

Universidade do Algarve
Instituto Superior de Engenharia

**Estudo da Aplicação de Molas Magnéticas na Recolha
da Energia de Fontes Renováveis**

Maria Luzia Pimenta Silva

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Elétrica e Eletrónica
(Especialização em Sistemas de Energia e Controlo)

2015

Universidade do Algarve
Instituto Superior de Engenharia

**Estudo da Aplicação de Molas Magnéticas na Recolha
da Energia de Fontes Renováveis**

Maria Luzia Pimenta Silva

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Elétrica e Eletrónica
(Especialização de Sistemas de Energia e Controlo)

Orientadores: Prof. Doutor Isménio Lourenço Eusébio Martins
Prof. Doutor António João Silva

2015

Estudo da Aplicação de Molas Magnéticas na Recolha da Energia de Fontes Renováveis

Declaração de autoria de trabalho e direitos de cópia

Declaro ser o(a) autor(a) deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

Copyright©2015, por _____

(Maria Luzia Pimenta Silva)

A Universidade do Algarve tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Agradeço à minha mãe que sempre me apoiou em todos os momentos, ensinou-me a ver as dificuldades com outra perspetiva e esteve sempre ao meu lado quando precisei.

Ao meu namorado, pela paciência, apoio, força e carinho que me deu ao longo deste tempo.

Ao meu pai, pelo apoio que me deu.

Ao meu irmão, por ser meu amigo e me ter ajudado sempre que necessitei.

Ao meu Orientador Académico, Professor Doutor Isménio Martins, pela ajuda dada e conhecimentos transmitidos.

Ao meu Orientador Académico, Professor Doutor António Silva, pela ajuda dada e conhecimentos transmitidos.

Ao Professor António Sousa, pela ajuda dada e conhecimentos transmitidos.

Ao Sr. David Meeker, pela ferramenta *FEMM* (Finite Element Method Magnetics), que sem ela não teria sido possível fazer este trabalho.

Resumo

A conversão de energia elétrica a partir de fontes de energia renováveis tem vindo a aumentar. A energia das ondas é uma mais valia, uma vez que as ondas do mar apresentam uma elevada densidade energética.

Nesta dissertação propõe-se um dispositivo capaz de aproveitar a energia das ondas para a conversão de energia elétrica, composto por um gerador linear acoplado a uma mola magnética. Para isso, foi necessário estudar alguns tipos de molas magnéticas existentes, efetuando simulações recorrendo a um programa de simulação de elementos finitos, o *FEMM* e ao *MATLAB*. Foi criado um modelo dinâmico do sistema, de maneira a simular o sistema boia-gerador em ambiente *Simulink*, analisando as suas respostas quando submetido a uma onda linear.

De modo a ter uma ideia mais aprofundada do funcionamento da mola magnética, foi desenvolvido um banco de ensaio, que permitiu analisar a força que uma mola magnética consegue suportar em relação à distância total dos magnetos permanentes que constituem a mola magnética.

Palavras chave: energia das ondas, molas magnéticas, modelo dinâmico, programa de elementos finitos.

Abstract

The conversion of electricity from renewable energy sources has been increasing. Wave energy is an asset, since the waves have high energy density.

This thesis proposes a device able to harness the energy of the waves for electric power conversion, composed of a linear generator coupled to a magnetic spring. For this purpose, we need to study several types of magnetic springs and to perform simulations using a simulation finite element program, the *FEMM*, and *MATLAB*. A dynamic model system was created, in order to simulate the float-generator system in *Simulink*, and to analyse its responses when subjected to a linear wave.

In order to have a more detailed view of the operation of the magnetic spring, a test bench has been developed, which allowed analysing the force that a magnetic spring can withstand in relation to the total distance between the permanent magnets that constitute the magnetic spring.

Key words: wave energy, magnetic springs, the dynamic model, a finite element program.

Índice

	página
Agradecimentos	ii
Resumo.....	iii
Abstract	iv
Índice.....	v
Simbologia.....	vii
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 - Energias Renováveis em Portugal.....	3
1.2 - Energia das Ondas.....	4
1.2.1 - Classificação de dispositivos de extração da energia das ondas	7
1.2.2 - Exemplos de dispositivos de extração da energia das ondas	13
1.3 - Impacto ambiental dos geradores de energia das ondas	17
1.4 - Objetivos	19
1.5 - Estrutura da Dissertação.....	19
Capítulo 2 - Geração de energia elétrica com molas magnéticas	21
2.1 - Magnetos permanentes	22
2.2 - Tipos de molas magnéticas.....	24
2.2.1 - Mola magnética composta por dois anéis magnéticos de dimensões diferentes	26
2.2.2 - Mola magnética composta por dois magnetos fixos e um magneto central móvel ..	29
2.2.3 - Mola magnética composta por um magneto fixo e um magneto móvel.....	31
2.2.4 - Mola magnética composta por um magneto permanente fixo e por uma estrutura tipo sanduíche	32
2.3 - Geração de energia elétrica.....	34
2.3.1 - Geração de energia elétrica com uma mola magnética composta por dois magnetos fixos e um magneto central móvel	35
2.3.2 - Geração de energia elétrica com uma mola magnética composta por um magneto fixo e um magneto móvel	37
2.3.3 - Geração de energia elétrica com uma mola magnética composta por um magneto permanente fixo e por uma estrutura sanduíche.....	39
2.3.4 - Geração de energia elétrica com um gerador linear acoplado a uma mola magnética	41

Capítulo 3 - Simulação numérica	43
3.1 - Simulação de molas magnéticas	44
3.2 - Modelo dinâmico do sistema	48
3.3 - Equações do sistema	49
3.4 - Dimensionamento da boia	52
3.5 - Implementação do modelo dinâmico do sistema	53
Capítulo 4 - Resultados experimentais	58
4.1 - Banco de ensaio	59
4.2 - Valores experimentais	61
4.3 - Análise dos resultados	62
Capítulo 5 - Conclusões e trabalhos futuros	64
5.1 - Conclusões Finais	65
5.2 - Trabalhos Futuros	66
Bibliografia.....	67
Anexos.....	70

Simbologia

Símbolo	Descrição	Unidades
B_r	Indução remanescente	T
b_t	Coefficiente hidrodinâmico da boia	$Nm^{-1}s^{-1}$
c	Velocidade da onda	m/s
D_{papel}	Distância medida na folha	mm
D_{real}	Distância real total dos magnetos permanentes	mm
F	Força exercida no magneto móvel superior	N
F_g	Força do gerador	N
F_s	Força da mola	N
g	Aceleração gravítica	m/s^2
H	Altura de uma onda do mar (pico a pico)	m
h	Profundidade da água do mar	m
h_1	Deslocamento vertical da superfície da água	m
h_2	Deslocamento vertical da boia	m
\dot{h}_2	Velocidade vertical da boia	m/s
\ddot{h}_2	Aceleração vertical da boia	m/s^2
h_3	Deslocamento vertical do veio e massa de calibração	m
\dot{h}_3	Velocidade vertical do veio do gerador e massa de calibração	m/s
\ddot{h}_3	Aceleração vertical do veio do gerador e massa de calibração	m/s^2
H_c	Campo coercivo	kA/m
k_t	Coefficiente de rigidez devido à força de impulsão da água domar	N/m
k_s	Coefficiente de rigidez da mola magnética	N/m
m	Massa do peso utilizado no banco de ensaio	g
m_1	Massa da boia	kg
m_s	Massas móveis dentro da boia	kg
ε	Força eletromotriz	V
λ	Comprimento de onda	m
μ	Permeabilidade magnética	-
μ_0	Permeabilidade do vácuo	H/m
$\Delta\Phi$	Varição do fluxo magnético	Wb
Δt	Varição do tempo	s

Capítulo 1 - Introdução

A energia é de longe a maior mercadoria do mundo, sendo uma grande quantidade extraída, distribuída, convertida e consumida diariamente em todo o mundo. A maior parte da produção de energia é proveniente dos combustíveis fósseis [1].

Atualmente, produz-se energia através da utilização de combustíveis fósseis e também de fontes renováveis, tais como o sol (energia solar), o vento (energia eólica), a terra (energia geotérmica), a água (energia hídrica), entre outras.

A produção de energia através da utilização de fontes renováveis contribui para a redução de emissões de gases de efeito de estufa, ao mesmo tempo que se aumenta a independência energética, principalmente quando não existem fontes de hidrocarbonetos (combustíveis fósseis) [2].

Apesar de não estar muito desenvolvida, a extração de energia das ondas do mar pode vir a contribuir para que se atinjam os objetivos acima referidos, devido à sua elevada densidade energética, a mais elevada das energias renováveis disponíveis. Contudo, esta forma de extração de energia ainda apresenta diversos desafios tecnológicos, que poderão ser ultrapassados com investigação e desenvolvimento [2].

Um dos inconvenientes do crescimento dos dispositivos de extração de energia das ondas é o seu impacto ambiental, tanto no ambiente terrestre (impacto visual), como no meio marinho (impacto sonoro, devido ao ruído produzido).

1.1 - Energias Renováveis em Portugal

Portugal possui um vasto leque de recursos naturais que podem ser utilizados para produzir energia, especialmente energia térmica e elétrica[2]. Dentro destes recursos temos a energia solar, eólica, hídrica, geotérmica, biomassa, entre outras.

Observando a figura 1.1, pode analisar-se a produção de energia elétrica por sector, neste caso no ano de 2012, em que as maiores fatias cabem às energias renováveis, ao carvão e ao gás, respetivamente. Nos 44% das energias renováveis que se encontram na figura 1.1, tem-se a energia eólica, hídrica, solar e geotérmica.

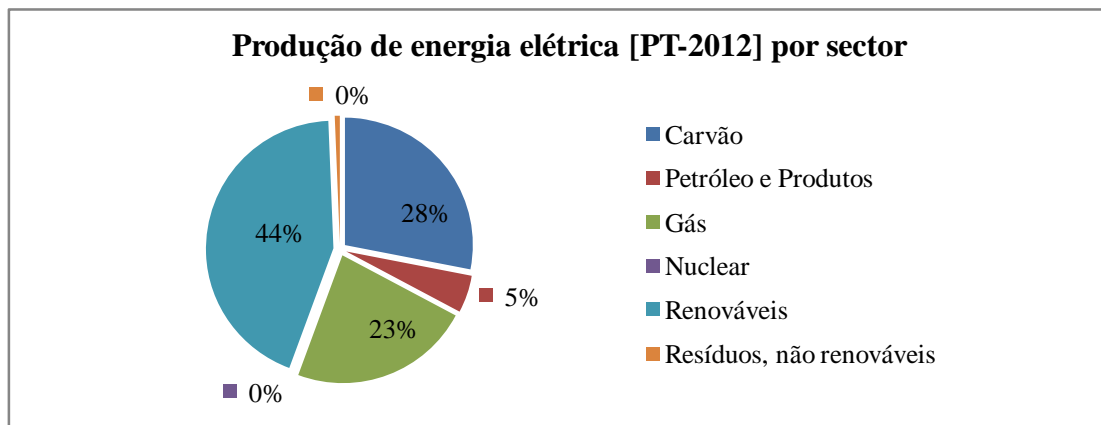


Figura 1.1 - Produção de energia elétrica em Portugal por sector em 2012 [3].

Na figura 1.2 mostra-se o gráfico da produção de energia elétrica a partir de fontes de energia renovável em Portugal no ano de 2012. Pode observar-se que a energia hídrica (considerando todos os recursos hídricos, barragens, ondas, marés, entre outros), é a fonte de energia renovável que mais produziu energia elétrica com cerca de 54%, vindo de seguida a energia eólica, que tem vindo a aumentar gradualmente, tendo contribuído com cerca de 44% na produção de energia elétrica.

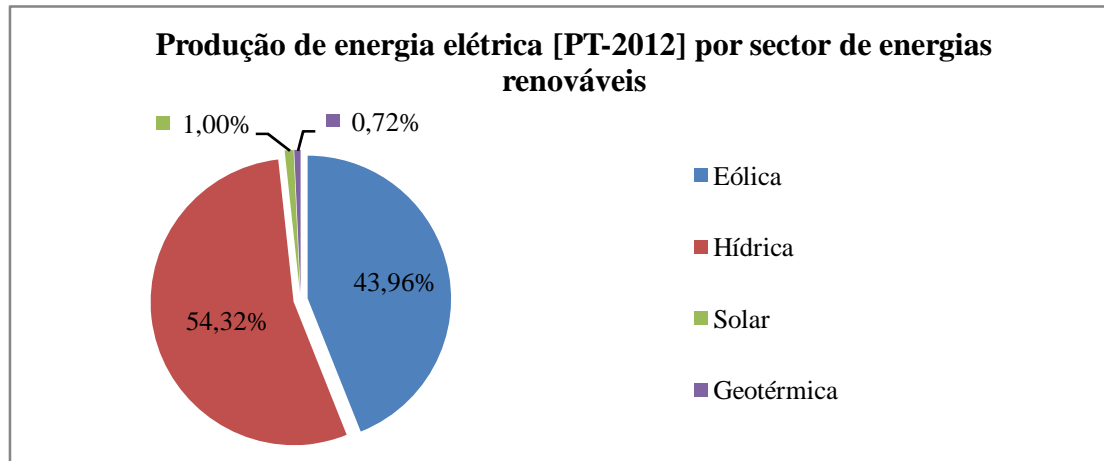


Figura 1.2 - Produção de energia elétrica a partir de fontes de energia renovável em Portugal no ano de 2012 [4].

1.2 - Energia das Ondas

Através dos mares e oceanos é possível obter elevadas quantidades de energia que podem ser recolhidas de diversas formas, tais como, através da exploração da energia contida nas ondas, das correntes e dos gradientes de temperatura e salinidade da água [5].

Em 1799, França, o Senhor Girad e o seu filho registaram a primeira patente da conversão da energia das ondas em formas úteis de energia. No entanto, apenas se começou aprofundar melhor o seu estudo e desenvolvimento depois da subida dos preços do petróleo em 1973 [2].

As características mais importantes das ondas oceânicas, como fonte de energia, são a sua alta densidade energética, mais alta do que qualquer fonte de energia renovável, elevada disponibilidade e vastos recursos. Porém, apresenta algumas desvantagens, tais como dificuldade de acesso e um ambiente agressivo [2].

As ondas oceânicas são geradas através da interação entre o vento e a superfície dos oceanos, apresentando uma elevada concentração de energia [6]. Uma vez criadas, as ondas oceânicas podem percorrer milhares de quilómetros com poucas perdas de energia, exceto se encontrarem ventos contrários [2].

Na figura 1.3 mostra-se o esquema da formação das ondas oceânicas geradas pelo vento.

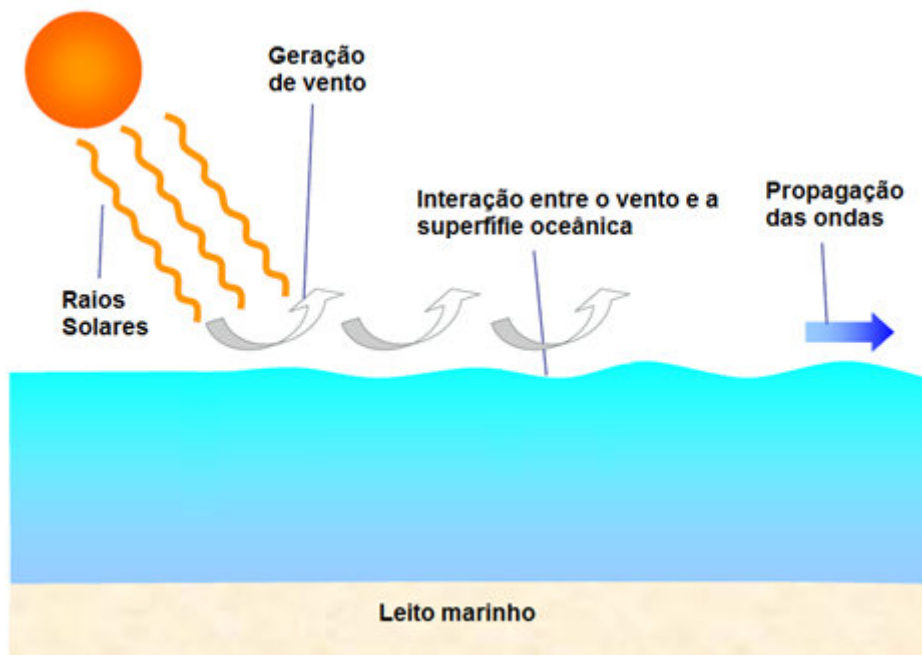


Figura 1.3 - Ondas oceânicas geradas pelo vento [6].

Quanto mais perto da costa, menor é a intensidade da energia das ondas devido à interação com o leito marinho[6]. Esta dissipação de energia perto da costa pode ser compensada por fenómenos naturais de refração ou reflexão [6].

As ondas do mar apresentam dois tipos de energia: energia cinética; e energia potencial, tal como se encontra esquematizado na figura 1.4.

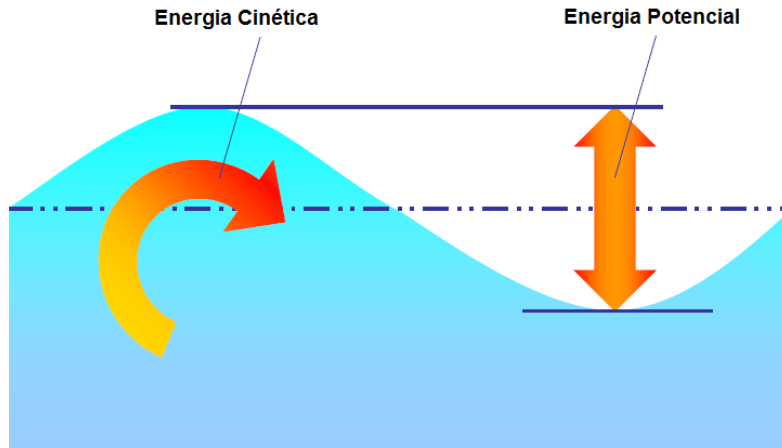


Figura 1.4 - Esquema da energia cinética e potencial no oceano[6].

O tipo de onda mais frequente nos oceanos é designado por *swell*[7]. As ondas *swell* são formadas em zonas onde ocorrem tempestades. Essas tempestades criam grandes ondulações que se propagam por longas distâncias, aumentando de tamanho à medida que o leito marinho fica mais raso, formando ondas de grandes dimensões quando chegam à costa.

As ondas oceânicas podem ser representadas por um modelo ideal, em que se considera um perfil linear sinusoidal, como é mostrado na figura 1.5. Pelo gráfico da figura 1.5 tem-se que h é a profundidade da água, λ é o comprimento de onda, c é a velocidade da onda e H é a altura da onda.

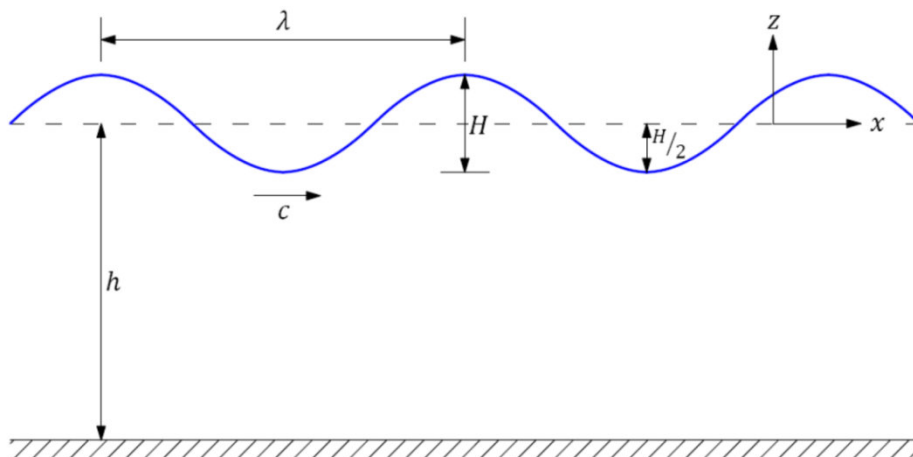


Figura 1.5 - Onda linear sinusoidal [2].

1.2.1 - Classificação de dispositivos de extração da energia das ondas

Os dispositivos de extração da energia das ondas podem ser classificados pela sua localização ou pelo seu princípio de funcionamento.

