes quantidades de energia (na ordem das centenas de MWh), elevadas potências, fornecimento contínuo ao longo de grandes períodos de tempo, com baixo custo por KWh armazenado e uma pegada ecológica significativamente baixa, já que se tratam de grandes infraestruturas.

Este tipo de unidades pode ser utilizado para reduzir a influência das flutuações do preço das matérias primas na fatura final do consumidor e da empresa produtora de energia, assim como para estabilizar flutuações sazonais no consumo programando o armazenamento de energia a longo prazo de acordo com previsões mensais e anuais.

Uma outra área de aplicação para estas grandes centrais de armazenamento de energia é o campo das apelidadas de “energias verdes” ou de fonte renovável. Com a possibilidade de armazenar grandes quantidades de energia, estes sistemas podem aliar-se a centrais eólicas ou fotovoltaicas catapultando estas tecnologias para níveis onde podem competir a par com, ou até ultrapassar, os combustíveis fósseis. Assim, eliminam-se os efeitos da imprevisibilidade no fornecimento das tecnologias renováveis e principalmente anulam-se os efeitos da sobrecarga de produção, aumentando consideravelmente o rendimento destas centrais.

De acordo com [IRENA](#) ([2015](#)), adicionar sistemas de armazenamento aumenta a contribuição de energias renováveis em 1 GWh por dia além de reduzir as emissões de

dióxido de carbono em 1423 toneladas por dia.

## 2.2. Atuais Sistemas de Armazenamento de Energia

Em primeiro lugar seria importante introduzir alguns conceitos que nos permitiram comparar estes sistemas de forma clara e objetiva. Admite-se, no entanto, que nem todas as características dos EES podem ser expressas sob a forma de índices concretos, já que algumas destas são intrínsecas a um determinado sistema e não se refletem noutros. Tratar-se-á, então, de abordar cada um deles com a ambiguidade que merecem. No final, quando se trata de decidir qual o sistema a utilizar, por mais fundamentada que se pretenda, e como nem todas as características dos ESS são mensuráveis, a escolha depende de muitos fatores que são, em boa parte, subjetivos.

### 2.2.1. Propriedades dos Sistemas de Armazenamento de Energia

São oito os conceitos a introduzir para efeitos de comparação entre sistemas ESS.

#### Capacidade

Define-se capacidade de armazenamento, como a quantidade de energia que um determinado equipamento consegue armazenar,  $E_{st}$ . O valor é tipicamente expresso em *KWh*.

#### Potência disponível

Entende-se por potência disponível, o valor de potência que um dado ESS é capaz de fornecer na fase de descarga. Em casos onde o fornecimento de energia não é constante, algo que engloba a grande maioria dos sistemas de armazenamento, o valor médio e valor de pico,  $P_{max}$ , são parâmetros importantes que devem ser considerados em conjunto numa fase de projeto.

#### Auto-Descarga

Como já foi referido anteriormente, auto-descarga é o valor de descarga de um sistema, num determinado intervalo de tempo, quando este não de encontra ativo. Normalmente é expresso em percentagem.

### **Eficiência**

A eficiência num ESS consiste na razão entre a energia útil fornecida na descarga e a energia armazenada,  $\eta = E_{ut}/E_{st}$ . Apesar de ser um conceito simples, há uma relativa ambiguidade no seu cálculo. Pois, a definição de potência útil pode ter várias interpretações, bem como a de potência armazenada levando assim a resultados diferentes no cálculo da eficiência do mesmo sistema. Para efeitos desta dissertação, consideram-se valores típicos e quanto possível consensuais na literatura atual.

### **Autonomia**

Autonomia é o parâmetro que expressa a quantidade de tempo que um sistema consegue permanecer ativo no fornecimento de energia durante a fase de descarga.

### **Durabilidade**

A durabilidade é definida como o número de ciclos de carga-descarga que um ESS pode realizar até ao fim da sua vida útil.

### **Potência específica**

A potência específica ( $p$ ) expressa a potência disponível em função da massa do sistema de armazenamento ( $m$ ),

$$p = P_{max}/m \quad (2.1)$$

### **Energia específica**

Da mesma maneira, a energia específica ( $e$ ) será a capacidade de armazenamento em função da massa do sistema,

$$e = E_{st}/m \quad (2.2)$$

## **2.2.2. Tipos de ESS**

Existem, essencialmente, quatro grandes classes que englobam os principais ESS e distinguem-se pelo tipo de energia armazenada, ou seja, sob a forma de: energia mecânica, térmica, química, eletroquímica e elétrica.

Apesar do aparente domínio no mercado das baterias eletroquímicas, a grande maioria da energia armazenada no planeta encontra-se sob a forma potencial mecânica. Por exemplo, as principais tecnologias de ESS são as de bombagem hidráulica e reservas de ar comprimido. No primeiro caso recorre-se a uma bomba hidráulica para fazer subir a água até um depósito que se encontra a uma cota superior. Quando a rede necessita, aproveita-se a queda de água para gerar eletricidade por ação do movimento de turbinas. As bombas são normalmente integradas numa central hidroelétrica com a única função de armazenamento de energia, ou podem ser usadas bombas que funcionam também como turbinas na fase de descarga. Esta última opção, apesar de mais económica, aquando da aquisição dos equipamentos, reduz a eficiência total do ciclo. Os sistemas PHS (*Pump Hydro Storage*) dominam o mercado mundial em ESS associados ao controlo e gestão da rede elétrica principalmente em grande escala. De facto, em 2011, os sistemas de bombagem hidráulica representavam 99% da energia armazenada no planeta (Dunn *et al.*, 2017).

Em segundo lugar nos principais ESS encontra-se o armazenamento de energia em ar comprimido, CAES (*Compressed Air Energy Storage*). O ar pode ser armazenado em depósitos à superfície, SSCAES (*Small-Scale Compressed Air Energy Storage*) ou em cavidades subterrâneas. Quanto à tecnologia SSCAES, encontra-se ainda num estado de desenvolvimento e investigação com valores ainda baixos de eficiência, em cerca de 50% (Ibrahim *et al.* (2008)). No caso do armazenamento em cavidades subterrâneas, a tecnologia está já mais madura existindo pelo menos três centrais instaladas no mundo: em 1978, a primeira é construída em Huntorf, na Alemanha, com 290 MW de potência disponível; depois em 1991 na cidade de McIntoch, no estado de Alabama (EUA), com uma potência de 110 MW e capacidade para 26 h de fornecimento; e mais recentemente em 2012, foi construída uma em Gaines, no Texas (EUA), de 2 MW de potência. Tipicamente as cavidades são minadas por recurso a soluções que dissolvem domos de sal de grande dimensão. Estão também em desenvolvimento alguns projetos que procuram utilizar aquíferos naturais para o armazenamento do ar comprimido. Este ar pode depois ser utilizado para diminuir a quantidade de combustível necessário na produção em centrais termoelétricas (cerca de três vezes menos) ou, de forma mais direta, para acionar turbinas.

Tanto os sistemas CAES como os PHS têm como principal utilidade a gestão em

larga escala e são também muitas vezes utilizados para controlo de picos de consumo. Outra tecnologia interessante nesta área é o armazenamento de energia sob forma de energia térmica sensível, ou latente, sendo que a primeira já se encontra bem desenvolvida e com mais do que uma instalação atualmente funcional. A *Solana Generation Station* nos Estados Unidos, é capaz de armazenar 6 horas de energia térmica proveniente da concentração de raios solares de múltiplas parabólicas concebidas para o efeito. A energia é, então, utilizada para a produção de vapor que, por sua vez, gera corrente elétrica ao acionar um conjunto de turbinas. Quando a produção excede o consumo, o excedente é utilizado para derreter depósitos de sal. O sal líquido é depois bombeado para uma caldeira de vapor convencional por forma a produzir eletricidade. A *Gemasolar Thermosolar*, instalada em Espanha, é outro exemplo do uso desta tecnologia no armazenamento de energia térmica, TES (*Thermal Energy Storage*).

Na Tabela 2.1 seguinte encontram-se resumidas as principais características destes três ESS.

Tipos de ESS	Auto - Descarga	Eficiência do ciclo	Autonomia	Durabilidade	Potência Específica [W/kg]	Energia Específica [Wh/kg]	Custo [\$/kWh]
PHS	muito baixa	70 a 87%	1 a 24 h+	10000 a 3000 ciclos	-	0.5 a 1.5	5 a 100
CAES	baixa	40 a 70%	1 a 24 h+	8000 a 12000 ciclos	-	30 a 60	2 a 120
TES	0,01 a 1 %/dia	30 a 60%	1 a 24 h+	30 anos	10 a 30	80 a 250	3 a 60

**Tabela 2.1:** Principais características dos sistemas: PHS, CAES e TES.

No que diz respeito a aplicações voltadas mais para a gestão de picos de consumo em escalas menos significativas, as baterias eletroquímicas são uma boa solução. Nesta área existem diversas soluções que diferem essencialmente do elemento químico envolvido no processo, desde chumbo, sódio-enxofre, níquel, lítio, entre outras. Um ESS com este tipo de baterias consiste num conjunto de ligações em paralelo e/ou em série entre células eletroquímicas de forma a se obter a potência necessária. Cada célula é constituída por dois elétrodos (um cátodo e um ânodo) que interagem entre si por meio de um eletrólito fornecendo ou armazenando energia conforme a necessidade. Esta troca pode acontecer em fase sólida (baterias convencionais) ou em fase líquida (baterias de fluxo). A vantagem das baterias de fluxo é a facilidade no armazenamento dos elétrodos em tanques de líquidos. Assim, é possível obter células de potência bem mais elevada do que as baterias de estado sólido, resultando, no entanto, em eficiências inferiores.

As baterias eletroquímicas têm sido o principal foco de desenvolvimento e pesquisa dos ESS, no sentido de diminuir a auto-descarga, melhorar a eficiência, mas, sobretudo, de aumentar a durabilidade e o custo das mesmas. Outros problemas destas tecnologias é a redução significativa da durabilidade quando a descarga ou carga é feita na totalidade ou próximo deste valor, e o impacto ambiental provocado pelos resíduos químicos quando as baterias não são devidamente recicladas. Em contrapartida, as baterias eletroquímicas apresentam a vantagem de serem portáteis, terem valores bastante bons de energia específica, de serem versáteis a praticamente qualquer tipo de aplicação e de não estarem dependentes de fatores geológico-geográficos. As baterias têm também um vasto domínio de aplicabilidade em sistemas UPS.

Uma outra tecnologia semelhante quanto aos domínios de aplicação são as células de combustível de hidrogénio. Estas utilizam hidrogénio e oxigénio para a produção de energia elétrica por meio de uma reação química da qual resulta a formação de água. À partida, este processo possui vantagens óbvias, não só o produto da reação é um não-poluente facilmente processável, como um dos combustíveis encontra-se na atmosfera, fator que aumenta significativamente a energia específica do sistema.

Para já esta tecnologia não se apresentam como um ESS muito competitivo uma vez que a eficiência, não só do processo de produção de eletricidade, mas também do processo de obtenção e armazenamento de hidrogénio (tipicamente eletrólise) é relativamente baixa, resultando numa eficiência combinada inferior a 50% (Ibrahim *et al.*, 2008).

Para finalizar a lista dos principais sistemas de armazenamento de energia, resta falar dos supercondensados e das *Flywheels*. Ambos têm como características principais a elevada fiabilidade, rapidez de resposta e baixa autonomia, tornando-os indicados para aplicações UPS.