No que diz respeito à sua localização, os dispositivos podem ser classificados em três tipos [8]:

- *Onshore* - dispositivos na linha da costa, ou de primeira geração;
- *Nearshore* - dispositivos próximos da costa, assentes no fundo entre **10a25 m** de profundidade ou de segunda geração;
- *Offshore* - dispositivos afastados da costa, assentes no fundo entre **50 a 80 m** de profundidade ou de terceira geração.

Os dispositivos *onshore* são instalados na costa, tendo como vantagens a facilidade de acesso, a ausência de amarrações e não necessitam de cabos elétricos submarinos muito compridos. Contudo, também apresentam algumas desvantagens, tais como restrições à sua localização, maior impacto ambiental (parte visual) e têm um nível de potência média das ondas menor do que os dispositivos *offshore*, devido aos efeitos dissipativos de energia por rebentação e atrito no fundo [8].

Os dispositivos *nearshore* encontram-se situados a dezenas de metros da linha da costa, no mar, molhes ou em quebra-mares[9]. Os molhes consistem numa estrutura costeira que "avança" para o mar, sendo necessário que uma das pontas do molhe se encontre em terra e a outra no mar. Caso as duas pontas da estrutura estiverem no mar, trata-se de um quebra-mares.

Os dispositivos *offshore* são instalados longe da costa, o que permite explorar melhor o recurso energético em águas de maior profundidade. Estes dispositivos têm como vantagens poucas restrições relativamente à sua localização e apresentam muito pouco impacto visual. No entanto, apresentam algumas dificuldades de manutenção, transporte de energia para terra e processos de ancoragem no fundo[8].

Relativamente ao princípio de funcionamento, os dispositivos de extração da energia das ondas podem ser classificados em três grupos principais:

- *Coluna de água oscilante;*
- *Dispositivos de elevação;*
- *Corpos ativados pelas ondas.*

Nos dispositivos de *coluna de água oscilante*, as ondas causam a subida e descida da coluna de água, que alternadamente comprime e descomprime uma coluna de ar. A energia é extraída do fluxo de ar oscilante resultante, como é mostrado na figura 1.6 através de uma turbina *Wells* (turbina bidirecional)[2].

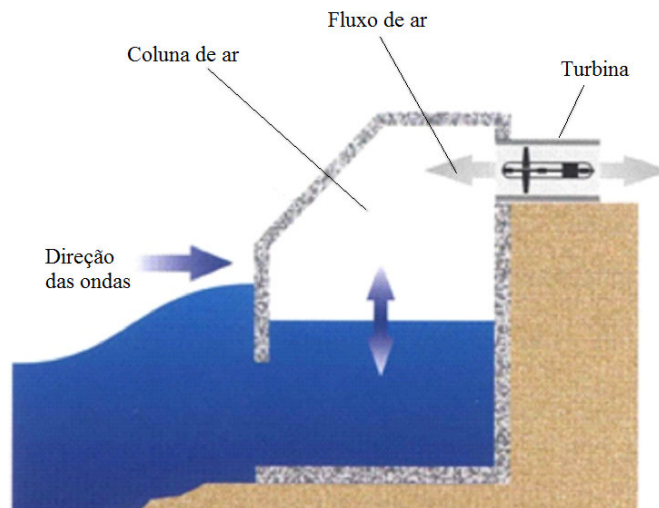


Figura 1.6 - Esquema de uma *coluna de água oscilante*[10].

Nas turbinas do tipo *Wells*, o rotor gira sempre na mesma direção, independentemente da direção do fluxo de ar que o atravessa. Este princípio de funcionamento encontra-se representado na figura 1.7.

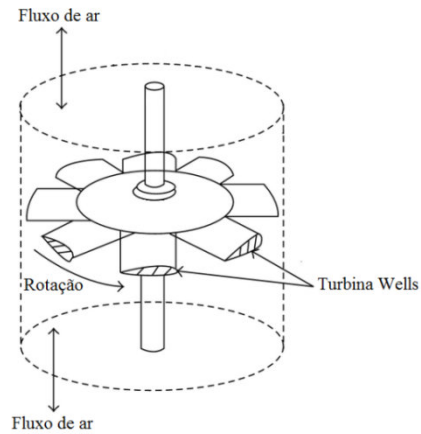


Figura 1.7 - Princípio de funcionamento da turbina Wells[11].

Nos *dispositivos de elevação*, as ondas do mar são conduzidas para um reservatório acima do nível do mar, que armazena a água, tal como se pode observar na figura 1.8. A energia potencial, devido à diferença do nível da água que se encontra no reservatório e do nível do mar, é extraída usando turbinas de *Kaplan* de baixo caudal[2].

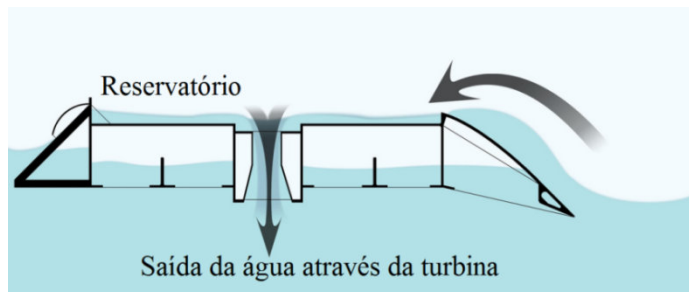


Figura 1.8 - Esquema de um dispositivo de elevação[12].

Na figura 1.9 pode observar-se uma turbina *Kaplan*. Este tipo de turbinas funcionam submersas na água, utilizando a energia cinética da água. Possuem poucas pás, um pouco estreitas e com a forma das hélices de barcos, podendo-se regular a sua inclinação.

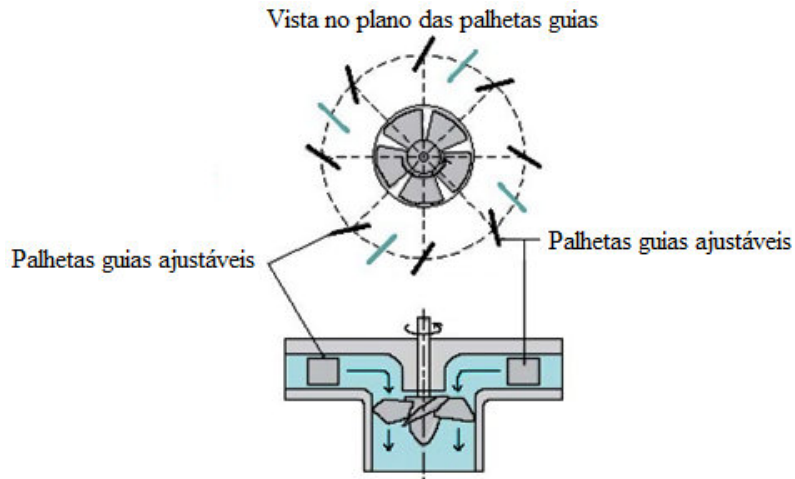


Figura 1.9 - Turbina Kaplan[13].

Os *corpos ativados pelas ondas* são dispositivos com elementos que são diretamente ativados pela oscilação cíclica das ondas. A energia é extraída, convertendo a energia cinética, das peças que se movimentam com as ondas, em energia elétrica. Na figura 1.10 encontra-se exemplificado um sistema deste tipo[2].

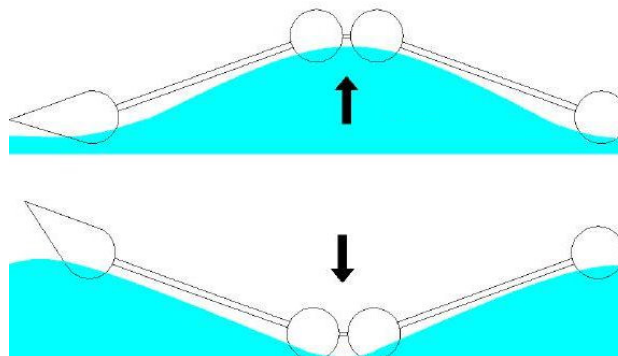


Figura 1.10 - Esquema de um *corpo ativado pelas ondas*[14].

Os dispositivos de conversão de energia das ondas também podem ser classificados em função da sua capacidade de extrair energia de uma ou mais direções da frente de onda. A orientação do dispositivo pode ser classificada em três tipos:

- *Ponto absorvedor;*
- *Terminador;*
- *Atenuador.*

O *ponto absorvedor* utiliza as forças flutuantes para induzir um movimento ondulante de um corpo em relação a um corpo fixo secundário. O *ponto absorvedor* é relativamente pequeno comparado com o comprimento de onda, sendo capaz de capturar energia de uma frente de onda maior do que ele[15]. Na figura 1.11 encontra-se um exemplo de dispositivo deste tipo.

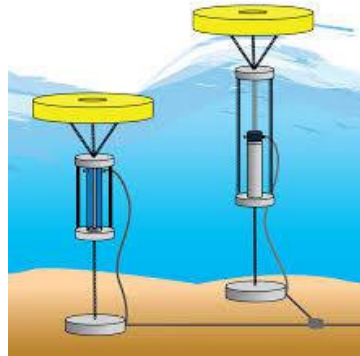


Figura 1.11 - Esquema de um dispositivo do tipo *ponto absorvedor*[10].

O *terminador* tem o eixo principal paralelo à crista da onda, não deixando a onda passar pelo dispositivo[2]. Na figura 1.12 encontra-se um exemplo do tipo *terminador*.

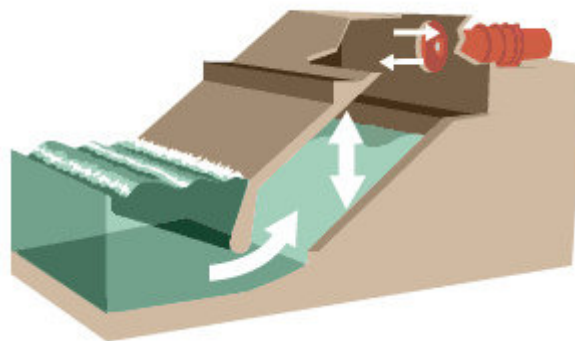


Figura 1.12 - Esquema de um dispositivo do tipo *terminador*[11].

O *atenuador* utiliza o movimento das ondas que se aproximam do dispositivo, para induzir um movimento oscilatório entre os dois ou mais componentes estruturais adjacentes. O atenuador tem o eixo principal paralelo à direção de onda [15]. Na figura 1.13 encontra-se representado o exemplo de um sistema deste tipo.

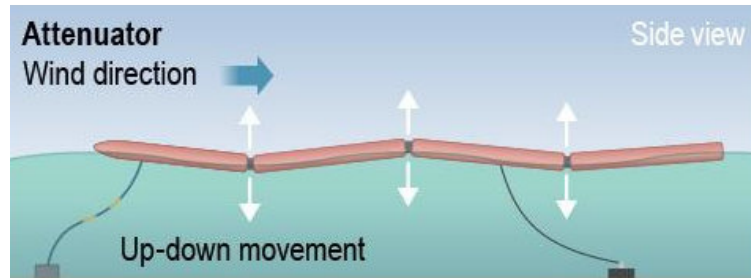


Figura 1.13 - Esquema de um dispositivo do tipo atenuador[16].

Os dispositivos do tipo *terminador* e *atenuador* devem estar orientados na direção de ondas predominantes no local, enquanto que o *ponto absorvedor* consegue capturar energia de ondas vindas de qualquer direção[2].

Na tabela I podem observar-se os princípios de funcionamento possíveis em função da localização e orientação do dispositivo.

Na localização *onshore* é possível utilizar dispositivos do tipo *terminador*, ou seja, *colunas de água oscilante* e/ou *dispositivos de elevação*.

Nas localizações *nearshore* e *offshore* pode utilizar-se apenas *corpos ativados pelas ondas* nos dispositivos do tipo *ponto absorvedor* e *atenuador*. Nos dispositivos do tipo *terminador* é possível utilizar qualquer um dos três tipos de funcionamento.

Tabela I- Princípios de funcionamento possíveis em função da localização e orientação do dispositivo[2]				
		Orientação do dispositivo		
		<i>Ponto Absorvedor</i>	<i>Terminador</i>	<i>Atenuador</i>
Localização	<i>Onshore</i>	_____	<i>Colunas de água oscilante;</i> <i>Dispositivos de elevação.</i>	_____
	<i>Nearshore</i>	<i>Corpos ativados pelas ondas.</i>	<i>Colunas de água oscilante;</i> <i>Dispositivos de elevação;</i> <i>Corpos ativados pelas ondas.</i>	<i>Corpos ativados pelas ondas.</i>
	<i>Offshore</i>	<i>Corpos ativados pelas ondas.</i>	<i>Colunas de água oscilante;</i> <i>Dispositivos de elevação;</i> <i>Corpos ativados pelas ondas.</i>	<i>Corpos ativados pelas ondas.</i>

1.2.2 - Exemplos de dispositivos de extração da energia das ondas

As primeiras patentes de sistemas para aproveitamento da energia das ondas apareceram no final do século XVIII. No entanto, foi no Japão, a meados do século XX, que apareceu a primeira aplicação industrial com a utilização da energia das ondas em boias de sinalização marítima [8].

De seguida são descritos alguns exemplos de dispositivos de extração da energia das ondas, tais como o *Archimedes Wave Swing*, *Pelamis*, *Wave Dragon* e *Central do Pico*.

Archimedes Wave Swing (AWS)

O *Archimedes Wave Swing* é um dispositivo de extração de energia das ondas da classe dos *corpos ativados pelas ondas (ponto absorvedor)* [17].

Na figura 1.14 encontra-se esquematizado o princípio de funcionamento do *Archimedes Wave Swing*. O AWS é formado por dois cilindros ocos, colocados um sobre o outro, no interior dos quais há ar pressurizado [17]. A pressão no interior dos cilindros equilibra o flutuador relativamente ao seu peso e a pressão hidrostática nele exercida. As diferenças de pressão causadas pela passagem das ondas, movem o flutuador, provocando um movimento oscilatório vertical, fazendo com que o conjunto funcione como uma espécie de êmbolo ou mola pneumática [7].

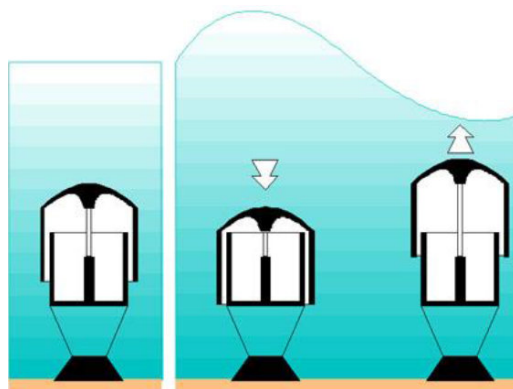


Figura 1.14- Princípio de funcionamento do AWS[7].

O movimento entre o flutuador e a base é utilizado para acionar um gerador linear síncrono, de magnetos permanentes. A energia mecânica é convertida para energia elétrica e transmitida por um cabo submarino para uma estação em terra, onde a energia é tratada de modo a poder ser injetada na rede [17].

Pelamis

O *Pelamis* é um dispositivo de extração de energia das ondas da classe dos *corpos ativados pelas ondas (atenuador)*. Tendo uma dimensão longitudinal da ordem de grandeza do comprimento das ondas [15].

Como se pode ver na figura 1.15, o *Pelamis* é constituído por quatro módulos cilíndricos semi-submersos, que se encontram unidos por juntas flexíveis, e por três módulos de conversão de energia [15].

Com a ondulação marítima, os módulos oscilam em torno das juntas que os unem, pressurizando óleo que é forçado a passar por motores hidráulicos que, por sua vez, acionam geradores que produzem eletricidade[15].



Figura 1.15- Fotografia do *Pelamis*[7].

O dispositivo *Pelamis* foi concebido, principalmente com o objetivo de ser implementado em parques, pelo que a energia extraída de todos os módulos é retirada e enviada para terra através de um único cabo [15].

Na figura 1.16 pode observar-se o sistema de fixação do *Pelamis* ao fundo do mar. Este sistema é bastante simples e flexível, independentemente da profundidade e morfologia do fundo oceânico, uma vez que o *Pelamis* dispor-se-á, dinamicamente, sempre ao longo da movimentação da onda [7].

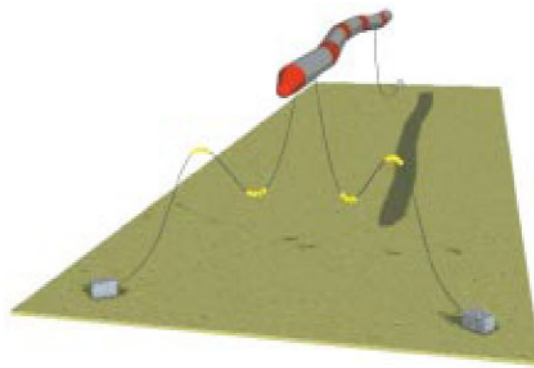


Figura 1.16 – Esquema do sistema de fixação do *Pelamis*[15].

Wave Dragon

O *Wave Dragon* é um dispositivo de extração de energia das ondas da classe dos *dispositivos de elevação*[17].

O *Wave Dragon* tem uma estrutura composta por um reservatório, que armazena água a uma altura acima do nível do mar [15]. Este dispositivo é constituído por dois braços refletoras que concentram as ondas incidentes numa rampa, que ao ser transposta, desagua num reservatório [7]. A água no reservatório é repostada no mar através de turbinas, produzindo eletricidade. O armazenamento da água permite regular a produção de eletricidade de forma similar ao de uma central mini-hídrica [7]. Na figura 1.17 encontra-se esquematizado este dispositivo.

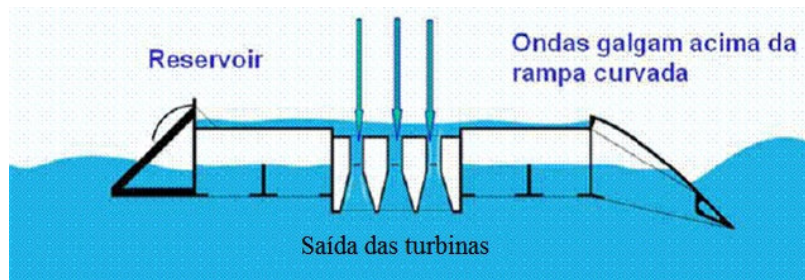


Figura 1.17 – Esquema do Wave Dragon[7].

Central do Pico

A *Central do Pico* é da classe da *coluna de água oscilante (terminador)* e encontra-se localizada nos Açores, Portugal.

Como é mostrado na figura 1.18, as ondas propagam-se para dentro da câmara pneumática, através de uma abertura submersa, fazendo oscilar verticalmente a água no interior da câmara. O movimento vertical da água gera um fluxo de ar em sentido alternado, do interior da câmara para a atmosfera e vice-versa, que aciona a turbina *Wells* e o gerador que lhe está acoplado [18].

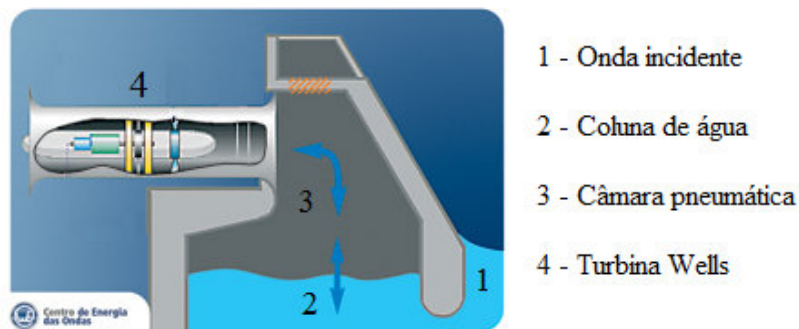


Figura 1.18 – Esquema da Central do Pico[18].

1.3 - Impacto ambiental dos geradores de energia das ondas

Os dispositivos de extração de energia das ondas, como já foi referido anteriormente, causam um impacto ambiental, tanto a nível visual como sonoro. Os dispositivos que não se encontrem perto da costa, criam um impacto maior na fauna marinha, aumentando, nas últimas décadas, a preocupação da comunidade científica. Esta preocupação deve-se, particularmente, ao relacionamento que o efeito do ruído subaquático tem com os mamíferos marinhos, uma vez que estes utilizam o som como o seu sentido primário, ou seja, utilizam o som para comunicar, caçar e ecolocalizar [19]. Sendo assim, qualquer alteração do ruído subaquático é-lhes prejudicial.