Os supercondensadores armazenam energia elétrica pelo princípio de um condensador. Num condensador, dois materiais condutores são carregados com cargas elétricas opostas (elétrodos) e separados por um não condutor (dielétrico). A capacidade de um condensador é proporcional à área da superfície dos elétrodos e inversamente proporcional à distancia que os separa. Os condensadores conseguem assim fornecer grandes potências na descarga em curtos períodos de tempo (tipicamente segundos). Por outro lado, os supercondensadores são construídos de forma a aumentar a autonomia e

a energia específica sacrificando a potência fornecida, tornando-se, assim, ideais para aplicações UPS e evoluindo cada vez mais no sentido de integrarem a área de controlo de picos de consumo. Em vez de um dielétrico, os supercondensadores utilizam um eletrólito no espaço que separa os elétrodos.

Quanto às *Flywheels*, o armazenamento é feito sob a forma de energia cinética. O conceito consiste em fazer girar uma peça que assenta em rolamentos de levitação magnética (combinados ou não com rolamentos convencionais) e que se encontra enclausurada em vácuo de forma a reduzir ao máximo as perdas por atrito. A peça, de forma cilíndrica, é acelerada na fase de carga por um motor/gerador, num procedimento muito semelhante ao de um motor elétrico, e na fase de descarga, restitui a energia armazenada ao gerador resultando no abrandamento da mesma. Este conceito existe há mais de 100 anos, quando se procurava suavizar o funcionamento de máquinas acoplando-lhes um objeto rotativo de elevada inércia. Inicialmente, o desenvolvimento desta tecnologia centrava-se no aumento da massa do órgão rotativo de maneira a aumentar a capacidade de armazenamento de energia do sistema. Recentemente, devido ao aparecimento dos rolamentos magnéticos e do desenvolvimento dos materiais compósitos, a investigação orienta-se na direção do aumento da velocidade máxima da roda e redução do peso de todo o equipamento. Estes princípios baseiam-se no facto da energia cinética aumentar com o quadrado da velocidade e apenas linearmente com o aumento da massa.

A grande desvantagem deste ESS é o seu elevado valor de auto-descarga, facto que reduz drasticamente a eficiência global do equipamento para períodos não curtos entre o fim da carga e o início da descarga. No entanto, é uma tecnologia bastante competitiva em unidades UPS e aplicações de melhoramento da qualidade da rede elétrica já que apresenta parâmetros elevados de energia e potência específica.

A Tabela [2.2](#) resume as principais especificações dos últimos ESS mencionados, que têm como característica comum a portabilidade e a possibilidade de poderem ser instalados em qualquer central elétrica sendo independentes de quaisquer fatores geológico-geográficos.

A Fig. [2.2](#) enquadra os tipos de ESS nas suas áreas de aplicação, tempos de descarga e potência disponível.

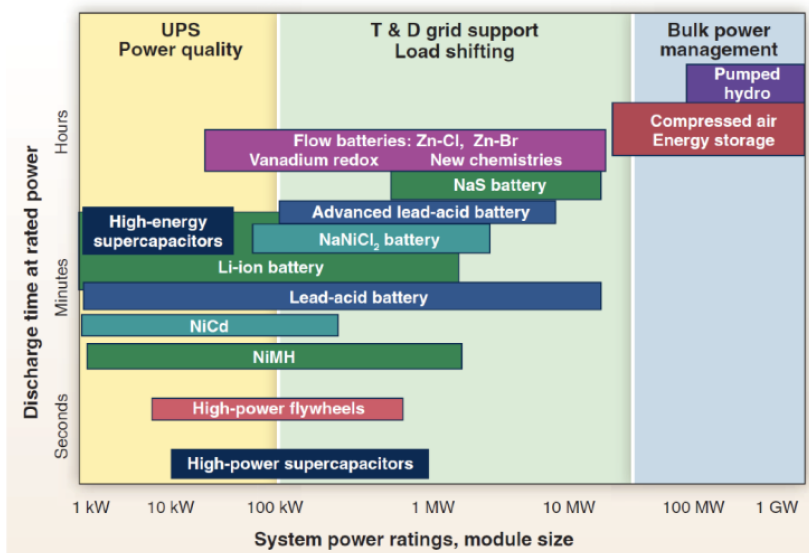


Figura 2.2: Resumo dos tipos de ESS e respetivas características (Dunn *et al.*, 2017)

Tipo de ESS	Auto-Descarga	Eficiência do ciclo	Autonomia	Durabilidade (ciclos)	Potência Especifica [W/kg]	Energia Especifica [W/kg]	Custo[\$/kWh]
Baterias eletroquímicas	0.05 a 5%/dia	60 a 95%	segundos a 24h+	500 a 20000	45 a 2000	10 a 240	50 a 3800
Fuel cell de hidrogénio	praticamente nula	20 a 50%	segundos a 24h+	20000+	5 a 800	150 a 10000	2 a 15
Super-condensadores	5 a 40%/dia	85 a 97%	milisegundos a 1h	100000+	500 a 10000	0.05 a 15	300 a 2000
Flywheels	>20%/h	90 a 95%	15s a 15min	21000+	400 a 1500	5 a 100	1000 a 14000

Tabela 2.2: Principais características dos sistemas: Baterias eletroquímicas, Fuel cell de hidrogénio, Supercondutores, Flywheels.



### 3 Estudos Numéricos e Projeto da Instalação

Neste capítulo pretende-se avaliar a geometria mais adequada para a bateria MAD. Para tal, recorreu-se a testes numéricos que permitem testar diversas configurações num espaço de tempo muito inferior ao que seria de esperar em ensaios experimentais. Sem a ferramenta computacional seriam construídos uma série de modelos e executados ensaios em todos eles, algo impraticável dado o tempo disponível para um trabalho desta natureza. Nesse sentido, o software *EMS*, fornecido pela empresa EMWorks, possibilitou a análise de algumas das configurações idealizadas.

O primeiro passo consiste em aprofundar o próprio conceito em estudo. O funcionamento da bateria é semelhante ao de uma mola. A energia despendida na fase de carga, terá como propósito aproximar pólos opostos de ímanes permanentes, contrariando o potencial magnético. O mecanismo será, então, bloqueado mantendo os pólos tão próximos quanto possível. Para recuperar a energia armazenada, retiram-se os travamentos, forçando o mecanismo a retornar à posição inicial. A energia cinética deste movimento será depois convertida em energia elétrica.

Este comportamento é em tudo idêntico ao que seria de esperar ao comprimir uma mola e, posteriormente, observar a sua extensão até o comprimento original. De facto, também neste caso, a energia (potencial elástica) pode ser armazenada e em seguida restituída. A grande diferença destes dois exemplos é o facto da interação magnética dar-se à distância e sem desgaste dos materiais em causa. Teoricamente, a bateria MAD pode ser carregada e descarregada infinitamente sem comprometer a capacidade do sistema ou a potência disponível.

A característica principal desta bateria é o facto de apresentar um valor de auto-descarga teoricamente nulo, algo que é muito raro, ou até inexistente, nos sistemas atualmente disponíveis. No campo da gestão energética em larga escala este aspeto pode ser muito vantajoso, permitindo eliminar por completo uma importante fonte de prejuízos.

O desafio está em conceber um equipamento capaz de fazer uso destas forças de interação magnética de forma a constituir uma alternativa válida no mercado dos ESS.

Os estudos numéricos centraram-se em dois grupos de configurações possíveis, designadas por conveniência da seguinte forma: *mola espiral* e *mola linear*.

### 3.1. Mola espiral

Esta configuração é constituída por uma parte móvel interna (rotor) e por um estator cilíndrico oco, ambos construídos com um determinado arranjo de pequenos ímanes em forma de disco.

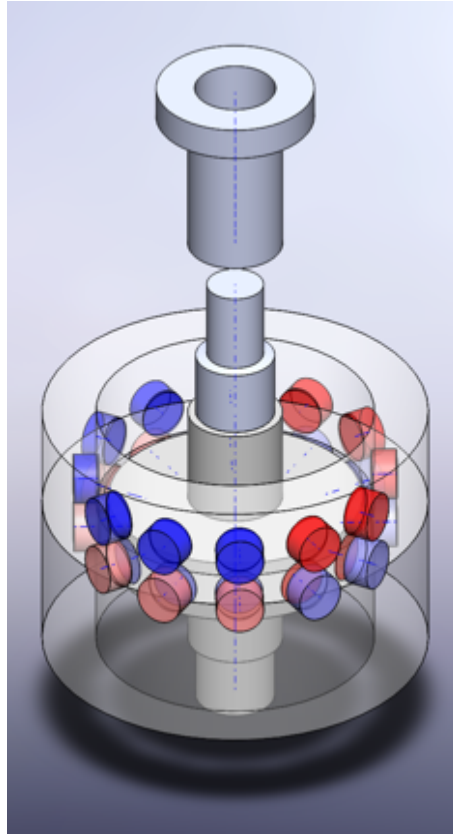
A ideia-base em girar o rotor durante a carga, e avançar num movimento de espiral, sempre contra o potencial magnético. Na descarga, os ímanes do estator forçariam o rotor a rodar no sentido descendente, retornando a energia armazenada. A ação do rotor assemelha-se ao aperto de um parafuso. Recorrendo a esta analogia poderíamos dizer que o rotor será “apertado” contra uma porca por acionamento de um motor na fase de carga da bateria. E na fase de descarga, o rotor é “desapertado” devido ao binário provocado pelo campo magnético do estator, ao mesmo tempo que transmite esse binário a um gerador para produção de energia elétrica.

O que se procura encontrar com o software EMS é um arranjo magnético do estator capaz de forçar sempre o rotor a girar na mesma direção em todo o seu movimento de descida (e, conseqüentemente de subida também). O binário resultante no rotor deve sempre ser positivo ou sempre negativo, a fim de garantir que, durante a descarga, o rotor volte à posição inicial.

O estator é composto por dois anéis concêntricos, cada um com seis ímanes permanentes de pólo norte magnético e seis sul, Fig. 3.1. O rotor também terá doze ímanes com exatamente o arranjo oposto do anel estator inferior, de modo que a posição inicial no carregamento seja a mais estável e a posição final, bateria completamente carregada, o mais instável (estado de energia potencial máxima).

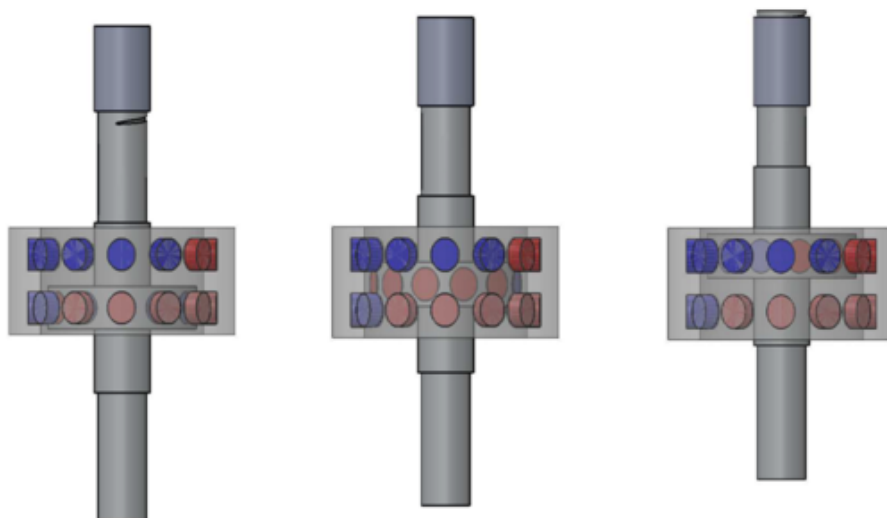
O passo da rosca é projetado de modo a que os ímanes no rotor passem do nível do anel inferior do estator para o nível do anel superior após uma rotação completa, Fig. 3.2.

O estudo numérico terá como objetivo avaliar o binário resultante no rotor para diferentes tipos de arranjos magnéticos no estator. Para tal, o anel superior do rotor



**Figura 3.1:** Moda espiral. Modelo final em *solidworks*

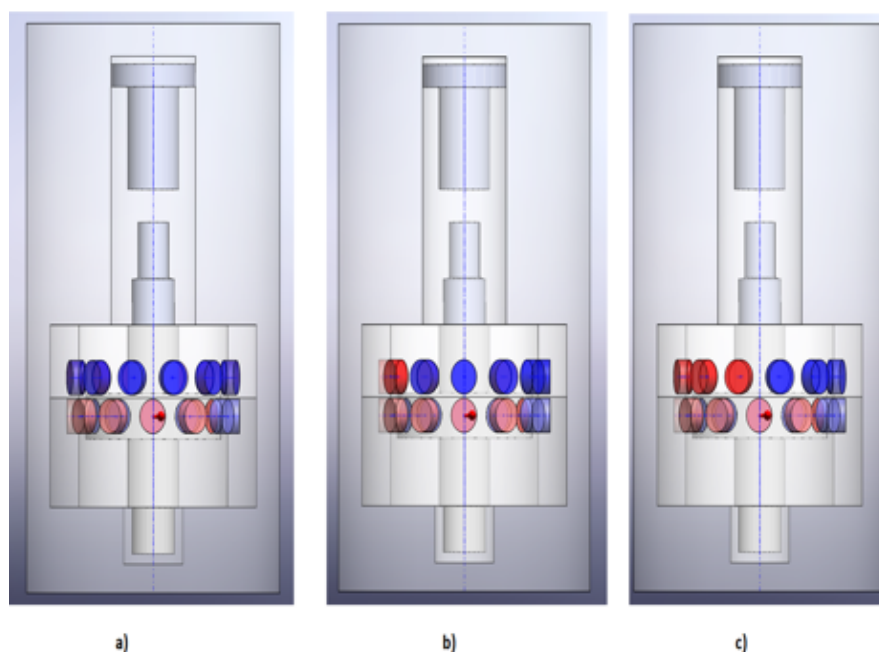
será rodado  $45^\circ$  em cada estudo perfazendo um total de oito análises magneto-estáticas, Fig. 3.3.



**Figura 3.2:** Mola espiral. Esquema representativo do movimento de carga.

De maneira a simular diferentes posições do rotor durante o movimento de carga, o estudo paramétrico incide sobre a posição do rotor na espiral ascendente a cada  $5^\circ$  começando em  $0^\circ$  (rotor alinhado com o anel inferior do estator) e terminando a  $360^\circ$  (rotor alinhado com o anel superior do estator).

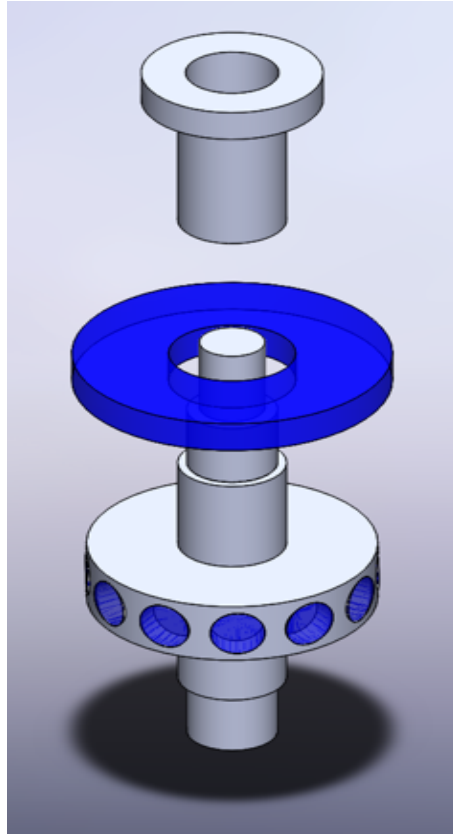
Foram também estudados outros modelos partindo do princípio da mola espiral mas que, por não terem resultado com conclusões significativas, não iram ser abordados nesta dissertação. Apenas a título de curiosidade, o modelo que se pode ver na Fig. 3.4 possui todos os ímanes norte no rotor e um íman maior fixo, em forma de anel, no topo.



**Figura 3.3:** Três arranjos magnéticos diferentes para o anel. Rotação de a)  $45^\circ$ , b)  $90^\circ$  e c)  $135^\circ$

### 3.2. Mola linear

Uma outra abordagem possível é partir de uma configuração mais simples. Desta vez, os sistemas realizam um movimento linear, fazendo-se aproximar ímanes de pólos iguais tão perto quanto for possível. Libertar os ímanes nessa situação resulta na restituição da energia utilizada para os aproximar, produzindo um efeito semelhante a um retorno por mola. Este conceito, que se convencionou chamar de mola linear, apesar de mais simples, têm algumas desvantagens face ao de mola espiral anteriormente



**Figura 3.4:** Modelo com um íman em forma de anel no lugar do estator.

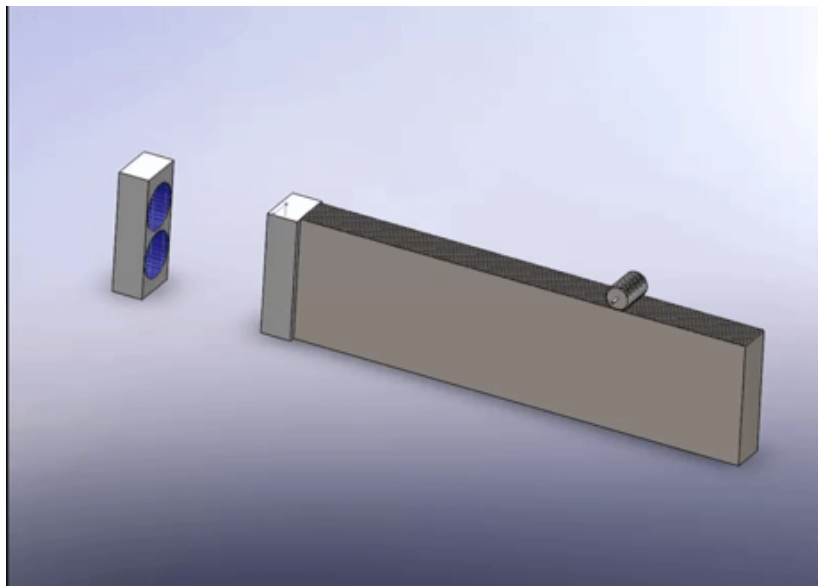
exposto. Um sistema linear é, em teoria, menos compacto do que um sistema em espiral e, para se conectar a um gerador, precisa de um mecanismo que converta o movimento em rotação. Tendo também em conta que as forças partilhadas entre ímanes permanentes só são significativas quando a distância entre eles é reduzida, terá que se ultrapassar essa dificuldade se se pretender armazenar grandes quantidades de energia.

Para a abordagem linear foram propostos duas geometrias diferentes para o modelo. A primeira, IRS (interação repulsiva simples), é constituída por duas peças - os volantes - preenchidos com ímanes de pólos norte voltados para o exterior. Um dos volantes é fixo, enquanto o outro pode deslocar-se solidário com um mecanismo pinhão-cremalheira, mecanismo este que simula um sistema de conversão de movimento linear em rotação, Fig. [3.5](#). O segundo, IAR (interação atrativa-repulsiva), possui 3 volantes, um móvel e dois fixos. No movimento de carga da bateria o volante móvel é forçado a afastar-se de uma interação entre pólos opostos e, ao mesmo tempo, em direção a uma interação entre pólos iguais, uma vez mais contra o potencial magnético, Fig. [3.6](#).

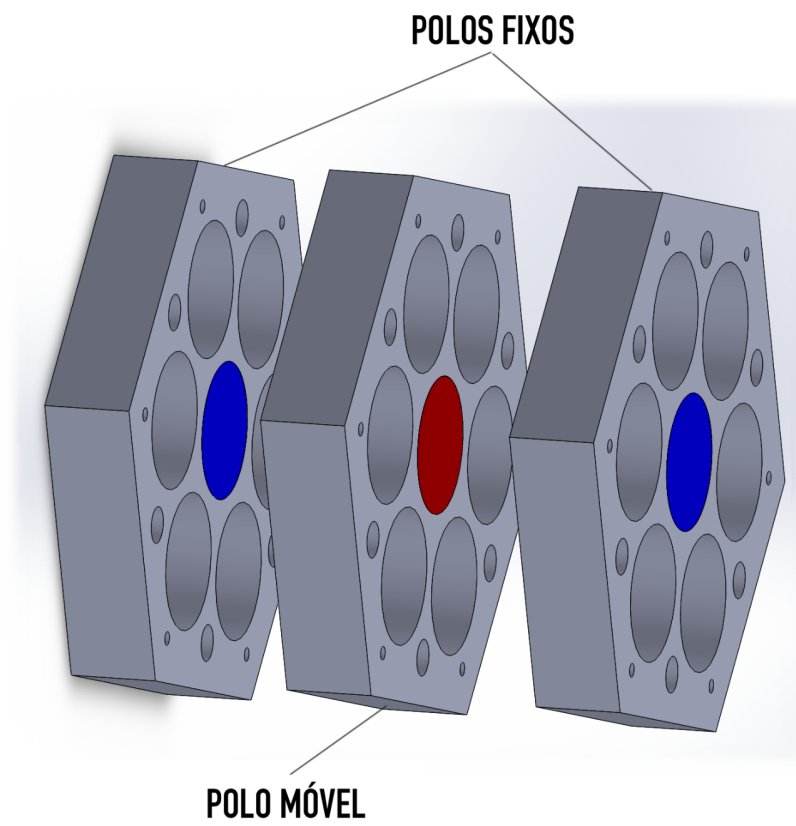
Também neste caso recorreu-se a estudos magnetostáticos com parametrização. O

parâmetro escolhido foi a distância entre o volante móvel e um fixo.

Em ambos os casos apenas interessa saber a forma da curva Força-Deslocamento. A magnitude da força servirá apenas a título comparativo uma vez que, até este ponto, o tipo de ímanes a utilizar na construção do modelo não foi ainda selecionado. Os estudos numéricos serão usados para confrontar alternativas e decidir qual a mais adequada.



**Figura 3.5:** Configuração IRS



**Figura 3.6:** Configuração IAR.

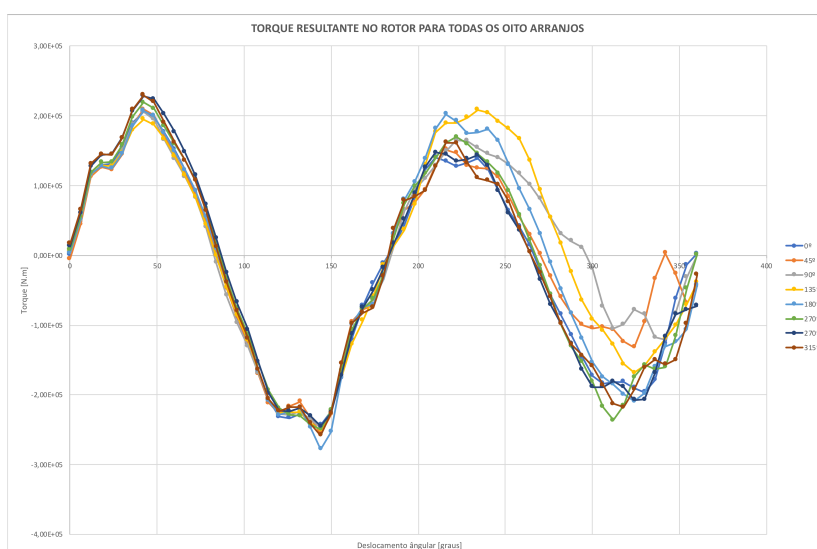
### 3.3. Resultados Numéricos

Com o objetivo de obter as forças e binários resultantes, o uso da ferramenta *Virtual Work* foi fundamental. A lista dos materiais utilizados, bem como das suas propriedades pode ser consultada na Tabela. [3.1](#)

Material	Condutividade [Mho/m]	Permeabilidade relativa	Coercitividade [A/m]	Remanência
Nylon	0	1	-	-
N42	$1.1e^6$	2000	-	-
Ar	0	1	900000	1.3

**Tabela 3.1:** Propriedades dos materiais selecionados

Os resultados do conceito “mola espiral” mostraram que nenhuma das configurações estudadas serve os objetivos. De facto, em todas os arranjos verifica-se que o binário resultante no rotor muda de sinal durante o seu percurso de carga. Como resultado, a carga no gerador iria fazer o rotor parar numa posição intermédia (por volta dos  $80^\circ$ ,  $180^\circ$  ou  $270^\circ$  graus), obtendo assim apenas uma pequena restituição da energia dependida na carga da bateria, Fig. [3.7](#).