O ruído subaquático pode ser dividido em dois tipos[20]:

- Ruído impulsivo;
- Ruído ambiente/de fundo.

Em relação às principais fontes de ruído, estas podem ser classificadas em três grupos[20]:

- Equipamentos colocados no mar (sondas acústicas, sonares, equipamentos acústicos de transmissão de dados, entre outros);
- Construções submarinas;
- Veículos que se desloquem no mar (barcos de pesca, navios de transporte, submarinos, entre outros).

As duas primeiras fontes de ruído podem ser enquadradas no ruído do tipo impulsivo, pois são de forte amplitude, direccionais, de curta duração e de carácter esporádico. O ruído causado por estas fontes de ruído prejudicam as espécies marinhas, tanto alterando o seu comportamento temporariamente, como destruindo o seu sistema sensorial e/ou levando mesmo à morte desses animais. Contudo, o ruído causado por estas fontes diminui bastante com a distância, ou seja, existe um elevado impacto nas espécies marinhas se encontrem perto e um impacto ligeiro ou nulo nas espécies que se encontrem a uma certa distância destas fontes de ruído. Normalmente, para que não hajam danos permanentes no sistema sensorial das espécies marinhas, é utilizada uma

distância de segurança de cerca de **20km**. Contudo, essa distância depende da intensidade do ruído, da frequência e do grau de sensibilidade da espécie [20].

A última fonte de ruído enquadra-se no ruído do tipo ambiente/de fundo, pois são do tipo contínuo. O ruído causado por esta fonte de ruído, tem pouco impacto no sistema sensorial das espécies marinhas. No entanto, afeta o comportamento dessas espécies a longo prazo [20].

A preocupação crescente com o impacto ambiental levou a que tivesse surgido diversos projetos científicos nesta área, como por exemplo, o projeto *Wave Energy Acoustic Measurements (WEAM)*.

O projeto *WEAM* foi desenvolvido especificamente para medir o ruído submarino causado por geradores de energia das ondas [20]. Este projeto fez a monitorização de, pelo menos, três parques da energia das ondas, entre os quais a *Central do Pico*. O *WEAM* funcionou durante cerca de três anos, finais de 2007 a inícios de 2011 [18]. A medição *in situ* do ruído submarino gerado pelos geradores de energia foi feita com recurso a hidrofones e os dados recolhidos processados estatisticamente para avaliar o possível impacto do ruído gerado.

Apesar de os geradores de energia das ondas não estarem tipificados nos tipos anteriores, podem ser considerados do tipo ruídos de fundo, devido ao carácter permanente do seu funcionamento.

Espera-se que a utilização de molas magnéticas em vez das molas convencionais, possa vir a contribuir para a diminuição do ruído criado pelos dispositivos de extração de energia das ondas.

1.4 - Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal estudar a utilização das molas magnéticas na recolha de energia de fontes renováveis. Para isso, irá ser analisado o funcionamento das molas magnéticas, bem como a sua utilização na geração de energia elétrica.

De modo a analisar o funcionamento deste tipo de molas, será feito um modelo dinâmico do sistema, de forma a que este possa ser simulado no *Simulink*, *MATLAB*.

Pretende-se ainda criar um banco de ensaio, de maneira a se poder comparar os resultados obtidos teoricamente com os resultados obtidos através de experiências realizadas no banco de ensaio.

1.5 - Estrutura da Dissertação

No capítulo 1 são referidas as energias renováveis nomeadamente em Portugal, em particular a energia das ondas. Em seguida é feita uma breve classificação dos dispositivos de extração de energia das ondas, exemplos de alguns desses dispositivos e uma breve descrição do impacto ambiental dos geradores de energia das ondas. Por último são apresentados os objetivos do trabalho, que serão desenvolvidos ao longo desta dissertação.

No capítulo 2 encontra-se uma breve descrição dos magnetos permanentes. Enumerados e descritos alguns tipos de molas magnéticas, mostrando-se imagens da distribuição do campo magnético e da curva da força exercida pelos magnetos em relação à distância total dos mesmos. Por fim, são apresentados exemplos de geração de energia elétrica utilizando molas magnéticas.

No capítulo 3 encontram-se as equações do sistema, nomeadamente o modelo matemático que descreve o comportamento dinâmico do sistema mecânico boia gerador e as simulações efetuadas no *Simulink* do *MATLAB*.

No capítulo 4 encontram-se as experiências efetuadas utilizando um protótipo de mola magnética.

No capítulo 5 encontram-se as conclusões mais relevantes dos capítulos anteriores e são retiradas conclusões finais.

Na parte dos anexos são apresentados os comandos que permitem trabalhar no programa de simulação *Finite Element Method Magnetics (FEMM)* com o *MATLAB*. Encontram-se também os comandos utilizados na realização das simulações efetuadas nesta dissertação e o procedimento utilizado na realização das experiências no banco de ensaio.

Capítulo 2 - Geração de energia elétrica com molas magnéticas

A geração de energia elétrica pode ser conseguida a partir da utilização de molas magnéticas, constituídas por magnetos permanentes. Para esta dissertação foram utilizados magnetos de *Neodímio Ferro Boro (NdFeB)*.

Neste capítulo encontram-se alguns tipos de molas magnéticas, bem como os gráficos da força exercida sobre o magneto permanente em relação à distância total dos magnetos, para cada tipo de mola. Encontram-se, também, alguns exemplos de tipos de geração de energia elétrica, utilizando as molas magnéticas.

2.1 - Magnetos permanentes

Os materiais magnéticos podem ser classificados em três grupos, consoante os seus valores de permeabilidade magnética [21]:

- *Diamagnéticos* - apresentam uma permeabilidade magnética inferior à permeabilidade do vácuo ($\mu < \mu_0$), como por exemplo, cobre, prata, ouro.
- *Paramagnéticos* - têm uma permeabilidade magnética superior à permeabilidade do vácuo ($\mu > \mu_0$), como por exemplo, magnésio, platina.
- *Ferromagnéticos* - apresentam uma permeabilidade magnética muito superior à permeabilidade do vácuo ($\mu \gg \mu_0$), como por exemplo, ferro, níquel.

Designa-se por permeabilidade magnética, a propriedade que os materiais têm de se deixarem atravessar com mais ou menos facilidade pelas linhas de fluxo [21].

Os materiais magnéticos podem ser do tipo duro ou macio. Os materiais do tipo duro apresentam um ciclo de histerese largo, sendo ideais para a construção de magnetos permanentes. Em contrapartida, os materiais do tipo macio têm um ciclo de histerese estreito, sendo facilmente magnetizados[21].

Os magnetos podem ser naturais ou criados pelo Homem. Os magnetos naturais são produzidos na natureza, como por exemplo a magnetita. Quanto aos magnetos criados pelo Homem, estes podem ser temporários ou permanentes.

Os magnetos temporários são facilmente magnetizados, mas quando removidos da proximidade de um campo magnetizante, perdem grande parte do seu magnetismo. Por outro lado, os magnetos permanentes mantêm o seu magnetismo depois do campo magnetizante ser removido.

O magneto permanente considerado nesta dissertação, para a constituição das molas magnéticas, foi o magneto de *Neodímio Ferro Boro*, que pertence à família dos magnetos de Terras raras.

A primeira geração dos magnetos de Terras raras foi composta pelo magneto de *Samário Cobalto* (*SmCo*) [22]. Por motivos económicos, entre outros, começou-se a substituir este tipo de magneto pelo *NdFeB*.

Os magnetos *NdFeB* apresentam uma densidade máxima de energia de cerca de **400 kJ/m³**[23]. Possuem ainda grandes valores de indução remanescente, B_r , e campo coercivo, H_c . Este tipo de magneto apresenta uma temperatura máxima de trabalho muito menor que o magneto *SmCo*, e as suas propriedades magnéticas dependem muito da temperatura.

O magneto de *Neodímio Ferro Boro* utilizado nesta dissertação, apresenta uma permeabilidade relativa de **1.045** e uma coercividade de **883.310kA/m** [24]. Na figura 2.1 pode observar-se a curva de desmagnetização deste magneto.

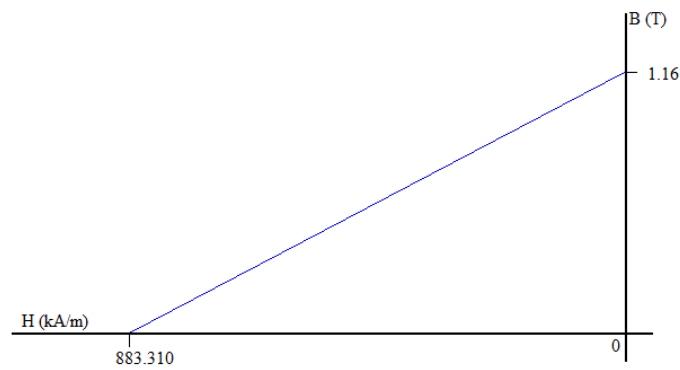


Figura 2.1 - Curva de desmagnetização do magneto *NdFeB*.

2.2 - Tipos de molas magnéticas

As molas magnéticas têm o mesmo princípio de funcionamento que as molas de metal. Em ambos os tipos de molas, em caso de compressão, a mola gera uma força de reação que pode ser proporcional à deformação. As molas metálicas helicoidais, figura 2.2, produzem forças proporcionais à deformação. Enquanto as molas magnéticas, de um modo geral, produzem forças com uma característica não linear, relativamente à deformação.

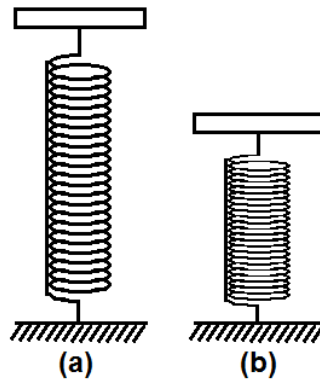


Figura 2.2- Mola metálica helicoidal. (a) representa uma mola metálica em repouso; (b) representa uma mola metálica comprimida devido a um peso x .

As molas magnéticas, figura 2.3, podem ser constituídas, por exemplo, por vários anéis magnéticos com dimensões iguais, com centro no mesmo eixo, onde um dos anéis se encontra fixo, e os restantes podem-se mover livremente. O campo magnético permite que os anéis magnéticos se mantenham afastados a uma distância fixa. Caso a distância entre os anéis seja alterada, uma força de repulsão é produzida, fazendo com que os anéis voltem às posições iniciais.

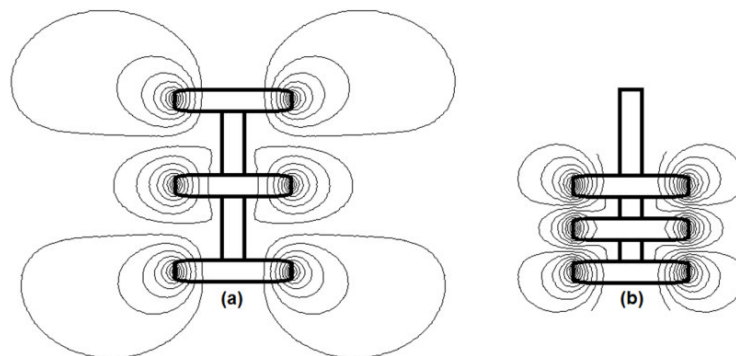


Figura 2.3- Mola magnética. (a) representa uma mola magnética em repouso; (b) representa uma mola magnética comprimida devido a um peso x .

Através de um gráfico é possível observar a relação entre a força e a distância total dos magnetos. Quanto maior for a distância entre os anéis magnéticos, menor é força, e vice-versa.

Atualmente, existem vários tipos de molas magnéticas, em que alguns deles serão descritos nos próximos subcapítulos, sendo que no final de cada subcapítulo encontra-se um gráfico criado com a ajuda de um programa de simulação, o *Finite Element Method Magnetics (FEMM)*.

2.2.1- Mola magnética composta por dois anéis magnéticos de dimensões diferentes

Este tipo de mola magnética é composto por dois anéis magnéticos com dimensões diferentes, colocados concêntricamente na mesma direção de magnetização[25], em que um dos anéis se encontra fixo e o outro livre, de maneira a se poder movimentar axialmente.

Pela figura 2.4 observa-se que o anel magnético 5 encontra-se unido a um bloco 4 feito de material não ferroso. O anel magnético 3 encontra-se montado sobre um bloco 2 feito de material não ferroso, no centro do qual (bloco 2) existe um pequeno buraco, permitindo com que o anel magnético 3 se possa movimentar no eixo 1. Sendo que o eixo 1 se encontra fixo no centro do bloco 4 [25].

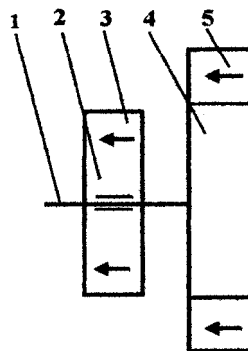


Figura 2.4- Mola magnética composta por dois anéis magnéticos com dimensões diferentes, colocados concêntricamente na mesma direção de magnetização[25].

Todavia, em vez de se ter o eixo 1 fixo no centro do bloco 4 e o anel magnético 3 livre para se movimentar pelo eixo 1, podemos fazer o contrário. Isto é, ter o eixo 1 fixo ao anel magnético 3 e o anel magnético 5 livre para se movimentar pelo eixo 1. Em ambas as hipóteses a propriedade da mola manter-se-á inalterada[25].

Devido ao campo magnético, os anéis magnéticos mantêm-se afastados a uma distância fixa[25]. Caso a distância entre os anéis seja alterada, uma força de restauração é produzida, fazendo com que os anéis voltem às suas posições iniciais. Este efeito, é muito semelhante à força elástica de uma mola metálica [25].

Pela figura 2.5 é possível observar o fluxo magnético entre os dois anéis magnéticos. Como os dois anéis magnéticos (de diferentes dimensões) se encontram magnetizados axialmente na mesma direção, vai existir uma força de atração na área central B e uma força de repulsão nas áreas interior C e exterior A [25].

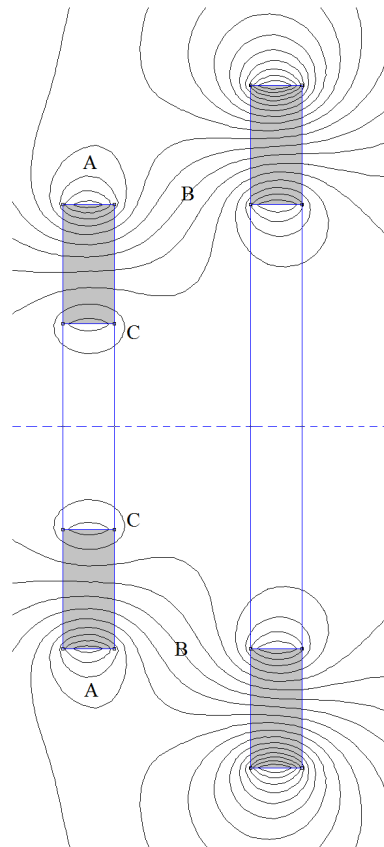


Figura 2.5- Fluxo magnético entre dois anéis magnéticos.

No caso de não existir uma força externa a atuar no anel magnético móvel, a força de atração é compensada pela força de repulsão, ficando os anéis a uma dada distância um do outro[25].

Em suma, a relação entre distância e a força elástica dos anéis magnéticos é bastante linear [25]. Quanto maior for a distância entre os dois anéis magnéticos menor vai ser a força elástica, e vice-versa. Por outro lado, a mola magnética também pode aumentar a sua elasticidade, aumentando a massa dos anéis magnéticos ou diminuindo a diferença de dimensão dos dois anéis magnéticos [25].

Pelo gráfico da figura 2.6, pode observar-se o gráfico da força *versus* a distância total dos magnetos permanentes. Tal como foi mencionado anteriormente, a relação entre distância e a força elástica dos anéis magnéticos é bastante linear [25]. No gráfico, o valor zero indica que o magneto permanente móvel encontra-se em equilíbrio, isto é, encontra-se a uma distância fixa do magneto permanente fixo. Ao existir uma força externa a empurrar um magneto contra o outro, a força resultante será uma força de repulsão.

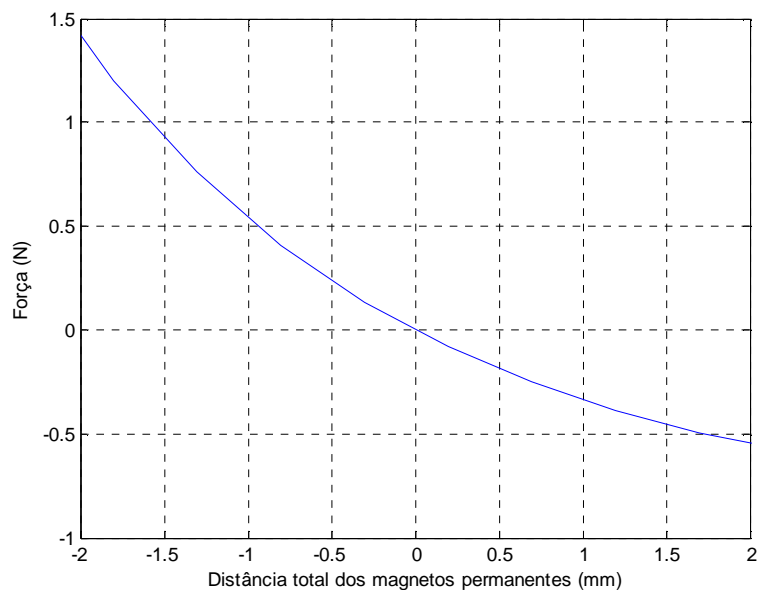


Figura 2.6 - Gráfico da força *versus* a distância total dos magnetos permanentes, de uma mola magnética composta por dois anéis magnéticos com dimensões diferentes(simulação no Anexo2).

2.2.2- Mola magnética composta por dois ímãs fixos e um ímã central móvel

Este tipo de mola magnética é composto por três ímãs coaxialmente colocados num tubo, em que dois dos ímãs se encontram fixos e o outro ímã se pode movimentar verticalmente [26].

Como é mostrado na figura 2.7, as faces do ímã que se encontra no meio, têm a mesma polarização que as faces dos ímãs que lhe são opostas. Isto é, a face inferior do ímã do meio tem a mesma polarização que a face superior do ímã inferior fixo e a face superior do ímã do meio tem a mesma polarização que a face inferior do ímã superior fixo. Ao terem a mesma polarização, o movimento do ímã central vai produzir uma força de repulsão, fazendo o ímã se movimentar verticalmente até que este retorne ao ponto de equilíbrio.

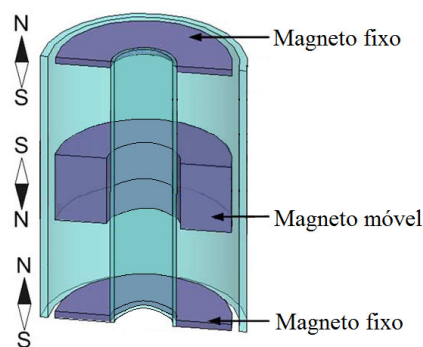


Figura 2.7- Estrutura da mola de ímãs permanentes [26].

Na figura 2.8 pode observar-se que os ímãs se repelem devido ao caminho das linhas de fluxo, em função da polarização dos ímãs. Como pode ser observado, existe uma maior densidade de fluxo nas extremidades dos ímãs.

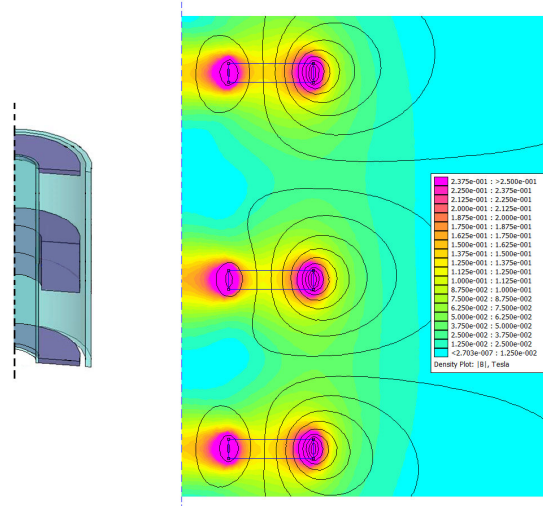


Figura 2.8 - Distribuição da densidade e linhas de fluxo da mola magnética composta por dois magnetos fixos e um magneto central móvel.