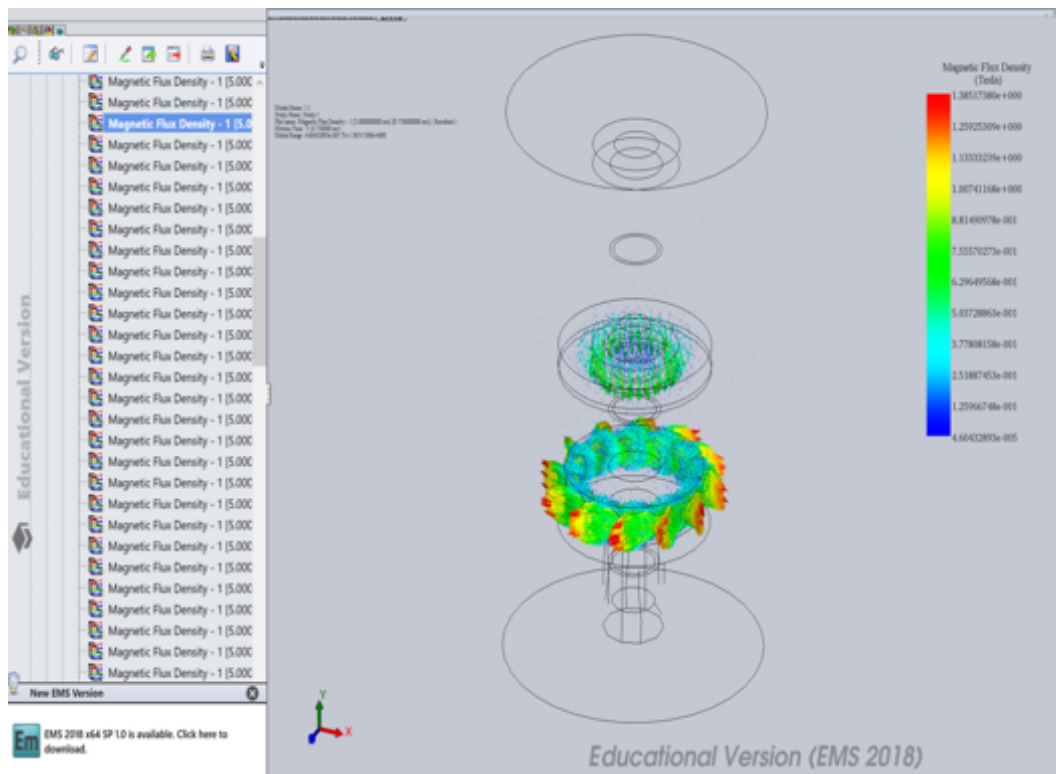


**Figura 3.7:** Resultados para a configuração mola espiral.

Na Fig. [3.8](#) pode ver-se o gráfico da densidade de fluxo magnético para o modelo da [3.4](#), modelo esse que também apresentou os mesmos resultados na mudança de sinal

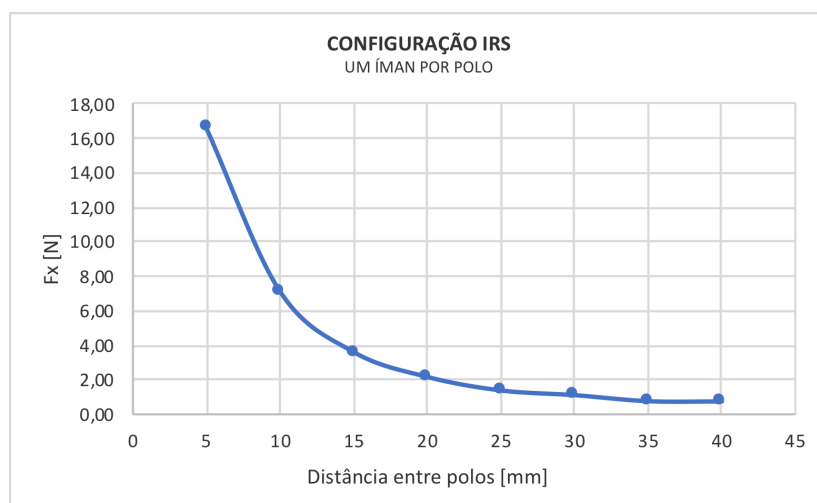


do binário resultante.



**Figura 3.8:** Densidade de fluxo magnético para a configuração ilustrada na Fig. 3.4. No presente passo é possível ver claramente a direção do binário resultante no rotor.

No caso do desenho “mola linear”, os resultados estão de acordo com o expectável, e úteis para comparar as formas das curvas e magnitude das forças obtidas entre os dois modelos propostos, Fig. 3.9 e Fig. 3.10.



**Figura 3.9:** Resultados para a configuração IRS

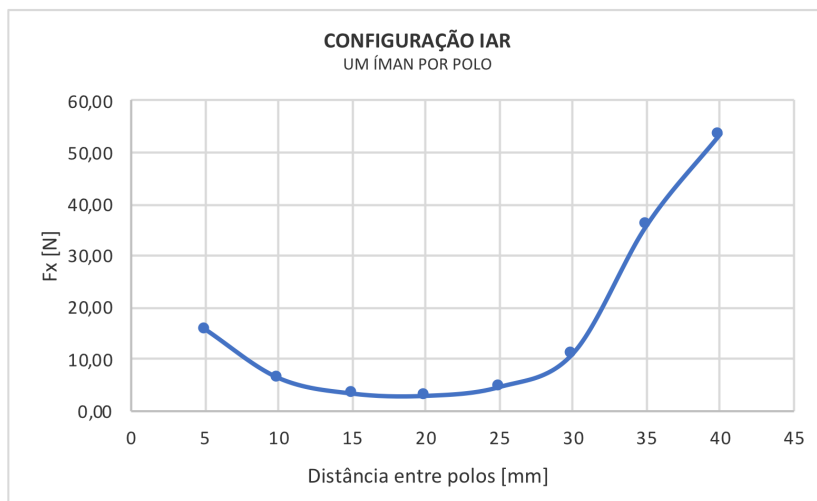


Figura 3.10: Resultados para a configuração IAR

### 3.4. Conclusão dos estudos numéricos

Os estudos numéricos foram úteis para definir algumas estratégias a considerar no projeto do modelo que se pretende construir. Foi possível eliminar um determinado número de configurações idealizadas à partida e verificar a validade de outras. Nesta fase pode elaborar-se um conjunto de premissas ao qual o modelo a construir deve obedecer por forma a ir de encontro das conclusões obtidas nos resultados numéricos:

- O modelo será constituído por uma peça móvel responsável por armazenar e transmitir a energia restituída, que realizará um movimento linear tanto na carga como na descarga.
- A peça móvel irá deslocar-se entre duas peças fixas, por sua vez, responsáveis por assegurar esse mesmo deslocamento por meio de forças de atração e repulsão magnética, tal como descrito na configuração IAR (capítulo 3.2). A vantagem da configuração IAR em relação à IRS é a obtenção de uma potência disponível mais uniforme ao longo de todo o curso de descarga.
- Uma vez que os estudos numérico apontam para uma força resultante da interação repulsiva inferior à da interação atrativa, o modelo será construído de maneira a estabelecer uma distância mínima superior entre a peça móvel e o pólo de atração, em vez da distância mínima entre a peça móvel e o pólo de repulsão.

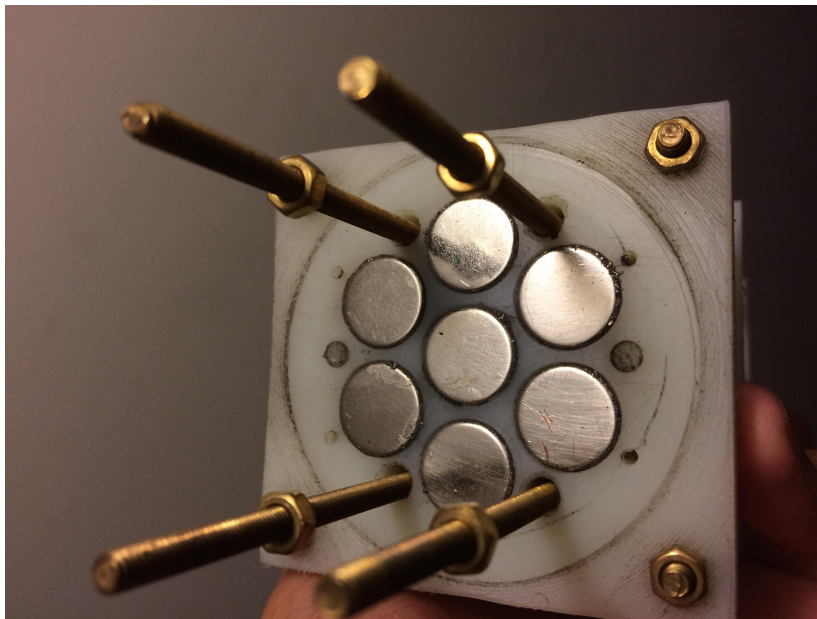
Por outras palavras, a peça móvel inicia a carga a uma determinada distância do pólo fixo atrativo (à direita na Fig. 3.6) que será superior à distância entre a peça móvel e o pólo fixo de repulsão no final do carregamento (à esquerda na Fig. 3.6). Desta maneira espera-se obter um comportamento da curva força-deslocamento equivalente ao do gráfico da Fig. 3.10 no intervalo entre 5 a 30 mm, resultando numa distribuição da potência disponível ainda mais uniforme ao longo de toda a descarga. Uma potência disponível pouco oscilante facilita a integração da bateria num sistema de produção de energia elétrica.

Após a construção do modelo seguir-se-ão testes experimentais para obtenção de uma nova curva força-deslocamento que se espera semelhante à encontrada nos estudos numéricos (Fig. 3.10).



## 4 Projeto e Construção do Modelo MAD

Seguindo o conceito IAR, o modelo MAD foi concebido como uma peça móvel que, durante a carga, se afasta de um pólo de atração magnética e aproxima-se de uma repulsão. Construída com um suporte em nylon preenchido com 7 ímanes permanentes de neodímio, N42, em banho de níquel, esta peça foi projetada para ser tanto compacta como para produzir um forte campo magnético, Fig. 4.1. Uma vez que inicialmente se pretendia testar várias configurações, optou-se por adquirir vários ímanes cilíndricos pequenos em vez de um que ocupasse a peça toda.



**Figura 4.1:** Fotografia de um dos volantes móveis

Entre a peça móvel existem duas peças de construção semelhante mas desta vez fixas Fig. 4.2. Os arranjos magnéticos são os mesmos que se podem ver na Fig. 3.6. As dimensões destes componentes pode ser consultada no Apêndice A.