Na figura 2.9 encontra-se o gráfico da força *versus* a distância do magneto móvel em relação à sua posição de repouso. Devido à força de repulsão que os magnetos fixos exercem sobre o magneto móvel ser igual, o magneto móvel mantém-se estável num determinado ponto. Esse ponto no gráfico corresponde ao valor zero. Ao existir uma força exterior, o magneto móvel irá movimentar-se verticalmente, aumentando a força de repulsão entre um dos magnetos fixos e diminuindo em relação ao outro. Pelo gráfico, pode ainda observar-se que num determinado intervalo de distância, a força magnética é quase linear.

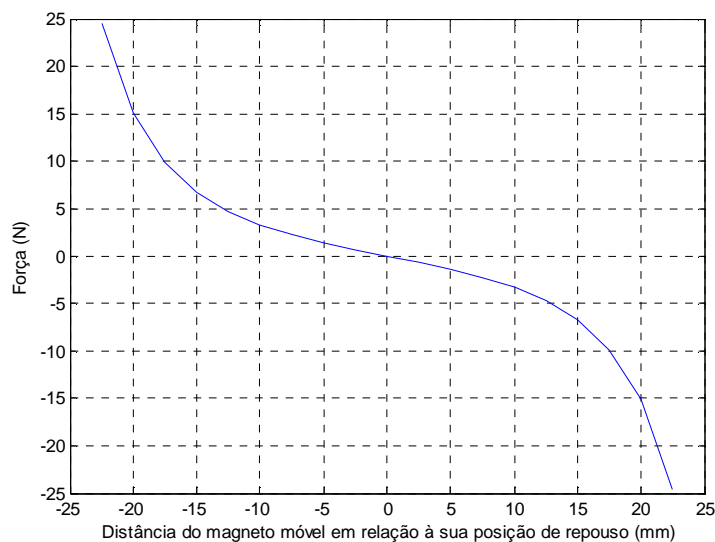


Figura 2.9- Gráfico da força *versus* a distância do magneto móvel em relação à sua posição de repouso (simulação no Anexo3).

2.2.3- Mola magnética composta por um magneto fixo e um magneto móvel

Este tipo de mola magnética é composto por dois magnetos permanentes axialmente magnetizados, que se encontram colocados verticalmente no interior de um tubo cilíndrico[27].

Pela figura 2.10 pode observa-se que um dos magnetos permanentes se encontra fixo no fundo do tubo enquanto o outro se pode mover livremente [27]. As faces dos magnetos que se encontram voltadas uma para a outra têm a mesma polarização, de modo a que os magnetos se possam repelir. Quando se movimentava o magneto móvel na direção do magneto fixo, cria-se uma força de repulsão.

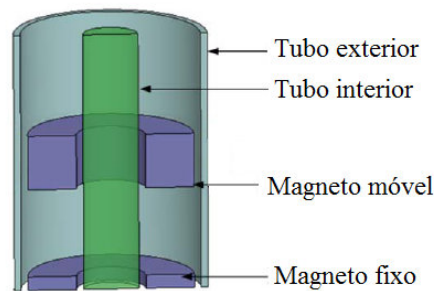


Figura 2.10- Estrutura da mola magnética [27].

Na figura 2.11 pode observar-se a distribuição da densidade de fluxo numa dada posição da mola magnética.

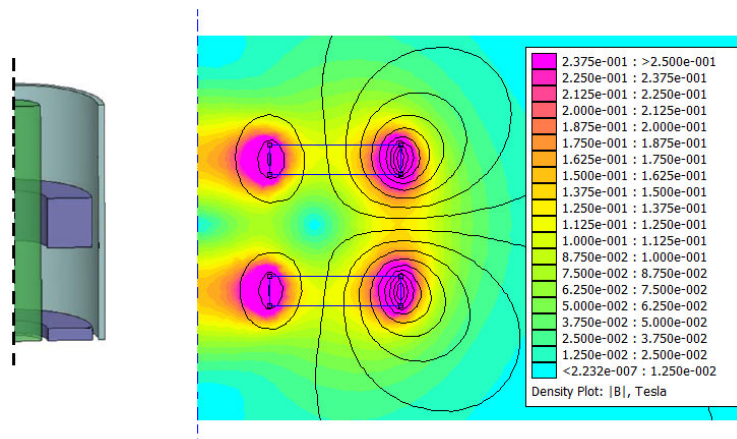


Figura 2.11 - Fluxo magnético da mola magnética composta por um magneto fixo e um magneto móvel.

Na figura 2.12, pode observar-se o gráfico da força *versus* a distância total dos magnetos. Ao ser aplicada uma força exterior, o magneto móvel irá movimentar-se verticalmente dentro do tubo. Quando o magneto móvel se aproxima do magneto fixo, será produzida uma força de repulsão. Tal como é mostrado no gráfico, quanto menor for a distância entre os magnetos, maior vai ser a força de repulsão e *vice-versa*.

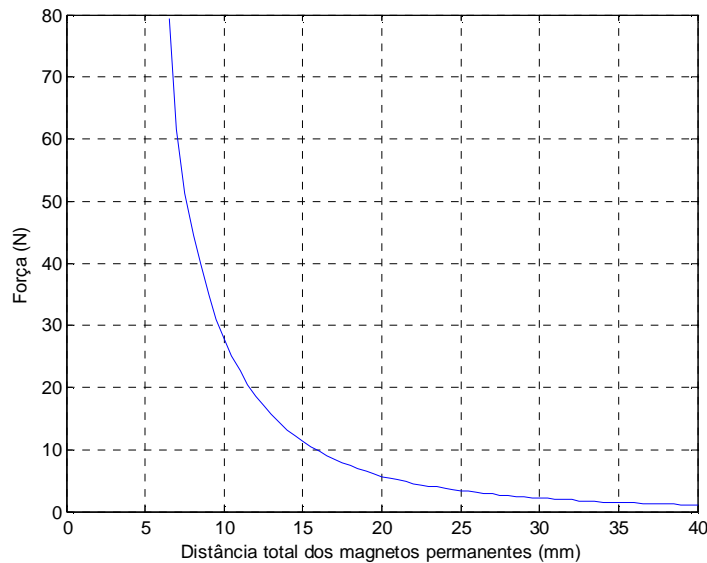


Figura 2.12- Gráfico da força *versus* a distância total dos magnetos permanentes, de uma mola magnética composta por um magneto fixo e um magneto móvel (simulação noAnexo4).

2.2.4- Mola magnética composta por um magneto permanente fixo e por uma estrutura tipo sanduíche

Este tipo de mola magnética é composto por um magneto permanente e por uma estrutura tipo sanduíche, constituída por dois magnetos axialmente magnetizados em ambas as extremidades e uma peça de material magnético macio entre os magnetos, colocados verticalmente no interior de um tubo cilíndrico [27].

Observando a figura 2.13, tem-se um magneto permanente fixo no fundo do tubo cilíndrico, enquanto a estrutura sanduíche pode mover-se livremente. Sendo que as faces do magneto e da estrutura sanduíche que se encontram voltadas uma contra a outra têm a mesma polarização, de modo a se repelirem [27].

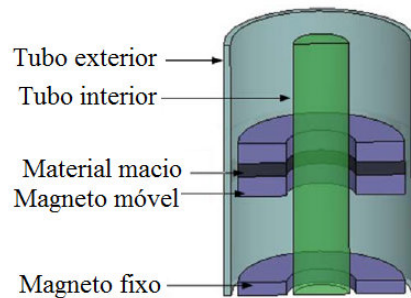


Figura 2.13- Estrutura da mola magnética [27].

Na figura 2.14 pode observar-se que a densidade de fluxo é muito maior na estrutura sanduíche do que num único magneto. A espessura do material macio influencia fortemente a distribuição do campo magnético [27].

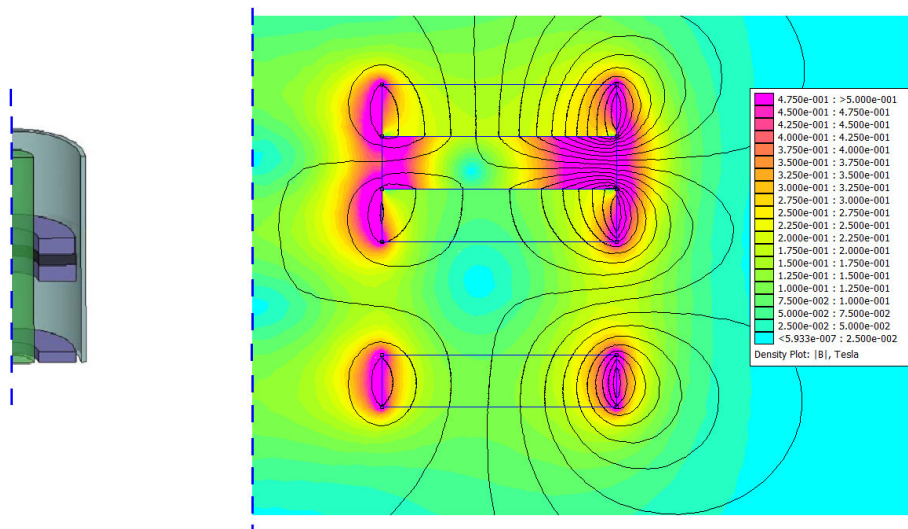


Figura 2.14 - Distribuição da densidade de fluxo e linhas de fluxo da mola magnética composta por um magneto fixo e por uma estrutura tipo sanduíche móvel.

Na figura 2.15 pode observar-se o gráfico da força *versus* a distância entre o magneto fixo e a estrutura tipo sanduíche móvel. Quanto menor for a distância entre o magneto fixo e a estrutura tipo sanduíche, maior será a força de repulsão entre os dois.

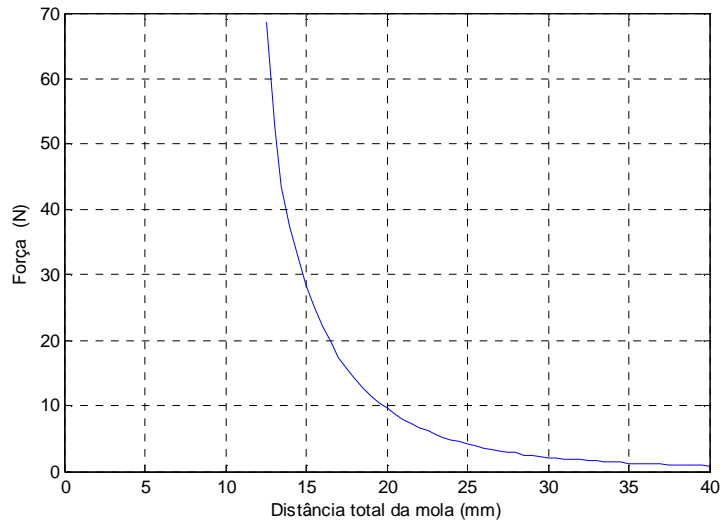


Figura 2.15 - Gráfico da força *versus* a distância total da mola, de uma mola magnética composta por um magneto permanente fixo e uma estrutura tipo sanduíche móvel (simulação noAnexo5).

2.3 - Geração de energia elétrica

As molas magnéticas podem ser utilizadas para gerar energia elétrica. Por exemplo, a variação do campo magnético devido à oscilação da mola, pode induzir uma força eletromotriz numa bobina de condutor. Outra forma de obter energia elétrica é através da associação da mola magnética com um gerador linear.

De acordo com a lei de Faraday, a força eletromotriz pode ser representada pela expressão (2.1).

$$\varepsilon = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.1)$$

onde,

ε representa a força eletromotriz induzida;

$\Delta\Phi$ representa a variação do fluxo magnético;

Δt representa a variação do tempo.

Em seguida são apresentados alguns exemplos de geração de energia elétrica com molas magnéticas. Os exemplos mostram bobinas de material condutor envolvendo as molas magnéticas e o acoplamento de um gerador linear à mola.

2.3.1 - Geração de energia elétrica com uma mola magnética composta por dois magnetos fixos e um magneto central móvel

Na figura 2.16 encontra-se esquematizado um tipo de mola magnética capaz de gerar energia elétrica. Este tipo de mola é composto por dois magnetos fixos, um em cada extremidade do tubo exterior e um magneto central móvel. Uma bobina enrolada em torno do tubo exterior complementa o sistema de geração de energia elétrica.

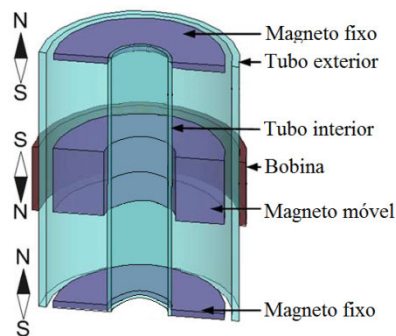


Figura 2.16 - Geração de energia elétrica com uma mola magnética composta por dois magnetos fixos e um magneto central móvel[26].

Utilizando o *FEMM*, foi possível observar o valor médio da indução eletromagnética para três pontos diferentes do magneto móvel. Como se pode observar na figura 2.17 a), a distância entre o magneto móvel e a sua posição de repouso corresponde a **-16.5 mm**, com uma indução eletromagnética na bobina, cerca de **-0.0188T**. Na figura 2.17 b), o magneto móvel encontra-se a igual distância de ambos os magnetos fixos, tendo uma indução eletromagnética de aproximadamente zero. E, na figura 2.17 c), o valor médio da indução eletromagnética é cerca de **0.0188T**, com o magneto móvel a uma distância de **16.5 mm** da sua posição de repouso.

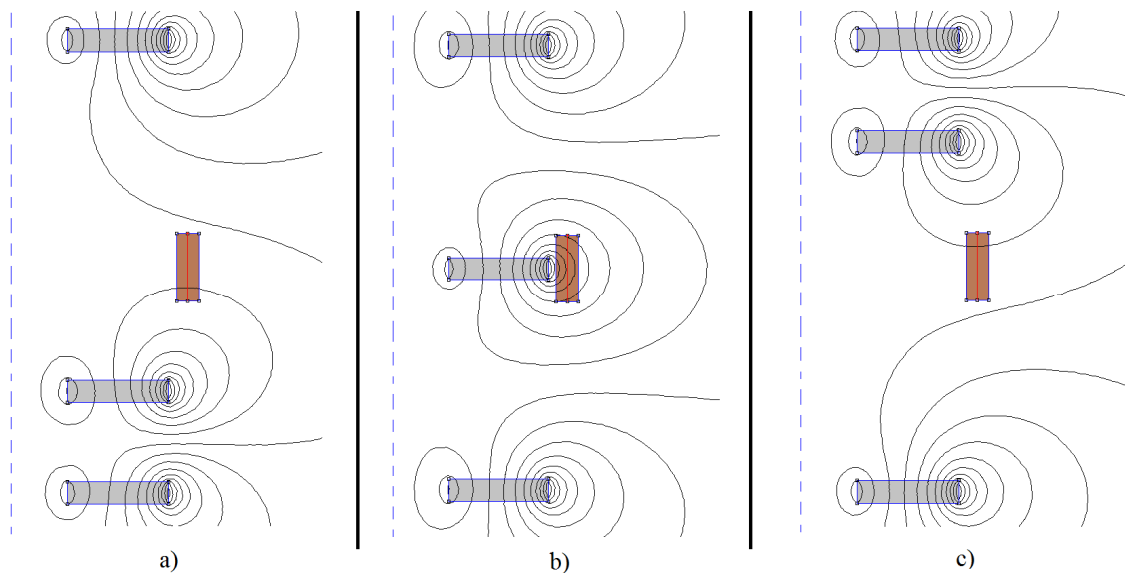


Figura 2.17- Valor do fluxo para três pontos diferentes do magneto móvel: a) -16.5mm; -0.0188T; b) 0mm; 0T; c) 16.5mm; 0.0188T.

Na figura 2.18 pode observar-se que o magneto central móvel ao se movimentar, irá gerar uma variação da indução magnética. Sendo assim, pode-se afirmar que este tipo de mola magnética é capaz de gerar força eletromotriz.

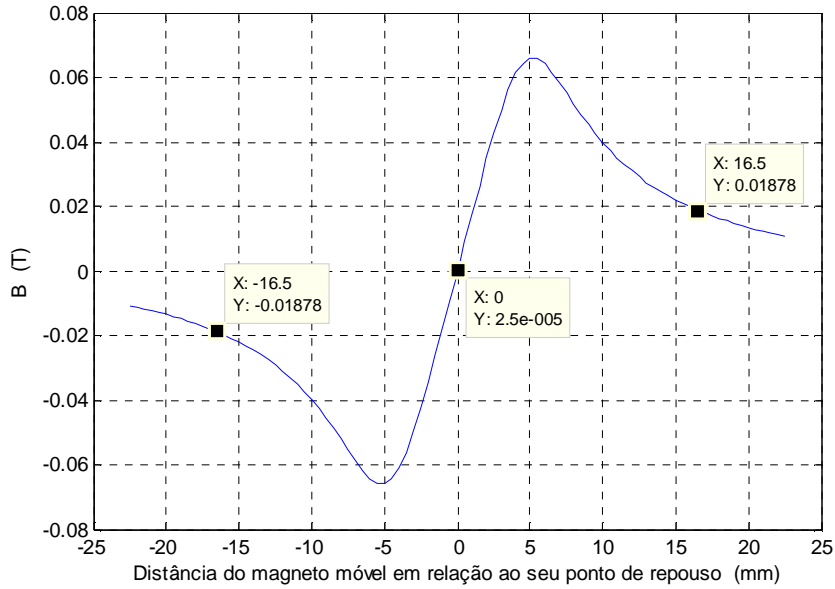


Figura 2.18 - Variação da indução eletromagnética média em relação à distância do magneto móvel.

2.3.2 - Geração de energia elétrica com uma mola magnética composta por um magneto fixo e um magneto móvel

Pela figura 2.19 pode observar-se a estrutura de um sistema de geração de energia elétrica, constituído por um tubo exterior, um tubo interior, uma mola magnética e uma bobina colocada em torno do tubo exterior.

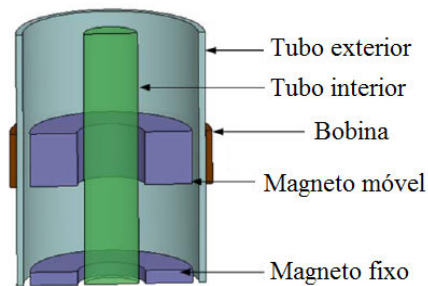


Figura 2.19 - Geração de energia elétrica com uma mola magnética composta por um magneto fixo e um magneto móvel[27].

Na figura 2.20 mostra-se o valor da indução eletromagnética para duas posições diferentes do magneto móvel, recorrendo à ferramenta de simulação *FEMM*. Na figura 2.20 a), a distância total dos magnetos corresponde a **11.5 mm**, com um valor médio de indução eletromagnética de cerca de **-0.0262 T**. Na figura 2.20 b), os magnetos encontram-se a uma distância total de **23.5 mm**, onde a indução eletromagnética tem o valor de **0.0589 T**.

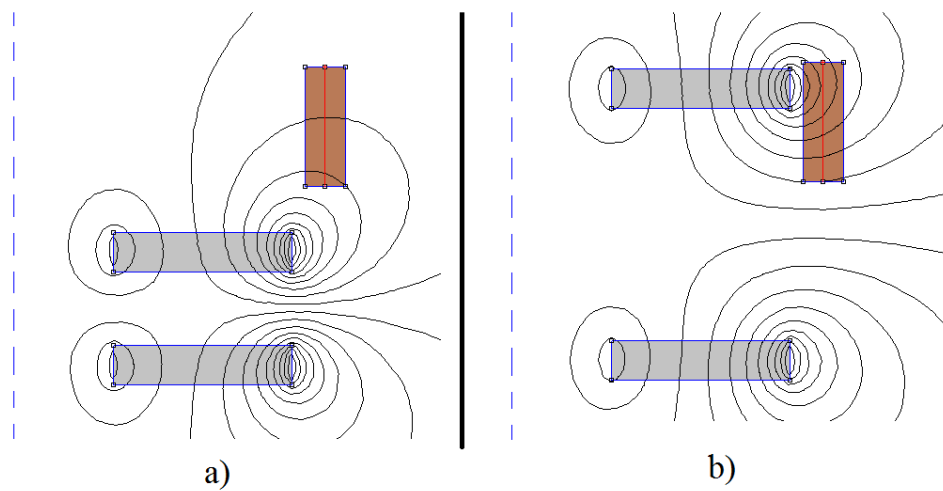


Figura 2.20- Valor do fluxo para dois pontos diferentes do magneto móvel: a) 11.5mm; -0.0262T; b) 23.5mm; 0.0589T.