De maneira a aumentar a potência disponível, a bateria irá conter o conceito IAR replicado em série. Assim, o modelo final será constituído por duas partes móveis ligadas entre si que se irão deslocar entre duas fixas, num total de três volantes fixos e



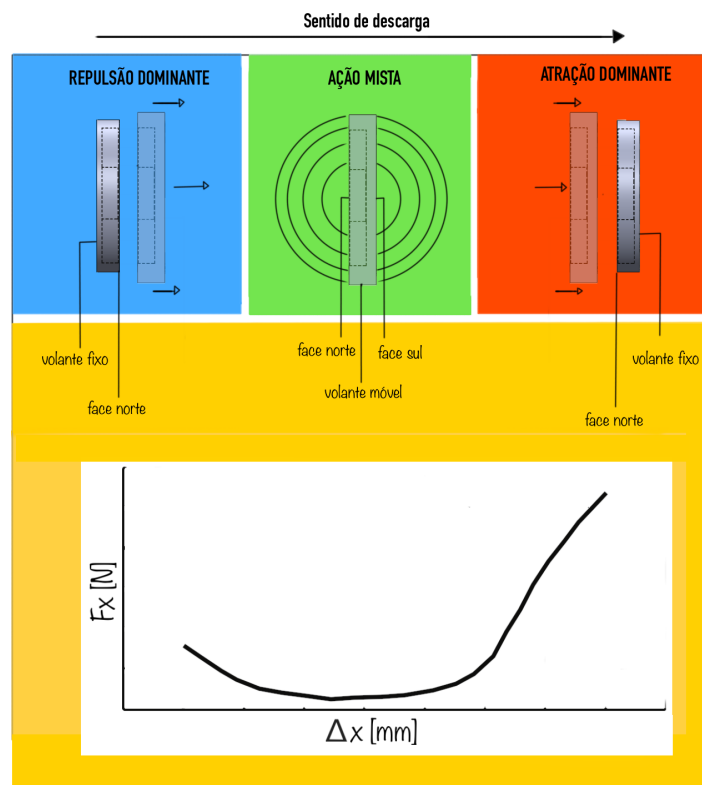
**Figura 4.2:** Fotografia de um dos volantes fixos

dois móveis. Os volantes móveis estão conectados entre si por meio de 4 veios roscados e, do mesmo modo, a uma última peça que irá comunicar o descolamento ao sistema de transmissão de potência, o pistão.

A utilização de veios roscados possibilita o ajuste das distâncias entre os conjuntos de ímanes, sendo então possível diminuir a espaço entre os volantes fixos, e aumentando, assim, a potência disponível. Conseqüentemente, um aumento de potência desta forma irá diminuir a distância percorrida pela peça móvel, resultando num curso total menor no pistão de saída. Como a distância à qual a interação entre ímanes deste tipo produz uma força relevante é da ordem das centenas de milímetros, aproximar demasiado os volantes resulta num curso muito pequeno do pistão de saída e, conseqüentemente, torna-se muito difícil construir um mecanismo de transmissão de potência para trabalhar nestas condições.

Outra consequência de aproximar os ímanes é a de alterar a forma da curva força-deslocamento ou seja, obter um fornecimento de energia menos oscilatório. Como se pode entender do estudo numérico, é de prever que a força resultante no pistão de saída atinja valores máximos quando o disco móvel se encontra na menor distância possível a um dos discos fixos. Na verdade observamos que junto do volante onde se dá a interação entre pólos magnéticos diferentes (atração), a força produzida é superior ao caso onde a interação é entre pólos iguais (repulsão). Deste modo pode-se depreender que a força

de atração magnética seja superior à de repulsão para o mesmo conjunto de ímãs. A potência de saída começará, então, com um determinado valor que diminuirá à medida que a peça móvel se afasta do pólo em repulsão. Quando esta atinge aproximadamente o meio do percurso então, a força de atração com o outro volante fixo começa a ter significado e a potência aumenta exponencialmente até atingir o seu valor máximo. Pode então concluir-se que, ao aproximar os volantes fixos, prevê-se que a potência tenda sempre a aumentar ao invés de apresentar um comportamento quase parabólico.

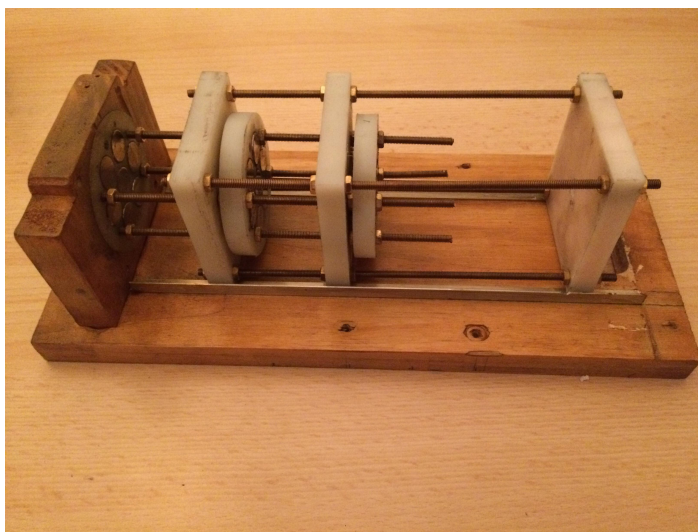


Por outro lado, afastar demasiado os ímãs pode conduzir a resultados indesejados. Apesar de aumentar o curso de saída do pistão, o que facilita a construção do sistema de conversão potência, à medida que a peça móvel se afasta do pólo de repulsão, a força pode diminuir para valores que impossibilitam o movimento do gerador e do mecanismo de conversão. No extremo, as forças sobre o disco móvel, a determinada altura do curso, podem equilibrar e este parar. Na prática admite-se que os ímãs do disco móvel deixam de “sentir” a presença dos fixos. O resultado é uma restituição muito deficiente da energia armazenada.

Deste modo, e de acordo com os resultados numéricos, escolheu-se definir uma distância entre partes fixas de aproximadamente 40 mm. Tendo em conta a espessura

do disco móvel (11 mm) e das porcas de fixação (6 mm), obtendo-se um curso total de 23 mm no pistão de saída.

Todo o mecanismo está assente numa base rígida de madeira e calhas de alumínio. À exceção dos veios roscados, elementos de fixação e calhas, todos os elementos constituintes do modelo foram obtidos por maquinação, em especial por recurso a máquinas CNC. Na Fig. 4.3 pode-se ver o resultado final após montagem de todos os constituintes.



**Figura 4.3:** Fotografia do orgão de armazenamento de energia do modelo M.A.D

### 4.1. Ensaios experimentais

Uma vez construído o núcleo da bateria, foram realizados diversos ensaios experimentais com o objetivo de saber a quantidade de energia armazenada. Para tal faz-se uso da Eq. (4.1) que expressa a energia na forma de trabalho em função da força e do deslocamento:

$$W = \int F dx \quad (4.1)$$

O objetivo será obter valores de força para intervalos discretos da distância entre um disco fixo e o disco móvel durante todo o período de descarga da bateria. Pretende-se obter um número de intervalos tão grande quanto possível mas que possam ser medidos de forma fiável, tendo em conta que se trata de valores da ordem dos milímetros.



Posteriormente, pretende-se aproximar uma função matemática aos resultados obtidos para que se possa realizar a integração exposta na Eq. (4.1).

A medição da força recorreu à adaptação de uma balança de medição de massa por peso gravítico que, além de conter quatro células de carga, possui um sistema de conversão dos sinais elétricos em valores de massa. O tratamento dos valores de massa nos desejados valores de força torna-se um processo trivial através da Lei de Newton ( $P = mg$ ), em que  $g$  corresponde ao valor da aceleração gravítica média na superfície Terrestre. A balança é, então, uma solução económica e adequada à precisão pretendida nos resultados.

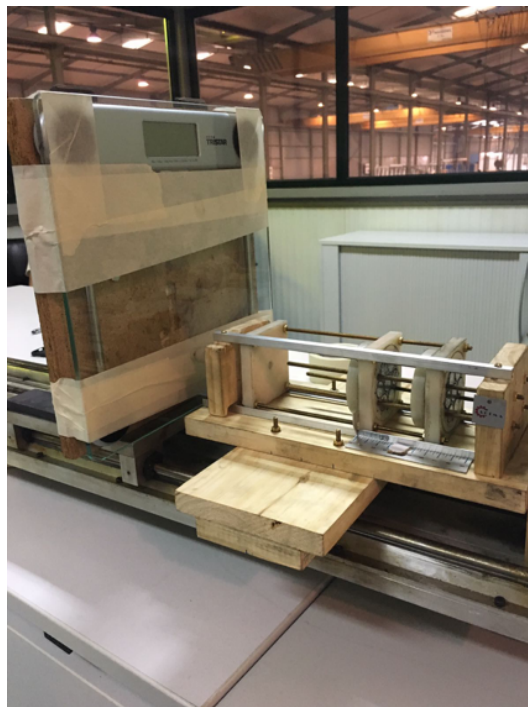
### 4.1.1. Instalação e Procedimento

A instalação consiste numa calha metálica cuja base permite regular a distância sobre a qual é fixo um suporte vertical para a balança de medição Fig. 4.4. A calha trabalha na horizontal e sobre esta assenta um suporte de madeira para o modelo da bateria em teste Fig. 4.5. O modelo tem assim todos os graus de liberdade restringidos durante o ensaio.



**Figura 4.4:** Calha de regulação e base móvel

A balança pode movimentar-se solidariamente com a base móvel mediante acionamento de um fuso por meio de uma manivela situada num dos extremos da calha. Após acionamento do fuso, a base fica bloqueada e, conseqüentemente, o mesmo acontece com a balança.



**Figura 4.5:** Modelo fixo à calha por meio de um suporte de madeira

De maneira a poder comunicar a força do pistão da bateria à balança, foi necessário construir um pino cilíndrico em nylon com 90 mm de comprimento e 20 mm de diâmetro. O procedimento para obtenção de dados segue a ordem ilustrada pela Figura [4.6](#) com os seguintes passos:

- PASSO 1: O fuso é acionado fazendo aproximar a balança do pino
- PASSO 2: A base da balança empurra o pino carregando a bateria, até ao valor de deslocamento no qual se pretende registar a força no pistão de saída. A posição é verificada por meio de um ponteiro, colado ao disco móvel, que desliza sobre uma régua.
- PASSO 3: O pino é afastado da balança.
- PASSO 4: A balança é tarada.

- PASSO 5: A bateria é descarregada lentamente trazendo o pino novamente ao contacto com a balança.
- PASSO 6: Os resultados são registados por leitura do mostrador digital.



**Figura 4.6:** Procedimento de obtenção dos dados experimentais.

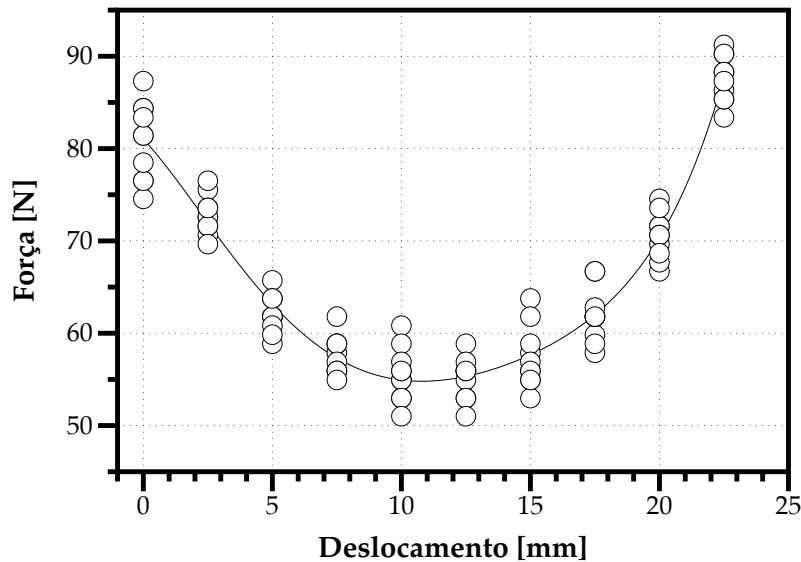
Foram efetuadas medições de 0 a 22.5 mm com um passo de 2.5 mm num total de 10 leituras por ensaio. 2.5 mm corresponde à menor divisão da escala da régua utilizada. Com o objetivo de obter resultados mais fiáveis realizou-se um total de 10 ensaios.

A incerteza nos resultados obtidos pode ter origem tanto na balança como no sistema de verificação do posicionamento (régua + ponteiro), no entanto o objetivo é apenas obter uma ideia da quantidade de energia armazenada, valores mínimos e máximos da força de saída e da forma da curva força-deslocamento. A precisão do sistema

de medida utilizado é mais do que suficiente para a aplicação pelo que o tratamento do erro de medição não produz uma mais valia significativa a este trabalho.

### 4.1.2. Resultados e Discussão

O aspeto essencial para caracterizar o funcionamento da bateria MAD consiste na relação entre a força e o deslocamento a partir do qual se determina o trabalho disponível para produção de energia elétrica. O gráfico da Fig. 4.7 mostra os resultados obtidos em diversos ensaios experimentais para a configuração descrita na secção anterior, bem como a curva que melhor descreve esses valores. Optou-se pela aproximação a um polinómio de 5º grau, com um coeficiente de correlação de Pearson,  $R^2$ , de 0.94238.



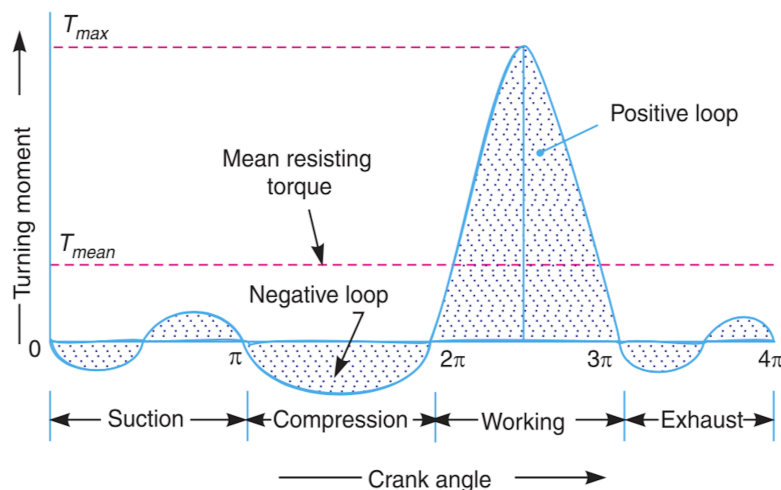
**Figura 4.7:** Relação entre a força e o deslocamento obtida com base na energia armazenada.

O polinómio que descreve a relação entre força ( $F$ ) e deslocamento ( $\Delta x$ ) é

$$F(x) = 81.025 - 3.0024\Delta x - 0.43119\Delta x^2 + 0.084136\Delta x^3 - 0.0045976\Delta x^4 + 8.8864 \times 10^{-5}\Delta x^5 \quad (4.2)$$

Para integrar este sistema numa rede de distribuição elétrica é importante que a potência fornecida na descarga da bateria seja o mais constante possível. De facto a rede elétrica é distribuída com uma frequência fixa (50 Hz em Portugal) pelo que flutuações na potência injetada implicam um tratamento prévio adicional.

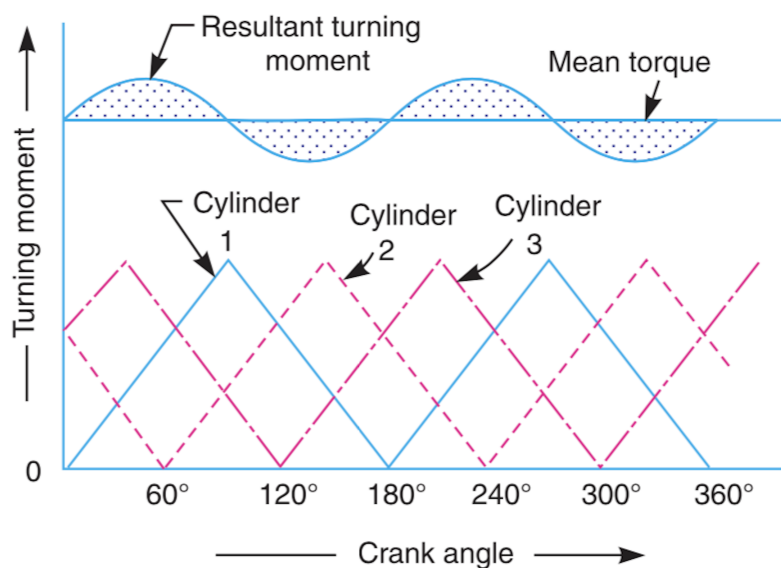
No entanto, olhando para as tecnologias utilizadas nas atuais centrais elétricas, encontramos em muitas delas o mesmo comportamento inconstante. Desde logo, as mais óbvias são as tecnologias renováveis mas também as máquinas térmicas possuem naturais oscilações na potência fornecida. Um motor de combustão mono-cilíndrico a quatro tempos, por exemplo, tem uma potência disponível superior na fase de explosão/combustão do que na fase de admissão de ar. Este exemplo é na verdade importante pois o seu funcionamento pode ser descrito por um gráfico binário-deslocamento angular, equivalente ao gráfico da Fig. 4.8, que se assemelha na forma com o obtido para o modelo da bateria em estudo. Cada fase do ciclo de combustão apresenta uma forma quase parabólica que pode facilmente ser descrita por uma função polinomial de grau superior a um. A fase de compressão, por exemplo, produz um gráfico binário-deslocamento semelhante ao representado na 4.7.



**Figura 4.8:** Diagrama do binário produzido por um motor mono-cilíndrico em todas as etapas de funcionamento (Khurmi & Gupta, 2008).

Assim sendo, as soluções utilizadas nos motores de combustão podem ser relevantes para o caso em estudo. O primeiro artifício para reduzir a amplitude das flutuações é a aplicação de múltiplos cilindros em fase. O gráfico da Fig. 4.8 torna-se no da Fig. 4.9.

Outra solução é recorrer a rodas de inércia. Neste caso, as flutuações são amortecidas em torno de um valor de potência médio pelo aumento da inércia do conjunto de transmissão de potência. Geralmente são utilizados discos furados maciços por apresentarem um momento de inercia elevado. Estes dispositivos aparecem também em



**Figura 4.9:** Diagrama do binário produzido por um motor multi-cilíndrico (Khurmi & Gupta, 2008).

algumas máquinas de costura e prensas mecânicas com funções semelhantes.

Na possibilidade de construir um modelo MAD de grandes dimensões é plausível imaginar um tempo de descarga longo que produz por si só o efeito de amortecimento desejado. De facto, se considerarmos um tempo de descarga tal que resultasse numa velocidade do pistão de saída de 1 mm por hora, logo se conclui que as flutuações de potência seriam de mais fácil tratamento. Uma analogia que ajuda a entender esta linha de pensamento é o funcionamento de algumas turbinas em centrais hidroelétricas. Por vezes há necessidade de trabalhar com valores de caudal fora do nominal, logo, certas turbinas são equipadas com pás de ângulo variável para poder manter um alto rendimento dentro de uma gama variada de caudais. No entanto, as flutuações de alta frequência no caudal de entrada tornariam este processo impraticável. Deste modo é possível conceber um sistema de conversão de potência que facilmente se adaptasse a variações de potência graduais, mantendo, assim, a mesma frequência na rede elétrica.

Com isto pretende-se mostrar que o tratamento de equipamentos de potência não constante é possível e que existem varias soluções. No entanto, este trabalho não inclui a construção e integração de um sistema deste tipo no modelo em estudo. O conceito MAD surge aqui como um primeiro passo para um sistema de armazenamento de energia mecânico fazendo o aproveitamento das forças de interação entre ímanes

permanentes. A prova de conceito é, então, o objetivo central desta dissertação.

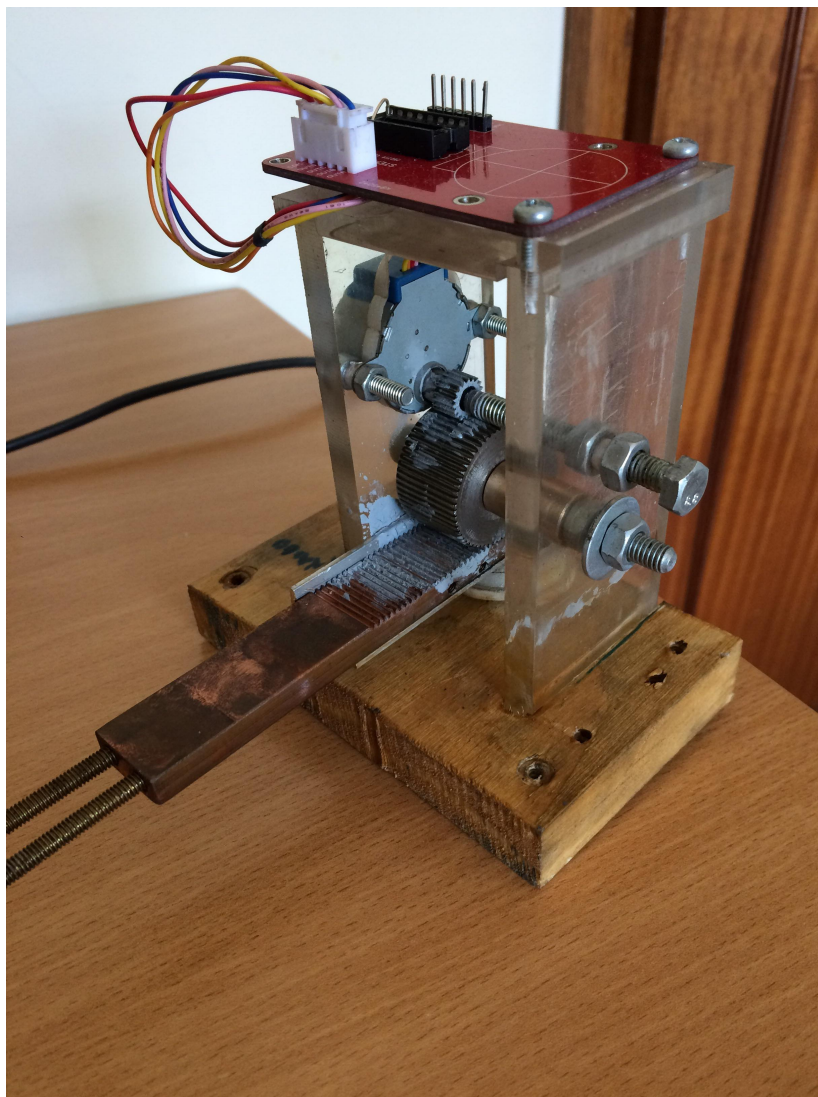
Podemos partir para a integração da função de aproximação obtida de maneira a encontrar o valor da energia armazenada neste modelo. Para um curso do pistão de saída de 22.5 mm, obtém-se o resultado de 1.4 J para a energia armazenada na bateria construída. A força no início da descarga da bateria será o valor para o qual a função intersecta o eixo das ordenadas, 81.025 N. Os valores máximos e mínimos de força obtidos no curso disponível são de 87.663 N para o deslocamento de  $\Delta x = 22.5 \text{ mm}$  54.799 N para um deslocamento de  $\Delta x = 10,8 \text{ mm}$ , respetivamente.