No gráfico da figura 2.21 pode observar-se o comportamento da indução eletromagnética média em relação à distância total dos magnetos. Quando o magneto móvel se encontra a meio da bobina, o valor médio da indução eletromagnética na bobina será zero. Caso o magneto sofra um movimento vertical, irá produzir uma força eletromotriz devido à variação da indução eletromagnética.

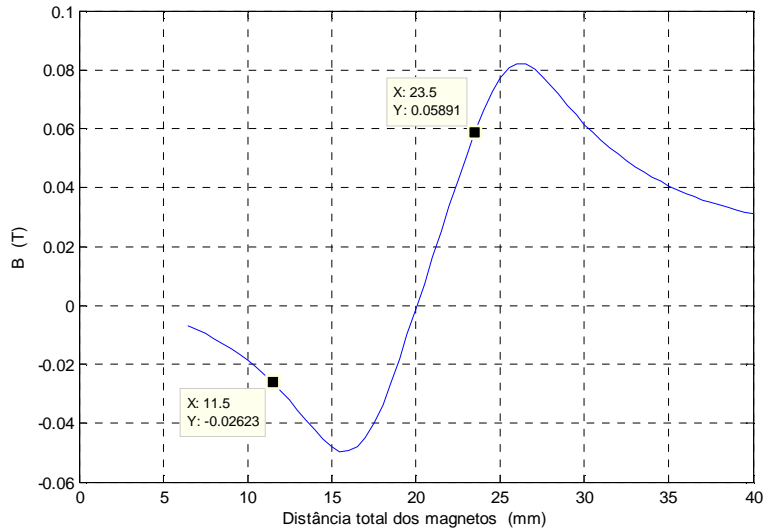


Figura 2.21- Variação da indução eletromagnética média em relação à distância total dos magnetos.

2.3.3 - Geração de energia elétrica com uma mola magnética composta por um magneto permanente fixo e por uma estrutura sanduíche

Na figura 2.22 é mostrado um sistema de geração de energia elétrica composto por um magneto fixo na extremidade inferior do tubo exterior, uma estrutura tipo sanduíche, já descrita anteriormente na secção 2.2.4, capaz de se movimentar verticalmente, e uma bobina em torno do tubo exterior.

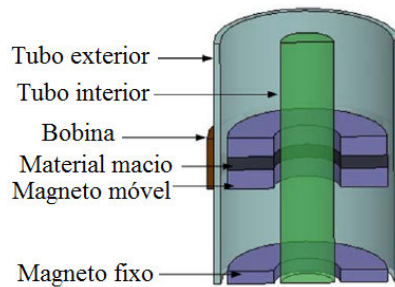


Figura 2.22- Geração de energia elétrica com uma mola magnética composta por um magneto permanente fixo e por uma estrutura em sanduíche[27].

Na figura 2.23 a), a distância total da mola (estrutura tipo sanduíche e magneto fixo) corresponde a **18.5 mm**, apresentando um valor médio de indução eletromagnética de cerca de **0.034 T**. Na figura b) tem-se uma indução eletromagnética de **-0.115 T**, a uma distância total de **25 mm**.

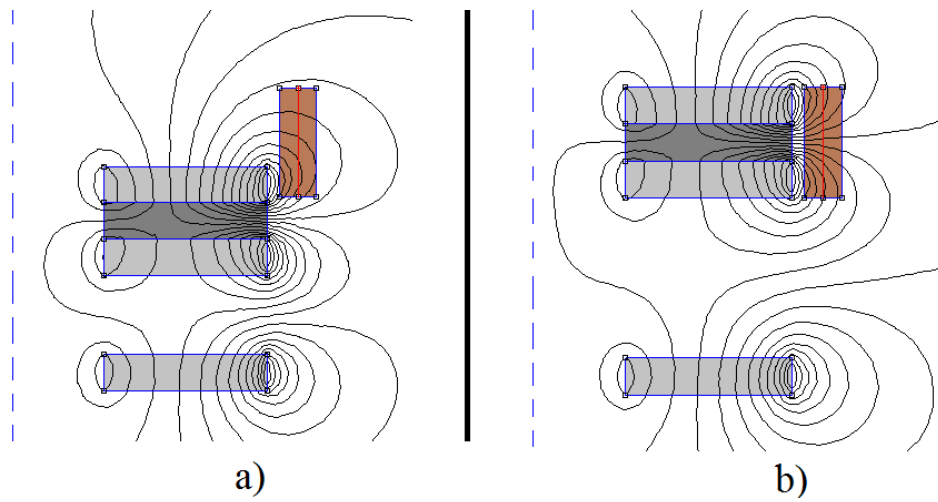


Figura 2.23- Valor do fluxo para dois pontos diferentes do magneto móvel: a) 18.5mm; 0.034T; b) 25mm; -0.115T.

No gráfico da figura 2.24 é mostrada a variação da indução eletromagnética em função da distância total dos magnetos. Este gráfico apresenta uma estrutura diferente dos gráficos apresentados na secção 2.3, uma vez que utiliza uma estrutura tipo sanduíche. Neste tipo de geração de energia elétrica, o valor máximo da indução eletromagnética (em módulo) será quando a bobina captar ambos os campos magnéticos dos dois magnetos da estrutura sanduíche. Caso, passe pela bobina apenas um dos campos magnéticos de um magneto da estrutura sanduíche, o valor médio da indução eletromagnética será zero.

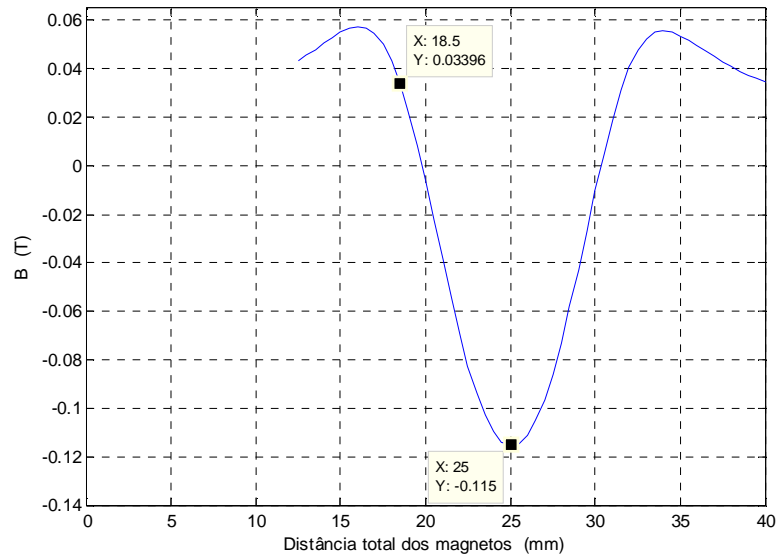


Figura 2.24- Variação da indução eletromagnética média em relação à distância total dos magnetos.

2.3.4 - Geração de energia elétrica com um gerador linear acoplado a uma mola magnética

Na figura 2.25 mostra-se um sistema de geração de energia elétrica utilizando um gerador linear acoplado a uma mola magnética. No interior de uma boia encontra-se um gerador linear de magnetos permanentes e uma mola magnética. O sistema de excitação magnética é composto por magnetos permanentes e desliza ao longo de um veio central, devido ao movimento das ondas. A sua oscilação é garantida através da mola magnética.

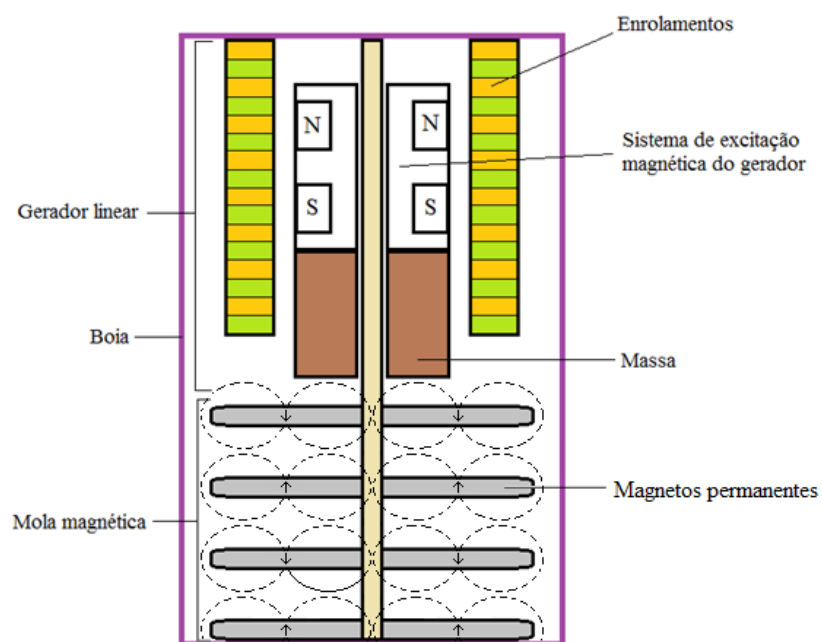


Figura 2.25- Geração de energia elétrica com um gerador linear acoplado a uma mola magnética.

Este tipo de sistema de geração de energia é descrito em J. Ribeiro 2010 [2].

Capítulo 3 - Simulação numérica

O sistema proposto para a geração de energia elétrica a partir da energia das ondas é composto por um elemento flutuador, boia, que contém todos os elementos necessários para a conversão de energia mecânica em energia elétrica, nomeadamente um gerador linear e uma mola magnética.

A mola magnética que se encontra acoplada ao gerador, pode ser constituída por dois ou mais magnetos. Neste capítulo, foram simulados quatro tipos de molas magnéticas, cada um com diferente número de magnetos permanentes.

De modo a realizar a simulação do sistema proposto, utilizando o *Simulink*, foi criado o modelo dinâmico, do qual foram extraídas as equações do sistema.

3.1 - Simulação de molas magnéticas

A mola magnética pode ser composta por dois ou mais magnetos permanentes. Ao longo da secção 3.1 encontram-se descritas algumas diferenças devido ao diferente número de magnetos permanentes existentes em cada mola magnética.

Na figura 3.1 encontram-se representadas quatro molas magnéticas, com diferente número de magnetos permanentes, sendo que todos os magnetos possuem as mesmas dimensões.

A mola magnética representada na figura 3.1 a) é composta por dois magnetos permanentes, encontrando-se um deles fixo e o outro podendo movimentar-se verticalmente. Este tipo de mola magnética foi apresentado anteriormente na secção 2.2.3, tendo-se obtido o gráfico da força *versus* a distância total dos magnetos permanentes, na figura 2.12.

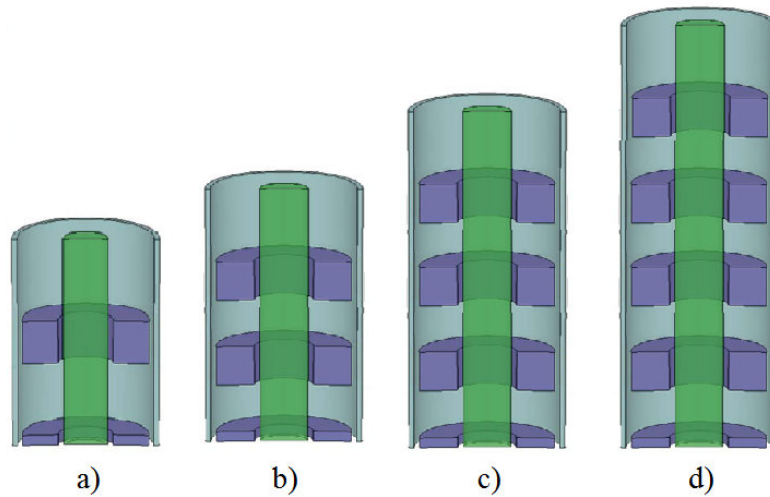


Figura 3.1 – Representação das molas magnéticas: a) dois magnetos; b) três magnetos; c) quatro magnetos; d) cinco magnetos.

Na figura 3.1 b) é mostrada uma mola magnética com dois magnetos móveis e um magneto fixo. Pela figura 3.2 pode observar-se a distribuição do campo magnético neste tipo de mola magnética.

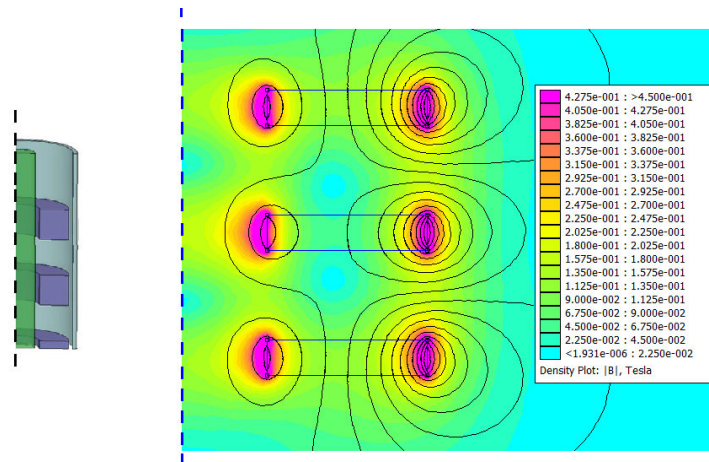


Figura 3.2 – Distribuição do campo magnético da mola magnética composta por três magnetos.

Na figura 3.3 encontra-se representado o gráfico da força *versus* a distância total dos magnetos para a mola magnética composta por três magnetos permanentes.

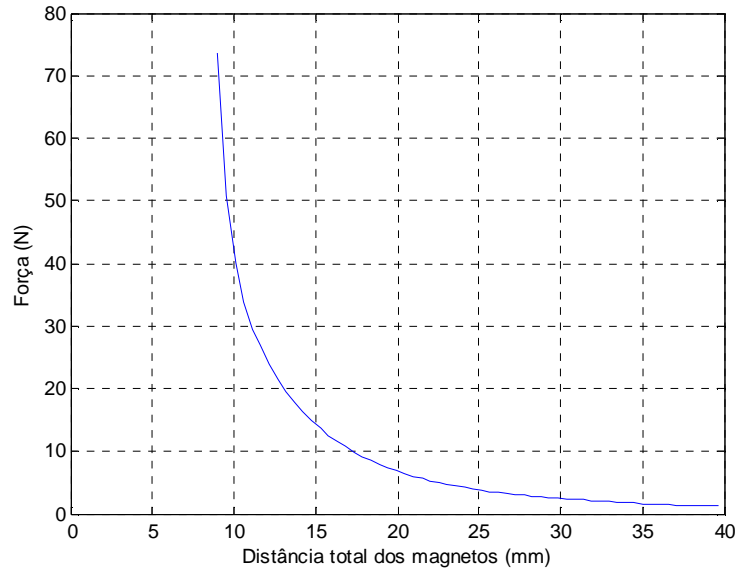


Figura 3.3 – Gráfico da força *versus* a distância total dos magnetos, para a mola magnética composta por dois magnetos móveis e um magneto fixo.

Para a mola magnética composta por um magneto fixo e três magnetos móveis, figura 31 c), obteve-se o gráfico da figura 3.4

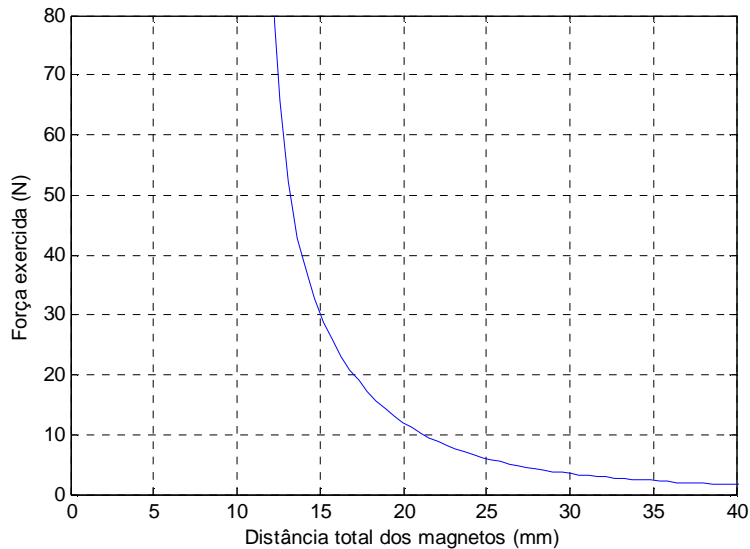


Figura 3.4 – Gráfico da força *versus* a distância total dos magnetos, para a mola magnética composta por três magnetos móveis e um magneto fixo.

Por último, na figura 3.5 encontra-se o gráfico da força *versus* a distância total dos magnetos, da mola magnética constituída por quatro magnetos móveis e um magneto fixo, figura 31 d).

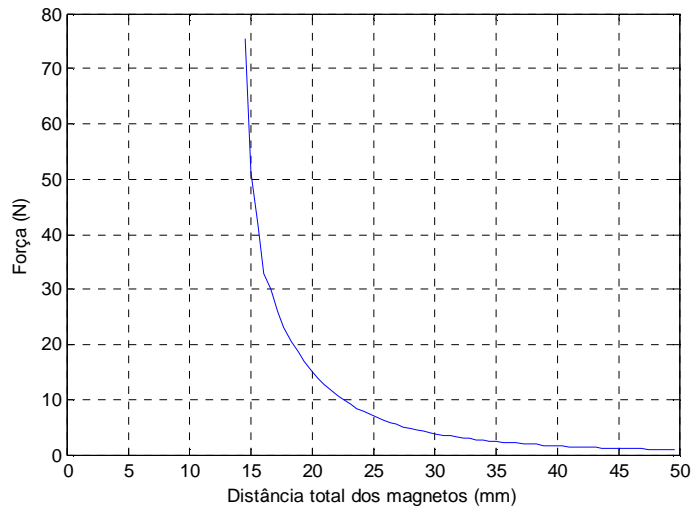


Figura 3.5 – Gráfico da força *versus* a distância total dos magnetos, para a mola magnética composta por quatro magnetos móveis e um magneto fixo.

De modo a se poder analisar a relação das molas magnéticas com diferente número de magnetos permanentes, juntou-se os gráficos das figuras 2.12, 3.3, 3.4 e 3.5 num único gráfico, figura 3.6.

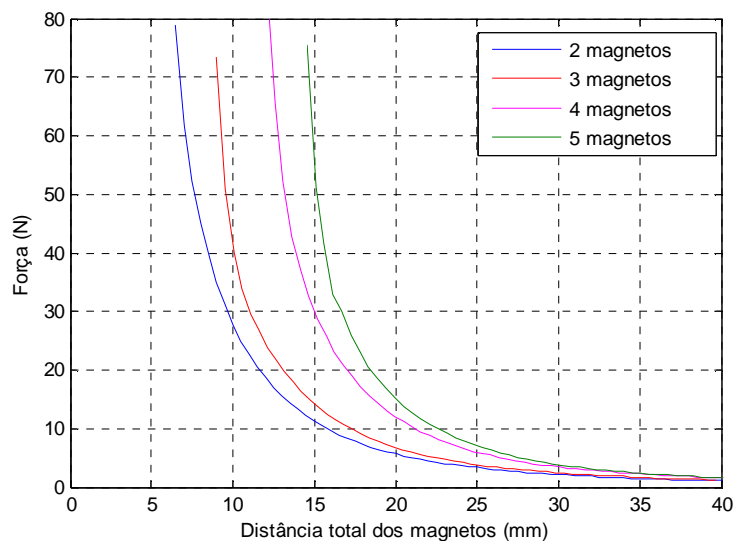


Figura 3.6 – Gráfico da força *versus* a distância entre os magnetos para os diferentes tipos de molas magnéticas simuladas neste capítulo.

Analisando as curvas do gráfico da figura 3.6, pode concluir-se que uma determinada força na mola magnética com dois magnetos permanentes, pode ser conseguida utilizando mais do que dois magnetos. Isto é, tendo mais magnetos permanentes é possível obter a mesma força para uma distância total dos magnetos maior.