### 4.1.3. Sistema de Transmissão e Gerador

Para transformar a energia cinética fornecida na descarga da bateria em energia elétrica será necessário acionar um gerador. Os geradores funcionam de maneira inversa aos motores elétricos, ao transmitir binário ao veio de entrada um conjunto de ímanes permanentes e enrolamentos de fios no seu interior produz uma corrente elétrica na saída. Deste modo pode-se esperar obter corrente nos terminais de um motor elétrico se a este se comunicar um binário no veio. Assim, escolheu-se utilizar um motor elétrico, com o veio conectado aos elementos de transmissão de potência, em vez de um gerador, uma vez que existe uma maior variedade de soluções de motores para gamas de baixa potência. De facto, interpretando os resultados obtidos, pode concluir-se que para um tempo de descarga de um segundo a potência fornecida seria de 1.4 W, um número que está ainda longe do que se espera para um ESS competitivo. Se ao invés disso se projetar o sistema de transmissão de potência para aumentar o tempo de descarga da bateria é de esperar, pela própria definição de potência, que esta diminua na proporção do aumento do tempo de descarga. No entanto, apesar de se pretender apenas chegar à prova de conceito, um segundo é um intervalo de tempo muito pequeno para que se possa fazer uma demonstração do funcionamento do modelo. Um bom compromisso entre estes dois fatores seria um tempo de descarga entre cinco e dez segundos que resulta numa potência fornecida de entre aproximadamente 0.14 e 0.28 W. É possível, ainda assim, ligar um conjunto de LEDs para demonstração.

De maneira a transmitir um binário ao veio do gerador (motor invertido), é necessário converter o movimento linear do pistão em movimento de rotação. A estratégia utilizada recorre a um conjunto de engrenagens começando por uma cremalheira fixa

ao pistão, seguindo-se uma roda dentada que engrena nos dentes da cremalheira, terminando numa roda mais pequena, solidária ao veio do gerador que, por sua vez, recebe a potência comunicada pela roda maior. A cremalheira foi construída em bronze e as rodas dentadas em aço macio para maquinagem. A Fig. 4.10 mostra os elementos descritos, bem como o conjunto após montagem.



**Figura 4.10:** Fotografia do sistema de transmissão de potência.

O módulo de ferramenta utilizado para abertura de dentado foi de  $M = 0.5$  com o objetivo de obter o maior número de dentes possível em apenas 22.5 mm (curso do pistão na descarga), sem comprometer demasiado a resistência do dente. A primeira roda dentada foi projetada com uma espessura igual à largura da cremalheira. Deste modo, não só se minimiza a pressão de contacto sobre o dente como se consegue uma roda maior e conseqüentemente mais pesada. A massa desta vai contribuir para o

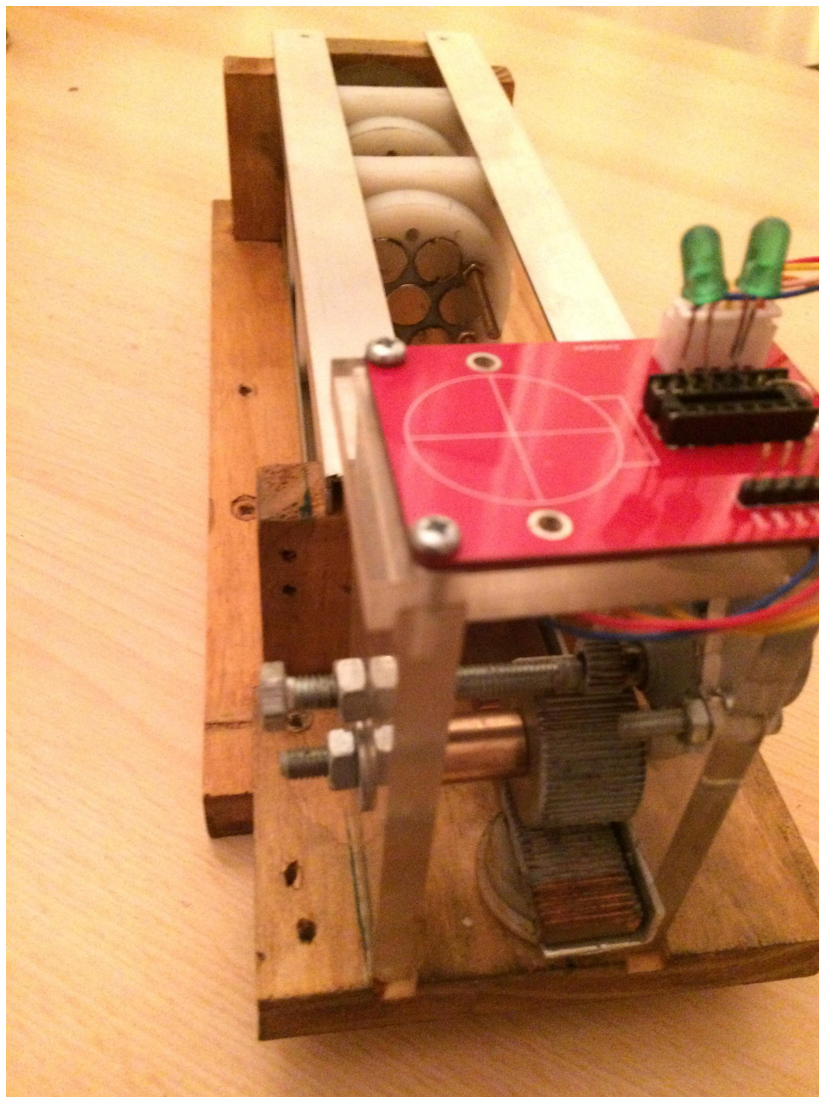


aumento da inércia do sistema possibilitando um tempo de descarga mais longo, funcionando como *Flywheel*. As dimensões de todos os elementos do conjunto transmissor de potencia encontram-se no Apêndice A.

Finalmente, o motor escolhido para funcionar como gerador foi um motor a passo de 5V cujas especificações se podem ler no Apêndice B. A vantagem de um motor a passo é a de funcionar por impulsos elétricos. Cada impulso fornecido resulta numa deslocação angular que corresponde a uma fração de uma volta completa do veio ( $5.625^\circ/64$  no caso em estudo). Assim, qualquer uma pequena rotação nas engrenagens resulta num determinado número de impulsos elétricos que se manifesta no aparecimento de brilho nos LEDs. É apenas necessário garantir que a força transmitida no pistão é capaz de produzir binário suficiente para movimentar o motor.

Num motor a passo, o binário necessário para mover um motor à mão, com as bobinas não energizadas, tem o nome de *detend torque*. No motor utilizado o *detend torque* é aproximadamente igual a 30 N.mm. Como a engrenagem fixa ao veio do motor tem 10 mm de diâmetro primitivo, seria então necessária uma força de 6 N no contacto entre os dentes das rodas. Ou seja, o pistão terá que exercer uma força superior a 6 N para mover o gerador numa situação em que o atrito fosse nulo.

Retomando aos resultados dos testes experimentais, a força mínima registada no pistão é de 54,799 N, ou seja, nove vezes superior à força mínima necessária para mover o gerador. Assim, apesar de possíveis forças de atrito não consideradas, prevê-se que seja possível atingir os objetivos deste trabalho nestas condições. A Fig. [4.11](#) mostra o modelo final da bateria MAD juntamente com todos os órgãos necessários ao seu funcionamento.



**Figura 4.11:** Fotografia do primeiro modelo M.A.D completo.

## 5 Notas conclusivas e trabalho futuro

São várias as tecnologias de armazenamento de energia (ESS - Energy Storage Systems ) disponíveis e em desenvolvimento mas são poucas as que se mostram capazes de integrar a rede elétrica.

No ano de 2017 apenas 3,3% da energia elétrica produzida foi armazenada e mais de 96% desse armazenamento foi responsabilidade de sistemas de bombagem hidráulica (Statista, 2018). A economia e o planeta sofrem com o insuficiente contributo dos ESS. Para responder ao consumo elétrico em tempo real, as centrais de produção são sobredimensionadas resultando em constantes desperdícios.

Também as energias renováveis saem prejudicadas. A natureza indomável destas tecnologias leva a excessos de energia quando o consumo não o justifica, criando complicações no escoamento da mesma. Por esta razão as centrais de energia verde não podem ser sobredimensionadas indefinidamente inviabilizando a autonomia destes sistemas e forçando a sua integração na rede elétrica centralizada. A integração de ESS competitivos e capazes na produção renovável não só potencializa largamente a sua contribuição como possibilita a criação de sistemas de produção independentes e localizados totalmente sustentáveis. Este cenário beneficia principalmente os países em vias de desenvolvimento abrindo perspectivas de criação de autênticas colónias de energia verde auto-suficientes como é o caso do projeto da Tesla para megacomplexo de energia solar numa ilha do Havai.

Como proposta central deste trabalho, demonstrou-se a viabilidade de um conceito de ESS alternativo, a bateria MAD, que se apresenta como um primeiro passo no que pode vir a ser uma solução futura para os desafios energéticos, tanto das tecnologias renováveis como para a gestão sustentável da energia. A bateria MAD é um conceito inovador que procura explorar as forças de interação entre ímanes permanentes de modo a armazenar energia mecânica, que tem como principais características uma vasta área de aplicabilidade e vestalidade, bem como um valor nulo de auto-descarga.

Para tal foram realizados estudos numéricos com diversas configurações possíveis, e dessas resultou um desenho com princípios semelhantes a uma mola linear. O modelo numérico consiste em possuir três peças preenchidas com ímanes, uma móvel e duas fixas. No movimento de carga da bateria a peça móvel é forçada a afastar-se de uma interação de atração magnética e, ao mesmo tempo, em direção a uma interação de repulsão, contra o potencial magnético. O sistema retribui depois a energia armazenada com a peça móvel a fazer o percurso contrário ao da carga, movida pelas forças resultantes dos campos magnéticos atuantes.

Seguiu-se a construção de um modelo real utilizando o princípio do modelo numérico numa configuração em série de modo a aumentar a potência disponível. Foi também construído um sistema de conversão da energia armazenada em eletricidade, posteriormente acoplado à saída da bateria.

Este trabalho cumpriu o principal objetivo de prova de conceito e permitiu derivar as seguintes conclusões:

- É possível conceber um sistema de armazenamento de energia na forma mecânica recorrendo apenas ímanes permanentes.
- É possível construir um sistema de armazenamento de energia com auto-descarga nula.
- A tecnologia MAD demonstra o seu fundamento, mas necessita de maior desenvolvimento e carece de uma investigação mais aprofundada a fim de poder ser comparável às soluções existentes no mercado.