3.2 - Modelo dinâmico do sistema

O sistema proposto para a conversão de energia elétrica a partir da energia das ondas é composto por um gerador linear acoplado a uma mola magnética, inserido num elemento flutuador, boia.

Na figura 3.7 é mostrado o esquema do modelo do sistema proposto. Observando a figura 3.7 e considerando como referência dos deslocamentos do sistema o nível médio da superfície da água (sem ondas), temos que: h_1 representa a altura relativa das ondas; h_2 o deslocamento relativo da boia; h_3 o deslocamento relativo do sistema de excitação do gerador; k_t representa o coeficiente de rigidez da força de impulsão exercida pela água sobre a boia; b_t representa o coeficiente de amortecimento hidrodinâmico; m_t representa a massa da boia; k_s representa o coeficiente de rigidez da mola magnética; F_g representa a força do gerador elétrico; m_s representa a massa móvel dentro da boia.

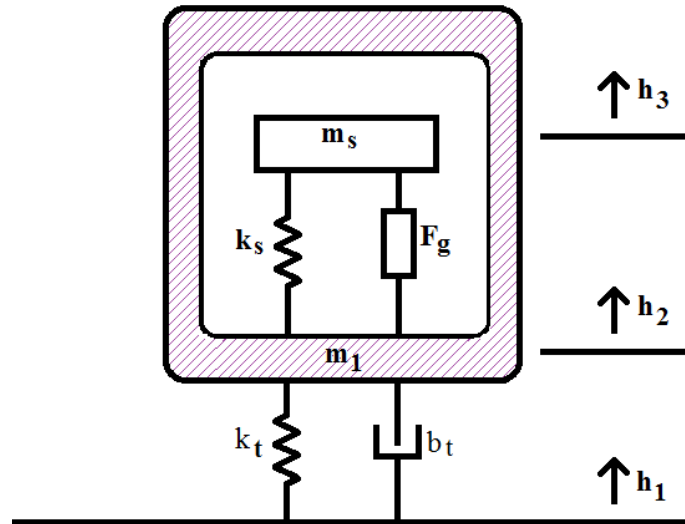


Figura 3.7 - Esquema do modelo do sistema.

3.3 - Equações do sistema

De acordo com o modelo representado na figura 3.7, podem escrever-se as equações (3.1) e (3.2), considerando que o sistema apenas possui movimento vertical.

$$m_s \ddot{h}_3 = -k_s(h_3 - h_2) - F_g \quad (3.1)$$

$$m_1 \ddot{h}_2 = k_s(h_3 - h_2) + F_g - k_t(h_2 - h_1) - b_t(\dot{h}_2 - \dot{h}_1) \quad (3.2)$$

De modo a simplificar o sistema, considerou-se $k_s(h_3 - h_2) = F_s$, ficando com (3.3) e (3.4).

$$m_s \ddot{h}_3 = -F_s - F_g \quad (3.3)$$

$$m_1 \ddot{h}_2 = F_s + F_g - k_t(h_2 - h_1) - b_t(\dot{h}_2 - \dot{h}_1) \quad (3.4)$$

Como variáveis de estado, foram consideradas as equações (3.5) a (3.8).

$$x_1 = h_2 \quad (3.5)$$

$$x_2 = h_3 \quad (3.6)$$

$$x_3 = \dot{h}_2 - \frac{b_t}{m_t} h_1 \quad (3.7)$$

$$x_4 = \dot{h}_3 \quad (3.8)$$

Derivando as variáveis de estado (3.5) a (3.8) obtiveram-se as equações (3.9) a (3.12).

$$\dot{x}_1 = \dot{h}_2 = x_3 + \frac{b_t}{m_1} h_1 \quad (3.9)$$

$$\dot{x}_2 = \dot{h}_3 = x_4 \quad (3.10)$$

$$\dot{x}_3 = \ddot{h}_2 - \frac{b_t}{m_1} \dot{h}_1 \quad (3.11)$$

$$\dot{x}_4 = \ddot{h}_3 \quad (3.12)$$

Considerando como variáveis de entrada, a altura relativa das ondas, a força do gerador e a força da mola, respetivamente, tem-se (3.13) a (3.15).

$$u_1 = h_1 \quad (3.13)$$

$$u_2 = F_g \quad (3.14)$$

$$u_3 = F_s \quad (3.15)$$

Nas equações (3.3) e (3.4), colocando os termos de segunda ordem no lado esquerdo e simplificando as equações, obtiveram-se as expressões (3.16) e (3.17).

$$\ddot{h}_3 = -\frac{F_s}{m_s} - \frac{F_g}{m_s} \quad (3.16)$$

$$\ddot{h}_2 = \frac{F_s}{m_1} + \frac{F_g}{m_1} - \frac{k_t}{m_1} h_2 + \frac{k_t}{m_1} h_1 - \frac{b_t}{m_1} \dot{h}_2 + \frac{b_t}{m_1} \dot{h}_1 \quad (3.17)$$

Substituindo as variáveis de estado e de entrada nas equações (3.16) e (3.17), e colocando o termo de primeira ordem de h_1 do lado esquerdo da equação, em (3.17), obtém-se as expressões (3.18) e (3.19).

$$\dot{x}_4 = -\frac{1}{m_s} u_3 - \frac{1}{m_s} u_2 \quad (3.18)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{m_1} u_3 + \frac{1}{m_1} u_2 - \frac{k_t}{m_1} x_1 + \frac{k_t}{m_1} u_1 - \frac{b_t}{m_1} x_3 - \frac{b_t^2}{m_1^2} u_1 \quad (3.19)$$

Simplificando e ordenando as equações (3.18) e (3.19), tem-se (3.20) e (3.21).

$$\dot{x}_4 = -\frac{1}{m_s} u_2 - \frac{1}{m_s} u_3 \quad (3.20)$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{k_t}{m_1} x_1 - \frac{b_t}{m_1} x_3 + \left(\frac{k_t}{m_1} - \frac{b_t^2}{m_1^2} \right) u_1 + \frac{1}{m_1} u_2 + \frac{1}{m_1} u_3 \quad (3.21)$$

Tendo as várias equações que descrevem o sistema no espaço de estados, podem escrever-se as equações (3.9), (3.10), (3.20) e (3.21) em forma de matriz, tal como se encontra em (3.22).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_t}{m_1} & 0 & -\frac{b_t}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{b_t}{m_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{k_t}{m_1} - \frac{b_t^2}{m_1^2}\right) & \frac{1}{m_1} & \frac{1}{m_1} \\ 0 & -\frac{1}{m_s} & -\frac{1}{m_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

A matriz representada em (3.22), permitiu efetuar a simulação do sistema em ambiente *MATLAB*, com recurso ao *Simulink*.

3.4 - Dimensionamento da boia

O dimensionamento da boia foi efetuado em J. Ribeiro 2010 [2], onde se encontram descritas todas as relações, parâmetros e equações necessárias.

Para o sistema proposto, os valores considerados para o correto funcionamento da simulação do sistema no *Simulink* encontram-se na tabela II.

Tabela II- Parâmetros definidos para o dimensionamento da boia		
Coeficiente de rigidez da força de impulsão exercida pela água sobre a boia	k_t	6673.21N/m
Coeficiente de amortecimento hidrodinâmico	b_t	2368.21Nm ⁻¹ s ⁻¹
Comprimento total da boia	l	0.9m
Diâmetro da boia	D	0.85m
Massa da boia	m_1	360kg
Massa móvel dentro da boia	m_s	48kg

3.5 - Implementação do modelo dinâmico do sistema

De modo a poder fazer a implementação do sistema no *Simulink* foi necessária a equação de estado e as dimensões do sistema, apresentadas anteriormente na secção 3.3 e 3.4, respetivamente.

Para a implementação do sistema foi considerada a mola magnética composta por quatro magnetos permanentes, representada anteriormente na secção 3.1.

No modelo descrito no *Simulink* utilizou-se a equação de estado definida em (3.22). As entradas u_1 , u_2 e u_3 representam, respetivamente os valores de h_1 , F_g e F_s . As saídas, y_1 , y_2 , y_3 e y_4 do sistema representam respetivamente h_2 , h_3 , \dot{h}_2 e \dot{h}_3 e são definidas na equação de saída (3.23).

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

A equação dinâmica do sistema composta pela equação de estado (3.22) e pela equação de saída (3.23), em conjunto com as dimensões da boia permitiu simular o modelo dinâmico do sistema, com recurso ao *Simulink*.

Na figura 3.8 mostra-se o modelo dinâmico desenvolvido no *Simulink*. Trata-se de um modelo não linear dada a realimentação da força da mola, mostrada no gráfico da figura 3.9. O modelo comporta a geração de energia elétrica, com a respetiva força de oposição ao movimento produzida pelo gerador.

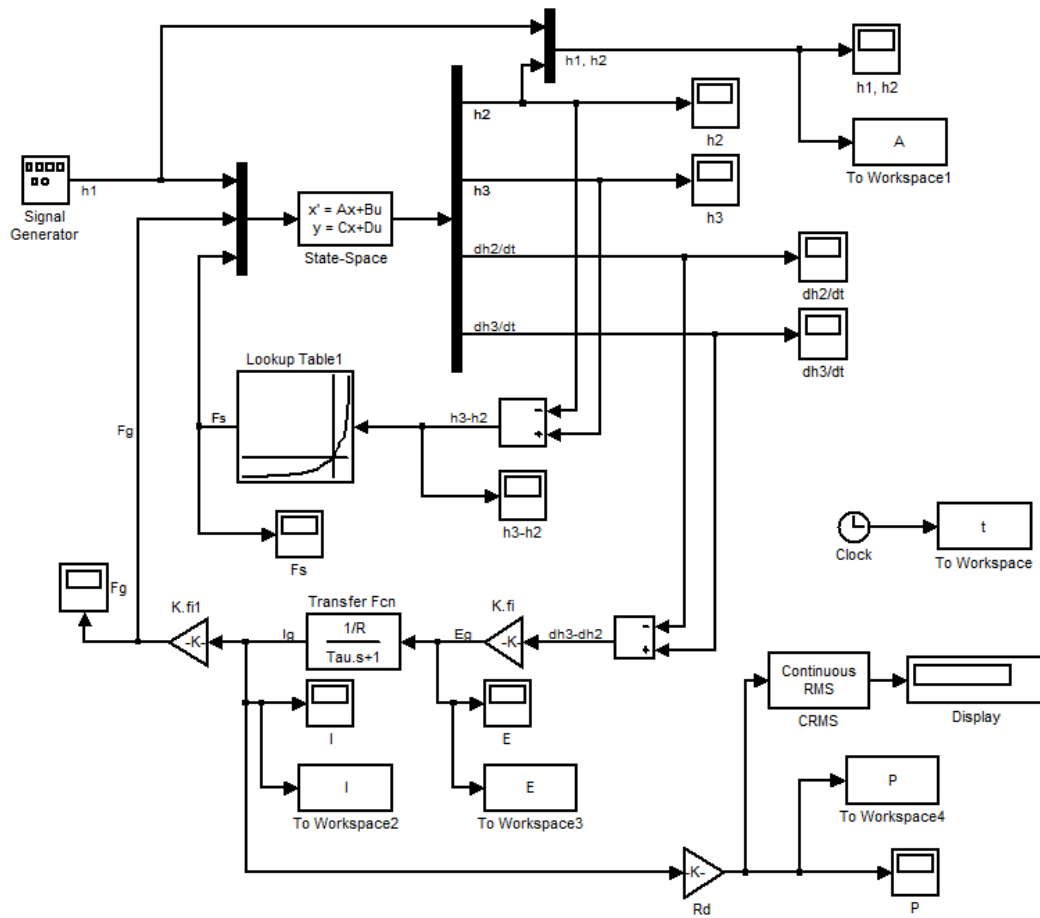


Figura 3.8 - Representação do modelo dinâmico do sistema no *Simulink*.

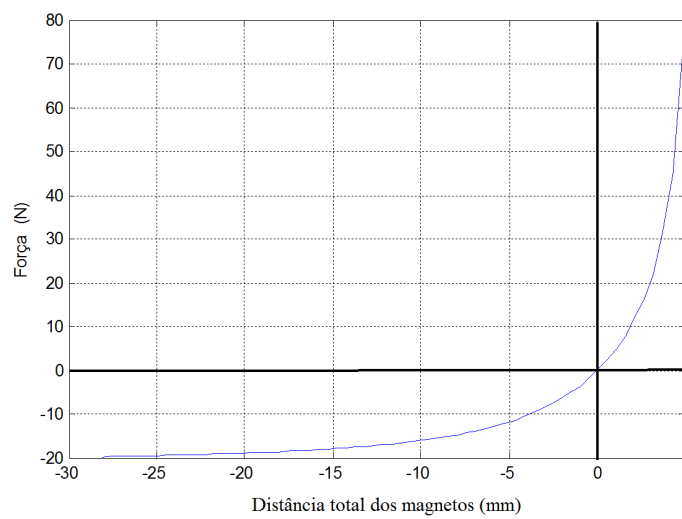


Figura 3.9 - Modelo não linear da força da mola.

Pela simulação do sistema, foi possível observar a relação entre a onda e a boia, a corrente, força e potência do gerador.

No gráfico da figura 3.10, encontra-se a relação entre a onda e a boia, onde pode observar-se que existe um pequeno desfasamento entre o deslocamento da onda e da boia.

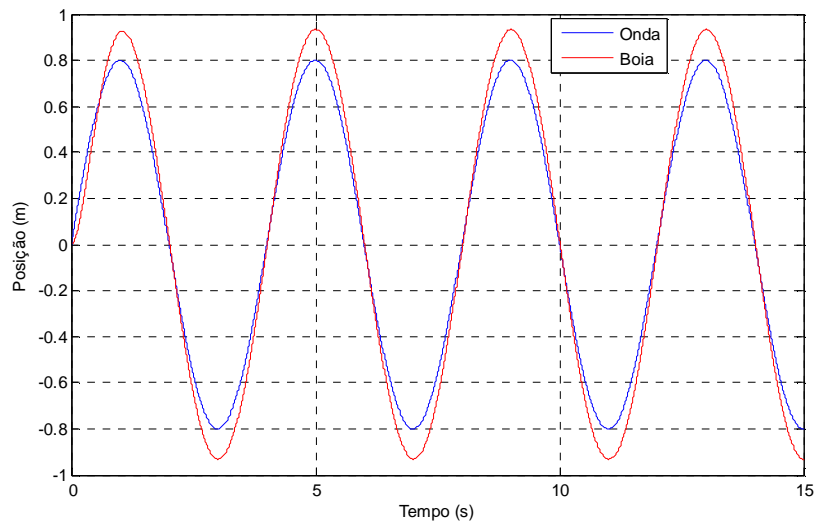


Figura 3.10 - Gráfico da relação entre a onda e a boia.

Pelo gráfico da figura 3.11 é possível observar a corrente produzida pelo gerador, tendo um valor de pico de cerca de **1.75A**.

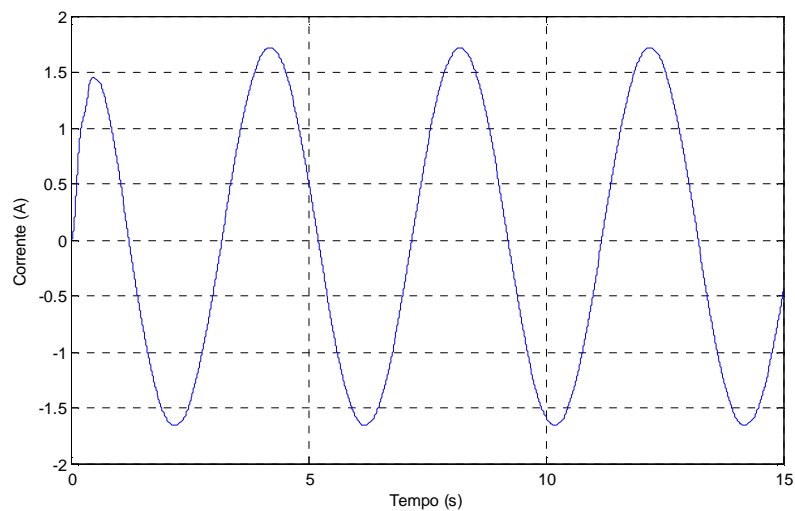


Figura 3.11 - Gráfico da corrente do gerador em função do tempo.

Pela simulação do sistema, obteve-se o gráfico da figura 3.12, que representa a potência do gerador, com um valor de pico a rondar os **400 W**.

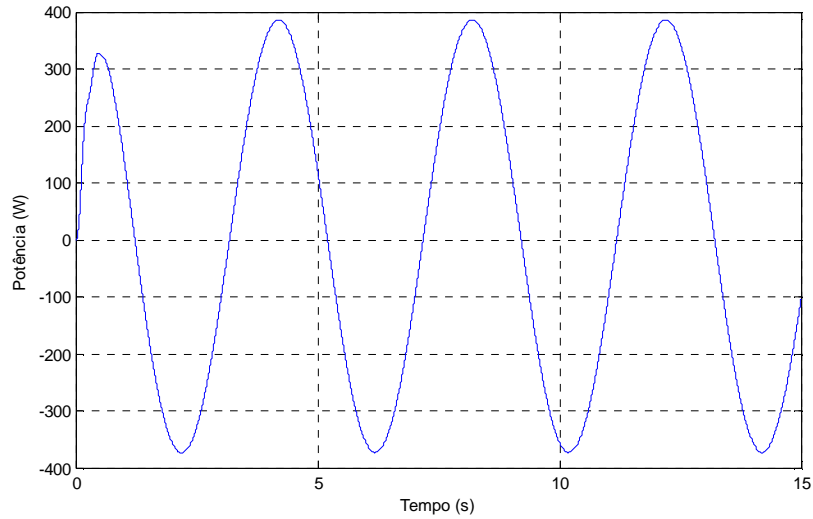


Figura 3.12 - Gráfico da potência do gerador em função do tempo.

Na figura 3.13 encontra-se o gráfico da força do gerador em função do tempo.

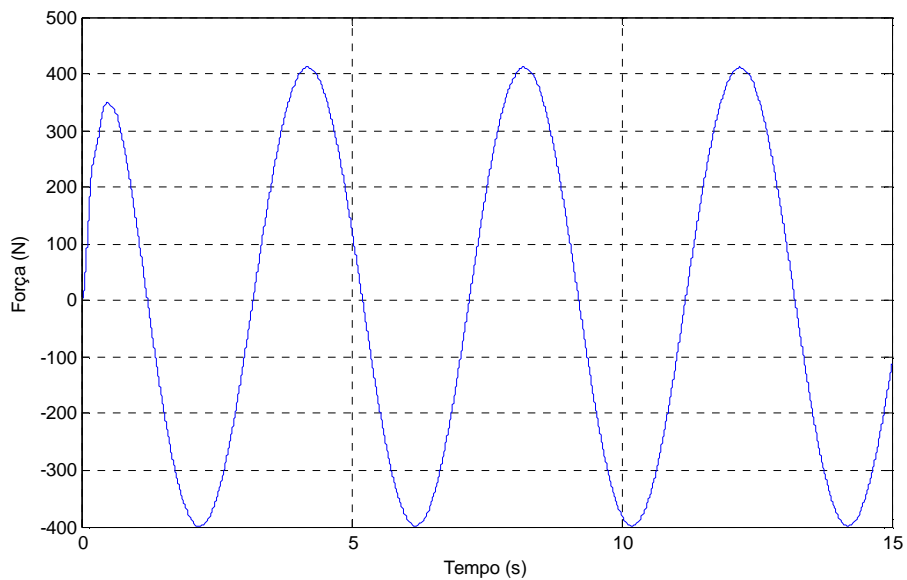


Figura 3.13 - Gráfico da força do gerador em função do tempo.

No gráfico da figura 3.14 encontra-se representada a força eletromotriz desenvolvida pelo gerador.