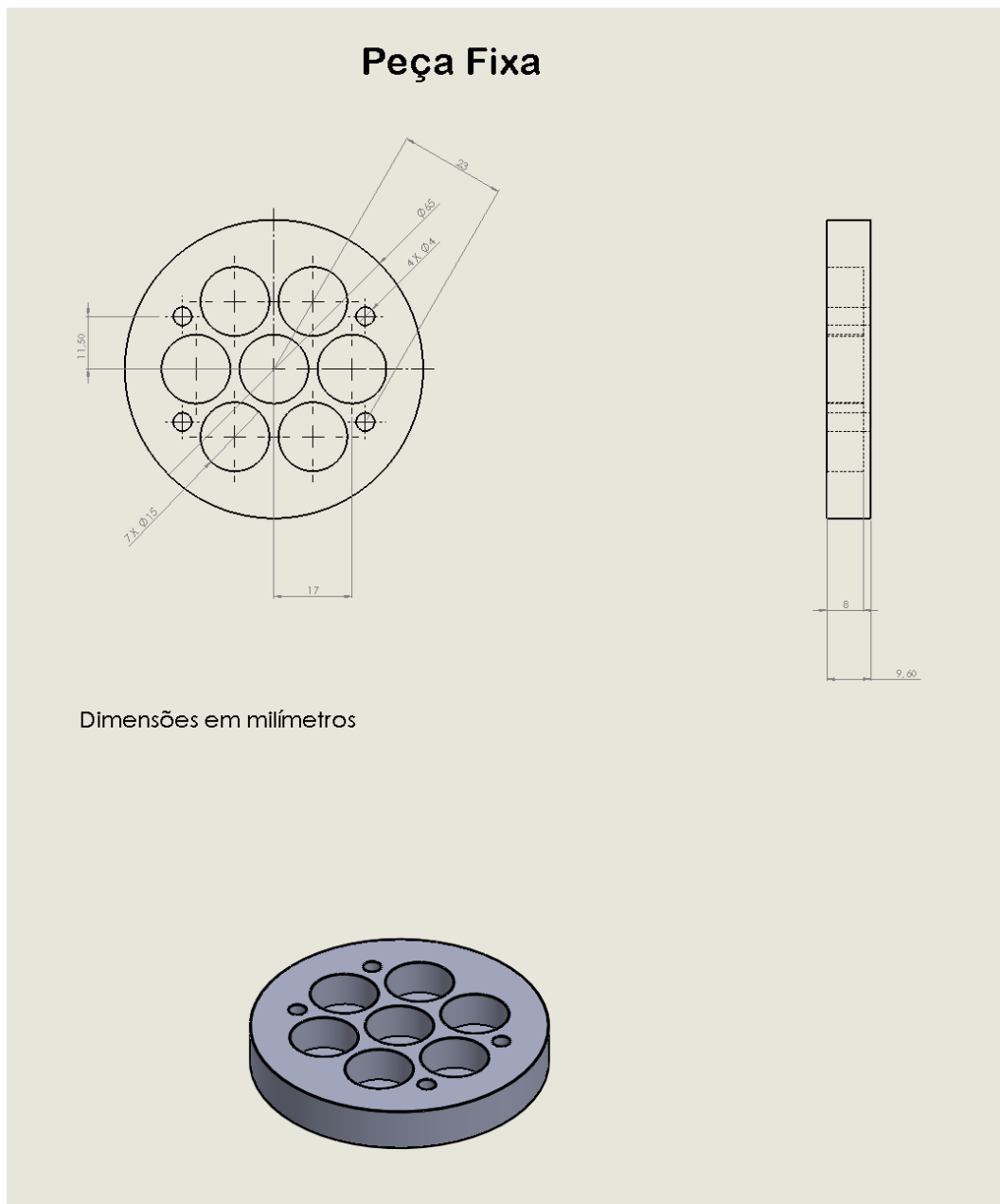
Na perspetiva de trabalhos futuros, ficam a exploração de desenhos alternativos ao modelo apresentado e a construção de um modelo em maior escala que possa ser integrado numa pequena central de produção localizada, armazenando a energia excedente não utilizada de, por exemplo, um sistema fotovoltaico ou eólico.

# Bibliografia

- Amin, Adnan. 2017. *ELECTRICITY STORAGE AND RENEWABLES: COSTS AND MARKETS TO 2030*.
- Dunn, Bruce, Kamath, Haresh, & Tarascon, Jean-Marie. 2017. Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices. *Science*, **334**(6058), 928–935.
- Ibrahim, H, Ilinca, A, & Perron, J. 2008. Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**(5), 1221–1250.
- IRENA. 2015. *BATTERY STORAGE FOR RENEWABLES: MARKET STATUS AND TECHNOLOGY OUTLOOK*.
- Khurmi, R.S., & Gupta, J.K. 2008. *Theory of Machines*. Eurasia Publishing House.
- Reed, Stanley. 2017. *Power Prices Go Negative in Germany, a Positive for Energy Users*.
- Statista. 2018. *Energy storage power capacity in operation worldwide as of mid-2017, by technology (in gigawatts)*.
- Statistical Review of World Energy, BP. 2017. *BP Statistical Review of World Energy June 2017*.
- Thomas, Wim. 2017. *SHELL WORLD ENERGY MODEL A VIEW TO 2100*.

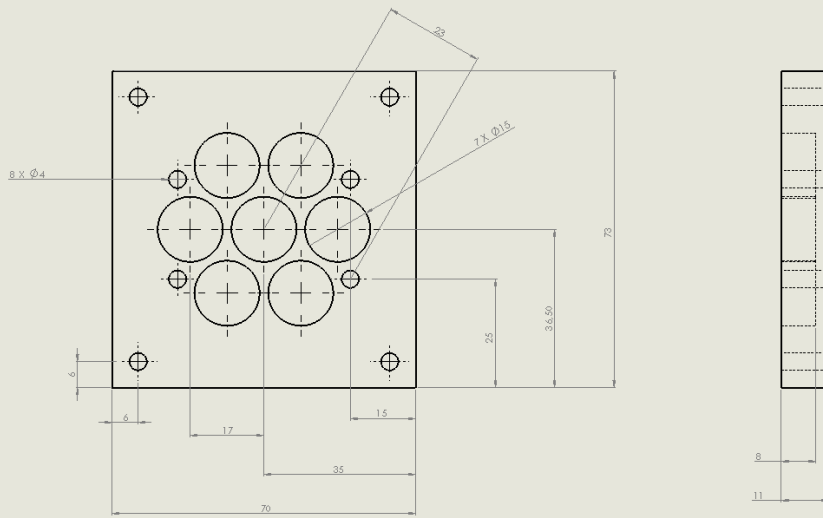


# Apêndice A: Dimensões

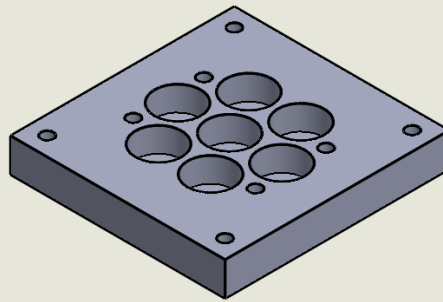


**Figura 1:** Dimensões da peça fixa

## Peça Móvel

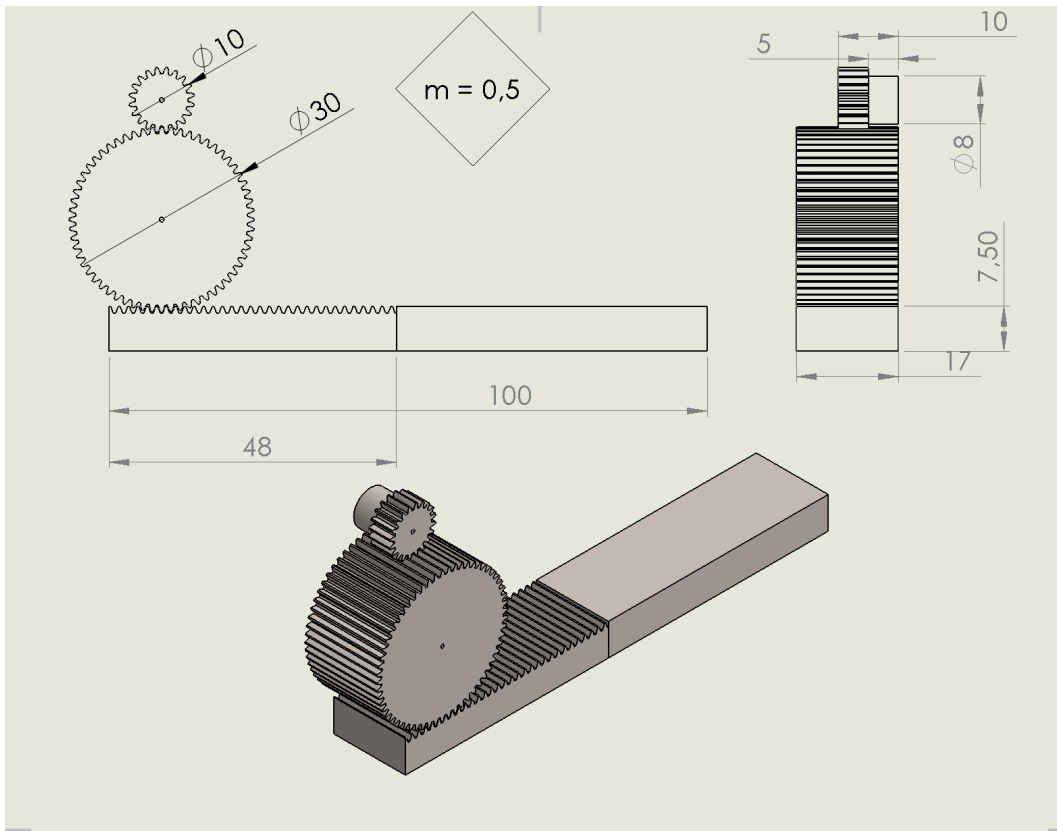


Dimensões em milímetros



**Figura 2:** Dimensões da peça móvel





**Figura 3:** Dimensões dos elementos de transmissão



# Apêndice B: Especificações

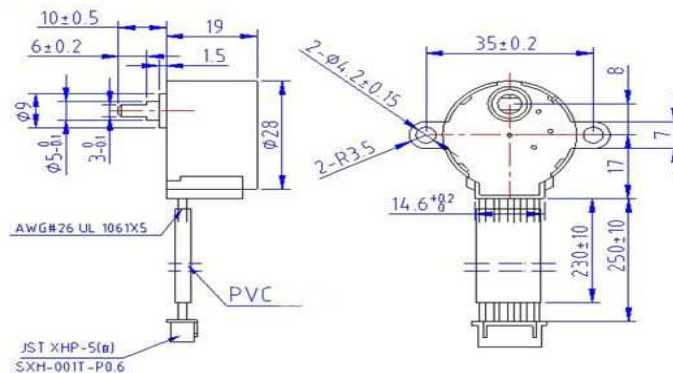
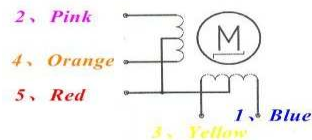
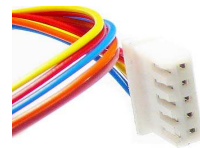


## 28BYJ-48 – 5V Stepper Motor

The 28BYJ-48 is a small stepper motor suitable for a large range of applications.



Rated voltage :	5VDC
Number of Phase	4
Speed Variation Ratio	1/64
Stride Angle	5.625°/64
Frequency	100Hz
DC resistance	50Ω±7%(25°C)
Idle In-traction Frequency	> 600Hz
Idle Out-traction Frequency	> 1000Hz
In-traction Torque	>34.3mN.m(120Hz)
Self-positioning Torque	>34.3mN.m
Friction torque	600-1200 gf.cm
Pull in torque	300 gf.cm
Insulated resistance	>10MΩ(500V)
Insulated electricity power	600VAC/1mA/1s
Insulation grade	A
Rise in Temperature	<40K(120Hz)
Noise	<35dB(120Hz, No load, 10cm)
Model	28BYJ-48 – 5V



P.O. Box 8231 Cherrywood Tauranga New Zealand Phone: +64 7 578 7739 Fax: +64 7 578 7749 E-mail: enquiry@kiatronics.com  
 Website: www.kiatronics.com Copyright © Welten Holdings Ltd - Specifications subject to change without further notice.

Figura 4: Especificações do motor