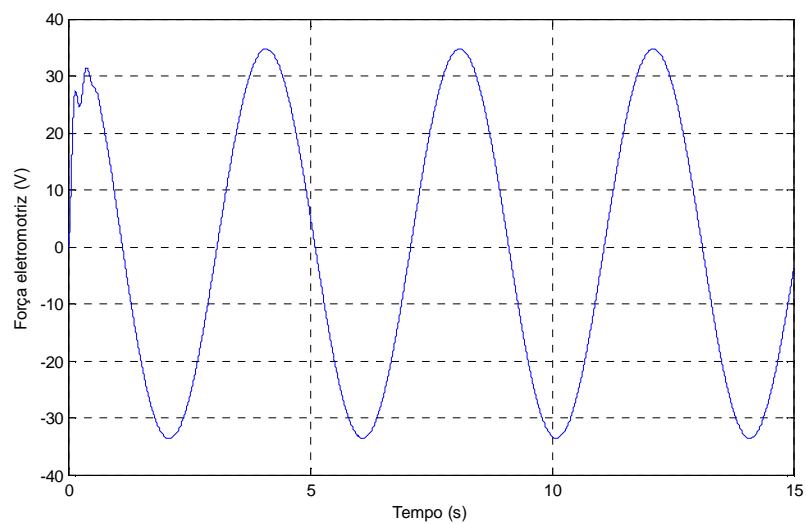


Figura 3.14 - Gráfico da força eletromotriz desenvolvida pelo gerador em função do tempo.

Capítulo 4 - Resultados experimentais

De modo a comparar alguns dos resultados teóricos com os práticos, criou-se um banco de ensaio, o que permitiu observar o comportamento da força e da distância dos magnetos permanentes em função do peso colocado em cima dos mesmos. Tendo sido criada uma tabela com todos os valores obtidos e um gráfico com a curva aproximada da relação da força com a distância total dos magnetos permanentes.

4.1 - Banco de ensaio

Para a elaboração do protótipo utilizou-se um banco de ensaio constituído por uma balança, figura 4.1, vários pesos diferentes, uma estrutura para medir o deslocamento, figura 4.3, e uma mola magnética, figura 4.4. A mola magnética é composta por quatro magnetos permanentes, em que um deles se encontra fixo (magneto inferior) e os outros podem mover-se verticalmente pelo veio central.



Figura 4.1 - Balança.



Figura 4.3-Estrutura utilizada para medir o deslocamento.



Figura 4.4 - Mola magnética.

Na figura 4.4 mostra-se a mola magnética que foi utilizada na elaboração deste protótipo. As dimensões dos magnetos permanentes que constituem esta mola magnética encontram-se esquematizadas no Anexo 1.O veio central e a base são constituídos com material não magnético.

Na figura 4.5 pode observar-se o sistema montado.



Figura 4.5 - Banco de ensaio.

4.2 - Valores experimentais

Depois de montado o banco de ensaio, utilizou-se o procedimento descrito no Anexo 6, de modo a obter os valores que se encontram na tabela III.

Tabela III – Valores obtidos a partir do banco de ensaio	
Distância real total dos magnetos permanentes [mm]	Força [N]
20	-
24.5	88.2
38	58.114
45.5	37.24
56	21.178
68	17.209
92	10.339
107	7.938
119	6.125
153.5	4.214
180.5	2.94
206	-

4.3 - Análise dos resultados

Uma vez obtidos todos os valores necessários para a elaboração do gráfico da força *versus* a distância total dos magnetos, foi possível criar uma curva aproximada, tal como se pode observar na figura 4.6.

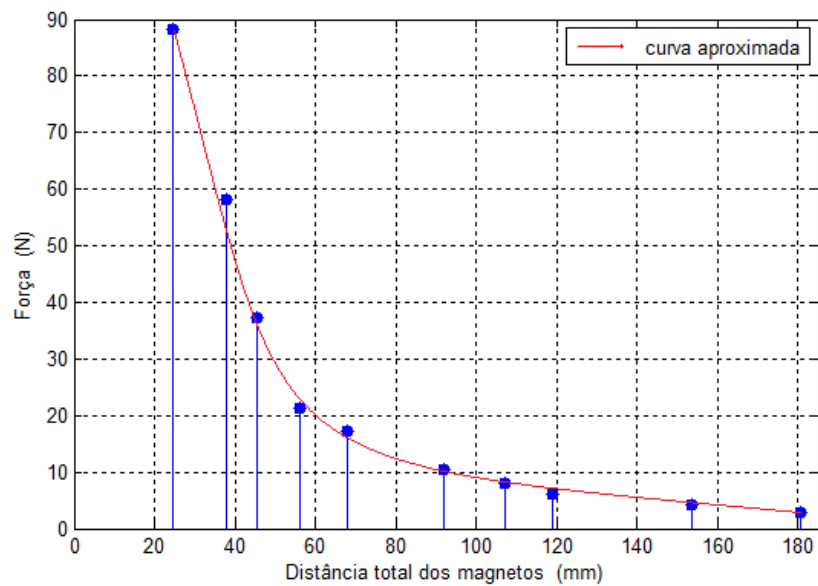


Figura 4.6 – Gráfico obtido pelo banco de ensaio.

Utilizando o programa de simulação de elementos finitos, *FEMM*, simulou-se o movimento dos magnetos permanentes, utilizando os mesmos magnetos usados no banco de ensaio. No gráfico da figura 4.7 encontra-se a curva da força em relação à distância total dos magnetos, simulada no *FEMM*.

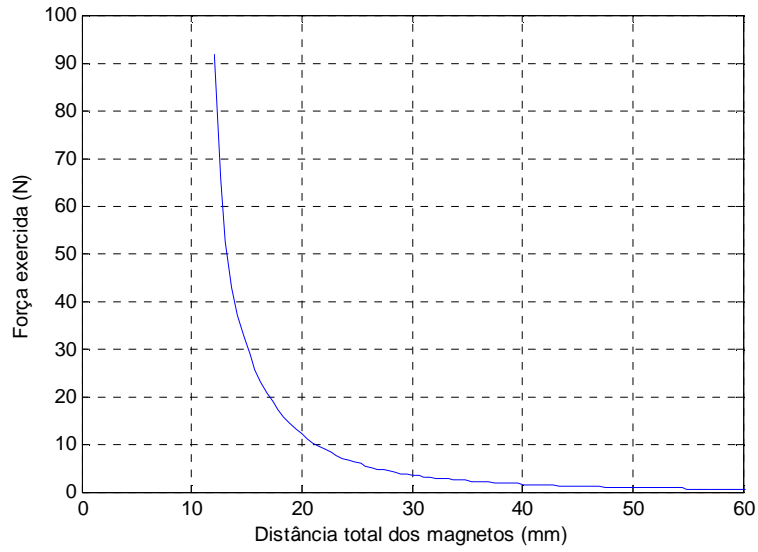


Figura 4.7 – Gráfico obtido pela simulação no *FEMM*.

Comparando os dois gráficos, o experimental e o simulado, pode observar-se que são bastante semelhantes, considerando que foi utilizado um sistema um pouco rudimentar, o que causou um número maior de erros de leitura.

Capítulo 5 - Conclusões e trabalhos futuros

Neste capítulo serão descritas as conclusões obtidas nesta dissertação, bem como as perspectivas para trabalho futuro.

5.1 - Conclusões Finais

Ao longo desta dissertação foi realizado um conjunto de procedimentos de modo a ser possível dimensionar um sistema capaz de aproveitar a energia de fontes renováveis, neste caso a energia das ondas, para conversão de energia elétrica, utilizando molas magnéticas. Foram também apresentadas algumas conclusões ao longo dos capítulos.

A mola magnética utilizada na simulação do sistema e no banco de ensaio é constituída por quatro magnetos permanentes de $NdFeB$. A relação entre a força e a distância total dos magnetos foi representada num gráfico, de onde se concluiu que quanto maior for a distância total dos magnetos menor será a força e *vice-versa*.

Em relação à geração de energia elétrica utilizando molas magnéticas, esta foi estudada na secção 2.3, retirando que é possível gerar energia elétrica a partir de um sistema composto por uma mola magnética envolvida por uma bobina de material condutor ou por um gerador linear acoplado à mola magnética.

Graças às ferramentas *MATLAB* e *FEMM* foi possível criar o modelo dinâmico do sistema.

Os resultados inerentes ao banco de ensaio foram os esperados, tal como se encontra descrito no final da secção 4.3.

5.2 - Trabalhos Futuros

Não sendo possível descrever pormenorizadamente todos os assuntos abordados na realização desta dissertação, é sugerido alguns tópicos como continuação deste trabalho:

- Melhorar o modelo dinâmico do sistema de modo a fazer uma simulação do sistema com ondas não lineares;
- Criar e testar um protótipo do sistema final;
- Aprofundar mais a geração de energia elétrica utilizando molas magnéticas, criando um modelo para cada caso, de modo a se poder simular o sistema no *Simulink*, *MATLAB*.

Bibliografia

- [1] - Danielsson, O.,2006. "Wave Energy Conversion - Linear Synchronous Permanent Magnet Generator". Ph.D.Thesis, Uppsala University, Uppsala. 102 pp.
- [2] - José Ribeiro, 2010. "Desenvolvimento de gerador linear de baixa velocidade para aplicação em conversor de energia renovável". Universidade do Algarve, Faro, Portugal. 220pp.
- [3] - European Commission, 2014. "*EU energy in figures – statistical pocketbook 2014*".Publications Office of the European Union, Luxembourg.263pp.
- [4] - Eurostat. <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>
- [5] - European Commission, 2015. "*2014 JRC Ocean Energy Status Report - Technology, market and economic aspects of ocean energy in Europe*". Publications Office of the European Union, Luxembourg. 70pp.
- [6] - Center for Renewable Energy Sources, 2006. "*Ocean Energy Conversion in Europe - Recent advancements and prospects*". CRES, Greece. 36pp.
- [7] - Fábio Branco, 2013. "Sistema de Aproveitamento da Energia das Ondas Oceânicas". Universidade do Algarve, Faro, Portugal, 113pp.
- [8] - WaveEnergyCenter, 2004. "Potencial e Estratégia de desenvolvimento da energia das ondas em Portugal". WEC, Portugal. 72pp.
- [9] - Rui Alexandre Aranda André, 2010. "Modelação de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas". Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 112pp.

- [10] - <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgVcMAB/maremotriz>
- [11] - <http://coastalenergyandenvironment.web.unc.edu/ocean-energy-generating-technologies/wave-energy/oscillating-water-column/>
- [12] - <http://science.howstuffworks.com/environmental/earth/oceanography/wave-energy2.htm>
- [13] - <http://www.slideshare.net/Ankititsme10/hydraulic-turbine-38865585>
- [14] - http://www.marbef.org/wiki/Wave_energy_converters
- [15] - SI OCEAN. "Ocean energy: State of the Art". European Ocean Energy Association. 78pp.
- [16] - http://en.openei.org/wiki/Marine_and_Hydrokinetic_Technology_Glossary
- [17] - A. Sarmiento e J. Cruz, 2004. "*Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais*". Instituto do Ambiente, Alfragide, 61pp.
- [18] - <http://www.wavec.org/>
- [19]- Sofia Patrício, André Moura, Teresa Simas, 2009. "Wave Energy and Underwater Noise: State of Art and Uncertainties". Wave Energy Centre, Lisbon, Portugal.
- [20] - Diretiva Quadro Estratégia Marinha, Outubro de 2012. "Estratégia Marinha para a subdivisão do Continente". Ministério da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território, 930pp.
- [21] - José Gonçalves, 2009/2010. *Sebenta de Electromagnetismo*. Universidade do Algarve, Faro, 216pp.

[22] - Benedito António Luciano, Sissi Alves da Silva. "SOBRE OS ÍMÃS PERMANENTES E SUAS APLICAÇÕES NA ELETRÔNICA". Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba.

[23] - Isménio Martins. "Desenvolvimento de Accionamentos Electromagnéticos para a Suspensão de Veículos Automóveis", Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, 2001.

[24] - David Meeker. "Finite Element Method Magnetics" - *FEMM* 4.2.

[25] - Kun-Xi Qian, Pei Zeng, Wei-Min Ru, Hai-Yu Yuan. "Novel Magnetic Spring and Magnetic Bearing", *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 39, NO. 1, JANUARY 2003.

[26] - Xiaoguang Yang, Bo Zhang, Jianguo Li, and Youhua Wang, "Model and Experimental Research on an Electromagnetic Vibration-Powered Generator With Annular Permanent Magnet Spring", *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, VOL. 22, NO. 3, JUNE 2012.

[27] - Xiaoguang Yang, Yingying Cao, Shan Liu, Youhua Wang, Guoya Dong, and Wenrong Yang, "Optimization Design of a Vibration-Powered Generator With Annular Permanent Magnetic Spring and Soft Magnetic Pole", *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, VOL. 24, NO. 3, JUNE 2014.

Anexos

Anexo 1- Construção e simulação de uma mola magnética, com dois magnetos permanentes, utilizando o *FEMM* por intermédio do *MATLAB*

De modo a ser fazer uma simulação da força *versus* a distância entre os magnetos, é necessário fazer um dimensionamento da mola magnética. Para tal, utilizou-se as dimensões representadas na figura A.1.

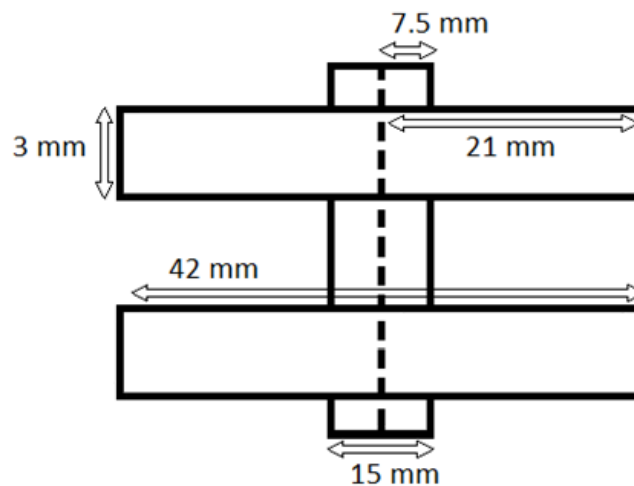


Figura A.1 - Dimensões dos magnetos permanentes.

Sabendo as dimensões dos magnetos permanentes, foi possível criar um modelo da mola magnética no *FEMM*. Foi utilizado o *MATLAB* para "controlar" o *FEMM*, por questões de facilidade na alteração dos dados.

Em seguida encontram-se os passos necessários, de modo a conseguir fazer-se a simulação da mola magnética.

Uma vez aberto o *MATLAB*, deve-se configurá-lo de modo a que este consiga "controlar" o *FEMM*. Na figura A.2 encontram-se exemplificados os passos a seguir.

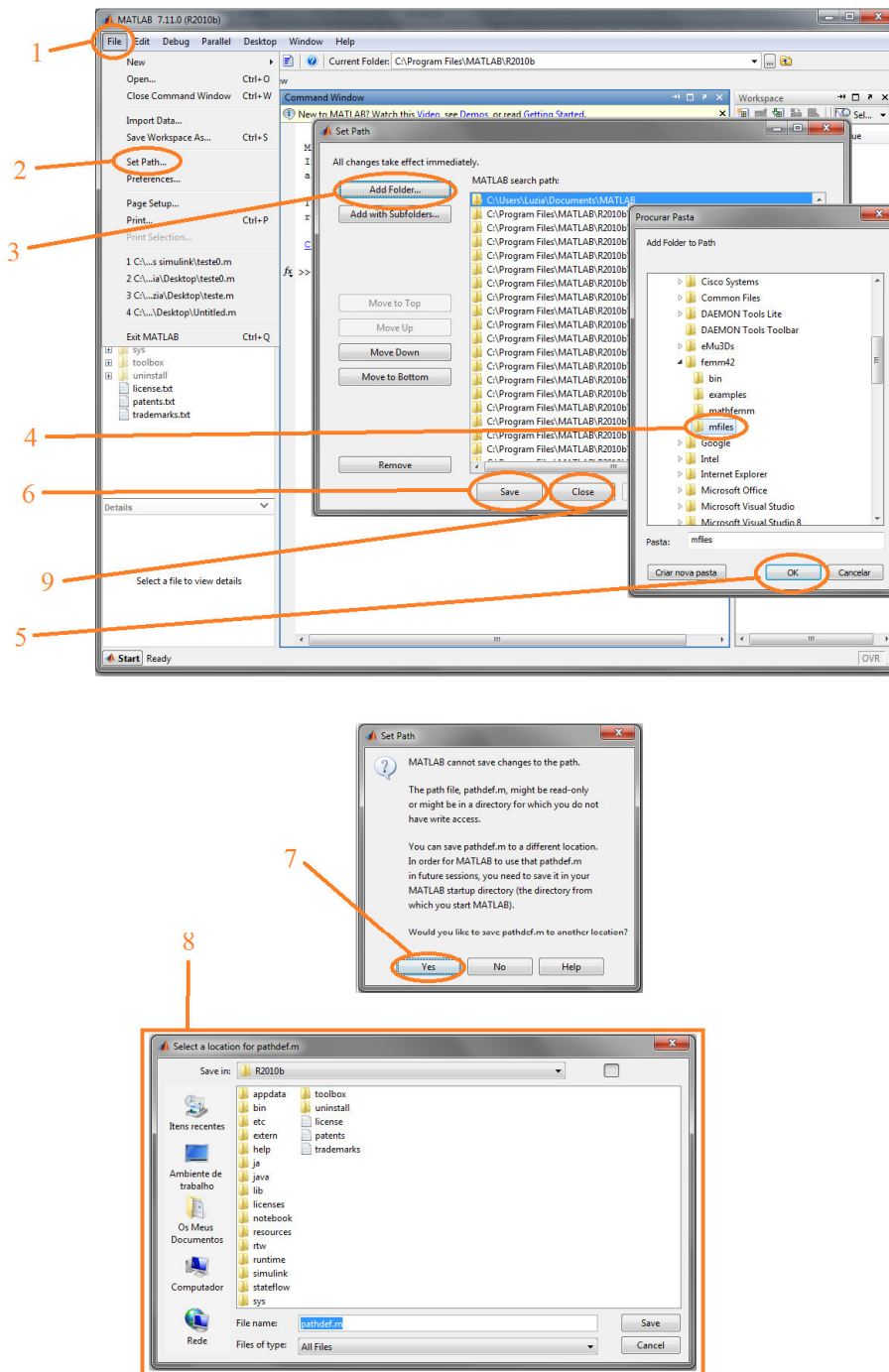


Figura A.2 - Esquema do processo de definição do *MATLAB*.

Tendo o *MATLAB* configurado, começa-se por abrir um novo script, sendo que os dois primeiros comandos servem limpar a consola do *MATLAB* e eliminar as variáveis que se encontram no workspace, respetivamente.

```
clc;
clearall;
```

A seguir escreve-se um comando que permita alterar a diretoria de trabalho, isto é, o local onde se pretende guardar o ficheiro, para isso utiliza-se o comando *cd('localização do ficheiro')*:

```
cd('C:\Users\Luzia\Desktop\Tese\MATLAB_femm');
```

Depois abre-se o *FEMM*, utilizando o seguinte comando:

```
openfemm;
```

Depois de aberto o *FEMM*, seleciona-se o tipo de problema, utilizando o comando *newdocument(tipoproblema)*. Na tabela A.I, encontra-se o argumento da função para cada tipo de problema existente.

Tabela A.I - Argumento da função para os diferentes tipos de problema.	
Tipo problema	Argumento da função
Problema Magnético	0
Problema de Eletrostática	1
Problema de Fluxo de Calor	2
Problema de Fluxo de Corrente	3

O tipo de problema a ser utilizado será do tipo magnético. Sendo assim, o argumento da função *newdocument()* que se utiliza é "0".

```
newdocument(0);
```

Uma vez criado o ficheiro, este pode ser gravado através do comando *mi_saveas('nome do trabalho.FEM')*, exemplo:

```
mi_saveas('Mola.FEM');
```

De seguida devem ser definidas as propriedades do problema, utilizando a função $mi_probdef(freq, 'unidades', 'tipo', precisão, prof, ângulo_min)$. Na tabela A.II, encontram-se explicados os argumentos da função.

Tabela A.II - Tipos de argumentos para a definição das propriedades do problema	
Freq (Frequência)	Frequência do problema em Hz Caso a corrente seja contínua, a frequência do problema será zero.
Unidades	Unidades utilizadas nas distâncias do problema: <ul style="list-style-type: none"> • 'inches' → polegadas • 'millimeters' → milímetros • 'centimeters' → centímetros • 'mils' → decímetros • 'meters' → metros • 'micrometers' → micrómetros
Tipo	Tipo de problema: <ul style="list-style-type: none"> • 'planar' → problema planar • 'axi' → problema axi-simétrico
Precisão	Precisão de resolução do problema: <ul style="list-style-type: none"> • 1e-8 → valor pré-definido
Prof (Profundidade)	Valor da profundidade: <ul style="list-style-type: none"> • 0 → caso seja um problema do tipo axi-simétrico
Ângulo_min	Ângulo interior mínimo dos triângulos da malha: <ul style="list-style-type: none"> • 30 → valor pré-definido

Utilizando os seguintes valores para cada argumento:

- Frequência zero;
- Unidades em milímetros;
- Tipo de problema axi-simétrico, pois os magnetos permanentes têm formato cilíndrico;
- Precisão com valor predefinido;
- Profundidade zero, pois o tipo de problema escolhido foi axi-simétrico;
- Ângulo mínimo pré-definido.

Sendo assim, a função que define as propriedades do problema fica com a seguinte forma:

```
mi_probdef(0, 'millimeters', 'axi', 1e-8, 0, 30);
```

Para alterar o espaçamento da grelha, utiliza-se o comando `mi_setgrid(distânciaentreosPontos, 'tipo grelha')`. Na tabela A.III encontram-se os dois tipos diferentes de grelha.

Tabela A.III - Tipos de grelha	
Tipo grelha	
Tipo cartesiano	'cart'
Tipo polar	'polar'

Ao escolher a distância da grelha de um milímetro e que o tipo de grelha seja cartesiano, tem-se o seguinte comando:

```
mi_setgrid(1, 'cart');
```

Tendo as propriedades do problema e o espaçamento da grelha definidos, deve-se criar o modelo da mola magnética, em que os magnetos permanentes são representados por retângulos. Como o tipo de problema escolhido foi o axi-simétrico, cria-se uma reta vertical a passar na origem, (0,0) de modo a facilitar o desenho. Utilizando para isso, a função `mi_addsegment(x1, y1, x2, y2)`, ficando:

```
mi_addsegment(0, -150, 0, 150);
```

De seguida desenha-se os retângulos que correspondem aos magnetos permanentes, sendo um deles fixo. Para criar os retângulos utiliza-se a função `mi_drawpolygon([x1, y1; x2, y2; ...])`, em que x₁ e y₁ representa um dos vértices do retângulo, x₂ e y₂ representa outro vértice do retângulo e por aí adiante. Sendo assim, e de acordo com a figura A.1, onde se encontram as dimensões dos magnetos, tem-se:

```
% magneto permanente fixo
mi_drawpolygon([7.5,0;21,0;21,3;7.5,3]);
% magneto permanente móvel
mi_drawpolygon([7.5,3.5;21,3.5;21,6.5;7.5,6.5]);
```

Uma vez criados os retângulos que representam os magnetos permanentes, deve-se delimitar o espaço de trabalho, utilizando novamente a função *mi_drawpolygon*($[x_1,y_1;x_2,y_2;\dots]$), tendo:

```
mi_drawpolygon([0,-150;150,-150;150,150;0,150]);
```

De modo a facilitar a movimentação do magneto permanente móvel, colocam-se todos os componentes inerentes a este no mesmo grupo (escolhendo por exemplo, grupo "1"), tais como os nós e os segmentos de reta. Para isso, são utilizados vários comandos.

Primeiro utiliza-se o comando *mi_seteditmode*('modo edição'), cuja função será de escolher o que se vai seleccionar, isto é, os vértices, segmentos de reta, entre outros.

Tabela A.IV - Tipos de modo de edição	
Modo de Edição	
Nós	'nodes'
Segmentos de reta	'segments'
Segmentos de arco	'arcsegments'
Legendas de blocos	'blocks'
Todos os elementos de um grupo	'group'

Começando pelos nós, e observando a tabela A.IV, o argumento da função *mi_seteditmode*(), que se utiliza é 'nodes', ficando com:

```
mi_seteditmode('nodes');
```

De seguida seleccionam-se os nós que se pretende colocar no grupo "1", isto é, os nós pertencentes ao magneto permanente móvel. Para isso utiliza-se a função *mi_selectnode(x,y)*. Como um retângulo tem quatro vértices, deve-se usar a função para cada um dos nós.

```
mi_selectnode(7.5,3.5);  
mi_selectnode(21,3.5);  
mi_selectnode(21,6.5);  
mi_selectnode(7.5,6.5);
```

De modo a colocar os quatro vértices seleccionados no grupo "1", utiliza-se o comando *mi_setnodeprop('nomeprop', número do grupo)*.

```
mi_setnodeprop(' <None> ',1);
```

Depois dos nós, é a vez dos segmentos de reta, utilizando o mesmo comando usado para os nós, mas com o argumento 'segments'.

```
mi_seteditmode(' segments ');
```

Para seleccionar os quatros segmentos de reta, utiliza-se o comando *mi_selectsegment(x,y)*, em que o argumento da função representa um ponto do segmento de reta, ficando:

```
mi_selectsegment(10,3.5);  
mi_selectsegment(21,4.5);  
mi_selectsegment(10,6.5);  
mi_selectsegment(7.5,4.5);
```

De maneira a colocar os segmentos de retaseleccionados no grupo "1", usa-se a função *mi_setsegmentprop('nomeprop', tamanho, automalha, esconder, grupo)*. Na tabela A.V encontram-se explicados os argumentos da função.

Tabela A.V - Tipos de argumentos para colocar segmentos de reta num grupo	
'nomeprop'	Nome da propriedade da fronteira
tamanho	Tamanho máximo da malha ao longo do segmento de reta
automalha	0 → para usar o tamanho da malha definido no argumento tamanho 1 → para o gerador da malha escolher o tamanho da malha automaticamente
esconder	0 → para mostrar o segmento de reta na janela do pós processador 1 → para não mostrar o segmento de reta na janela do pós processador
grupo	Número do grupo do qual o segmento de reta é membro

Como não se tem nome da propriedade da fronteira, o argumento de 'nomeprop' será '<None>'; como se quer que o gerador da malha escolha o tamanho da malha automaticamente, o argumento de tamanho será zero e o de automalha será de um; o argumento de esconder será zero e o grupo será um. Sendo assim, a função terá a seguinte forma:

```
mi_setsegmentprop( '<None>', 0, 1, 0, 1 );
```

Uma vez que ao se alterar o modo de edição, os elementos que se encontravam selecionados deixam de o estar, não é necessário utilizar o comando *mi_clearselected* depois de se mudar o modo de edição dos nós para os segmentos de reta. Tendo-se colocado tudo o que se queria no grupo um, usa-se a função:

```
mi_clearselected;
```

Tendo o espaço delimitado, os magnetos permanentes representados e colocado tudo o que pertence ao magneto permanente móvel num grupo. O próximo passo consiste em adicionar os materiais ao problema, neste caso utiliza-se o Ar e o NdFeB32 (magneto permanente). Para isso utiliza-se o seguinte comando:

```
mi_addmaterial('nomedomaterial',  $\mu_r$ ,  $\mu_z$ ,  $H_c$ ,  $J$ ,  $\sigma$ ,  $e_{lam}$ ,  $\phi_{hmax}$ ,  $f_{lam}$ ,  $t_{lam}$ ,  $\phi_{hr}$ ,  
 $\phi_{hz}$ ,  $n_{fil}$ ,  $d_{fil}$ )
```

Tabela A.VI - Tipos de argumentos para adicionar materiais	
μ_r	Permeabilidade relativa segundo o eixo r ou x
μ_z	Permeabilidade relativa segundo o eixo z ou y
H_c	Campo coercivo (A/m)
J	Densidade de corrente no material (A/mm ²)
σ	Condutividade elétrica do material (MS/m)
e_{lam}	Espessura da laminação (mm)
ϕ_{hmax}	Ângulo de atraso da curva de histerese do material, para problemas não lineares (graus)
f_{lam}	Fator de preenchimento da laminação (valor 1, por defeito)
t_{lam}	Tipo de laminação: <ul style="list-style-type: none"> • 0 → não laminado • 1 → laminado nos planos r ou x • 2 → laminado nos planos z ou y • 3 → fio magnético • 4 → fio multifilar comum • 5 → fio de Litz • 6 → fio quadrado
ϕ_{hr}	Ângulo de atraso da curva de histerese na direção r ou x, usa-se para problemas lineares (graus)
ϕ_{hz}	Ângulo de atraso da curva de histerese na direção z ou y, usa-se para problemas lineares (graus)
n_{fil}	Número de filamentos do condutor <ul style="list-style-type: none"> • 1 → para fios do tipo magnético ou quadrado
d_{fil}	Diâmetro de cada um dos filamentos do condutor (mm)

Na tabela A.VI encontram-se explicados os argumentos da função. Sabendo as propriedades dos materiais utilizados, tem-se os seguintes comandos:

```
% adicionar o Ar
mi_addmaterial('Ar',1,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0);
% adicionar o NdFeB32 - magneto permanente
mi_addmaterial('Magneto_permanente',1.045,1.045,883310,0,0.694,
0,0,1,0,0,0,0,0);
```

De modo a poder colocar os materiais nos respetivos lugares, adiciona-se as legendas nos blocos, utilizando o comando `mi_addblocklabel(x,y)`, em que o argumento é o ponto onde se pretende colocar a legenda, usando um ponto que se encontra dentro do bloco. Uma vez que se tem três blocos (o Ar e dois magnetos permanentes) tem de se criar três legendas.

```
% criar legenda do magneto permanente fixo
mi_addblocklabel(15,1.5);
% criar legenda do magneto permanente móvel
mi_addblocklabel(15,5.5);
% criar legenda do Ar
mi_addblocklabel(120,120);
```

O próximo passo consiste em colocar os materiais nos respetivos blocos, seleccionando a legenda, adicionando o material e por último desseleccionar os elementos. Para seleccionar a legenda utiliza-se o comando `mi_selectlabel(x,y)` e para adicionar o material ao bloco usa-se o comando `mi_setblockprop('nome bloco', automalha, tamanhomalha, 'nocircuito', a_mag, grupo, voltas)`. Na tabela A.VII encontram-se os tipos de argumentos para adicionar os materiais aos blocos.

Tabela A.VII - Tipos de argumentos para adicionar o material ao bloco	
Automalha	<ul style="list-style-type: none"> • 0 → escolher a densidade da malha em tamanho da malha • 1 → deixar o gerador escolher a densidade da malha automaticamente
Tamanho malha	Tamanho da malha no bloco legendado
'nocircuito'	Nome do circuito do qual o bloco é membro
A_mag	Ângulo de magnetização do bloco (graus)
Grupo	Número do grupo do qual o bloco é membro
Voltas	Número de voltas associado a esta legenda

Com a ajuda da tabela A.VII obtém-se:

```
% para o Ar
mi_selectlabel(120,120);
mi_setblockprop('Ar',0,0.8,'<None>',0,0,1);
mi_clearselected;

% para o magnetopermanente fixo
mi_selectlabel(15,1.5);
mi_setblockprop('Magneto_permanente',0,0.8,'<None>',90,0,1);
mi_clearselected;

% para o magneto permanente móvel
mi_selectlabel(15,5.5);
mi_setblockprop('Magneto_permanente',0,0.8,'<None>',-90,1,1);
mi_clearselected;
```

No caso dos magnetos permanentes é necessário colocar o ângulo de magnetização do bloco. Na figura A.3 pode observar-se quatro tipos de ângulos de magnetização.

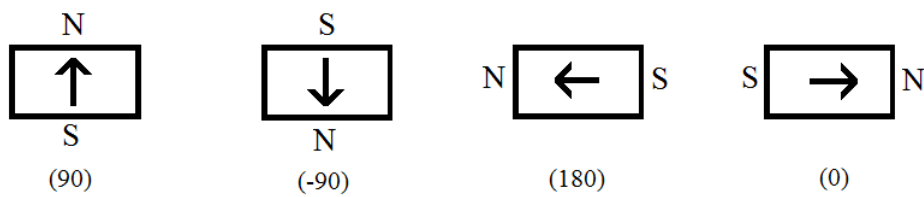


Figura A.3 - Quatro tipos de ângulos de magnetização.

De modo a prosseguir para a simulação da mola magnética, deve-se gravar o ficheiro, tal como foi efetuado no início. Sendo assim, tem-se:

```
mi_saveas('Mola.FEM');
```

Para efetuar a simulação recorre-se a um ciclo *for*. Sendo o primeiro passo definir as posições (inicial, final e variação da posição em cada iteração), bem como a variável que vai percorrer os diversos arrays.

```
% posição inicial
m_pos_init=0.5;
% variação da posição
m_pos_step=0.5;
% posição final
m_pos_final=40;
% vetor
vector_index=0;
```

De seguida, começa-se por criar o ciclo *for*, propriamente dito, utilizando o seguinte comando:

```
form_pos=m_pos_init:m_pos_step:m_pos_final
```

A seguir, incrementa-se uma unidade ao índice dos vetores (no *MATLAB*, o primeiro índice de um array é 1), para isso usa-se:

```
vector_index=vector_index+1;
```

Como se pretende calcular a força para a posição inicial do magneto permanente móvel, deve-se fazer a análise do problema e depois deve-se abrir a solução correspondente à geometria analisada. Respetivamente tem-se:

```
% análise do sistema
mi_analyze(0);
% solução correspondente à geometria analisada
mi_loadsolution;
```

Uma vez que se pretende saber a força exercida no magneto permanente móvel, calcula-se a força exercida nesse magneto, seleccionando o magneto permanente móvel. Anteriormente foram seleccionados todos os elementos deste magneto e colocados no grupo um, pelo que para seleccionar o magneto permanente móvel, basta seleccionar o grupo um, usando o comando *mo_groupselectblock(n)*, que selecciona os blocos que pertencem ao grupo *n*.

```
mo_groupselectblock(1);
```

Com o grupo seleccionado é altura de calcular a força, utilizando a função *mo_blockintegral(tipo)*.

Na tabela A.VIII encontram-se os diversos tipos de argumentos possíveis que se podem utilizar com a função *mo_blockintegral()*. Mas uma vez que se quer a força exercidano magneto permanente móvel, o argumento que se deve utilizar é o tipo 19, componente y ou z da força do tensor de carga ponderada.

Tabela A.VIII - Diversos tipos de argumentos para a função <i>mo_blockintegral()</i>	
Tipo	
0	A.J
1	A
2	Energia do campo magnético
3	Perdas por histerese e/ou laminação
4	Perdas resistivas
5	Secção transversal do bloco
6	Perdas totais
7	Corrente total
8	Integral de B_x ou B_r no bloco
9	Integral de B_y ou B_z no bloco
10	Volume do bloco
11	Componente x ou r da força de Lorentz em regime permanente
12	Componente y ou z da força de Lorentz em regime permanente
13	Componente x ou r de $2x$ da força de Lorentz
14	Componente y ou z de $2x$ da força de Lorentz
15	Binário de Lorentz em regime permanente
16	$2x$ componente do binário de Lorentz
17	Coenergia do campo magnético
18	Componente x ou r da força do tensor de carga ponderada
19	Componente y ou z da força do tensor de carga ponderada
20	Componente x ou r de $2x$ da força do tensor de carga ponderada
21	Componente y ou z de $2x$ da força do tensor de carga ponderada
22	Binário do tensor de carga ponderada em regime permanente
23	$2x$ componente do binário do tensor de carga ponderada
24	R^2 (i.e. momento de inércia/densidade)

Sendo assim tem-se:

```
force_vector(vector_index)=mo_blockintegral(19);
```

Graças ao ciclo *for*, também é possível registrar a distância do magneto permanente móvel para cada valor da força exercida, o que irá permitir criar um gráfico.

Para registrar a distância do magneto permanente móvel utiliza-se:

```
m_pos_vector(vector_index)=m_pos;
```

Por último incrementa-se à posição do magneto permanente móvel o valor do *step* definido no início do ciclo *for*. Para isso seleciona-se o magneto e faz-se uma deslocação vertical do mesmo.

```
mi_selectgroup(1);  
mi_movetranslate(0,m_pos_step);
```

De seguida fecha-se a janela do pós processador, pois não vão ser efetuados mais cálculos para esta posição.

```
mo_close;
```

O ciclo *for*, vai-se repetindo até que a condição de paragem seja verificada.

Para criar o gráfico da força exercida *versus* a distância total dos magnetos permanentes, usa-se o seguinte:

```
m=plot(m_pos_vector,force_vector);  
  
%% criar a legenda do eixo dos xx  
xlabel('Distância total dos magnetos permanentes (mm)')  
%% criar a legenda do eixo dos yy  
ylabel('Força (N)')
```

Concluídos todos os cálculos necessário, fecha-se o *FEMM*, utilizando o seguinte comando:

```
closefemm;
```

Anexo 2 - Simulação de uma mola magnética composta por dois anéis magnéticos com dimensões diferentes

```
%%% limpar a consola do MATLAB
clc;
%%% eliminar as variáveis que se encontram no workspace
clearall;
%%% alterar a localização dos ficheiros
cd('C:\Users\Luzia\Desktop\Tese\MATLAB_femm');
%%% abrir o FEMM
openfemm;
%%% criar um problema do tipo magnético
newdocument(0);
%%% guardar o ficheiro
mi_saveas('testel.FEM');
%%% alterar as propriedades do problema
mi_probdef(0,'millimeters','axi',1e-8,0,30);
%%% alterar o espaçamento da grelha
mi_setgrid(1,'cart');
%%% desenhar o nó na origem
mi_addnode(0,0);
%%% delimitar o espaço de trabalho
mi_drawpolygon([0,-130;150,-130;150,150;0,150]);
%%% ajustar o desenho à janela do programa
mi_zoomnatural;
%%% desenhar os magnetos permanentes
% magneto fixo
mi_drawpolygon([13,0;20,0;20,3;13,3]);
% magneto móvel
mi_drawpolygon([6,7;13,7;13,4;6,4]);
%%% colocar o magneto móvel no grupo 1, para facilitar as translações
verticais
% para os nós
mi_seteditmode('nodes');
mi_selectnode(6,4);
mi_selectnode(13,4);
mi_selectnode(13,7);
mi_selectnode(6,7);
mi_setnodeprop('<None>',1);
```

```

% para os segmentos
mi_seteditmode('segments');
mi_selectsegment(6,5);
mi_selectsegment(10,4);
mi_selectsegment(13,5);
mi_selectsegment(10,4);
mi_setsegmentprop('<None>',0,1,0,1);
mi_clearselected;
%%% adicionar os materiais ao problema
% adiciona Ar
mi_addmaterial('Ar',1,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0);
% adiciona NdFeB32 - magneto permanente
mi_addmaterial('Magneto_permanente',1.045,1.045,883310,0,0.694,0,0,1,0,0,0,0,0);
%%% adicionar as legendas dos blocos
mi_addblocklabel(15,1.5);
mi_addblocklabel(10,5.5);
mi_addblocklabel(100,100);
%%% selecionar as legendas dos blocos e adicionar os
respetivosmateriais
% para o Ar
mi_selectlabel(100,100);
mi_setblockprop('Ar',0,0.5,'<None>',0,0,1);
mi_clearselected;
% para o magneto permanente NdFeB32
% magneto fixo
mi_selectlabel(15,1.5);
mi_setblockprop('Magneto_permanente',0,0.3,'<None>',90,0,1);
mi_clearselected;
% magneto móvel
mi_selectlabel(10,5.5);
mi_setblockprop('Magneto_permanente',0,0.3,'<None>',90,1,1);
mi_clearselected;
%%% guardar o ficheiro
mi_saveas('teste1.FEM');
%%% alterar a posição do magneto permanente móvel e calcular a força
para cada posição
% definir as posições
m_pos_init=7;
m_pos_step=0.5;

```

```
m_pos_final=30;
% definir a variável para percorrer os vários arrays
vector_index=0;
% fazer um ciclo 'for' para calcular a força exercida desde a posição
inicial até à posição final
for m_pos=m_pos_init:m_pos_step:m_pos_final
% incrementa o index dos arrays
vector_index=vector_index+1;
% fazer a análise do problema
mi_analyze(0);
% abrir a solução correspondente à geometria analisada
mi_loadsolution;
% selecionar o magneto móvel
mo_groupselectblock(1);
% calcular a força exercida no magneto móvel
force_vector(vector_index)=mo_blockintegral(19);
% registar a posição do magneto móvel para os diferentes valores
da força
m_pos_vector(vector_index)=m_pos-13.8;
% selecionar tudo o que pertença ao grupo 1
mi_selectgroup(1);
% alterar a posição do magneto móvel
mi_movetranslate(0,m_pos_step);
% fechar a janela do pós-processamento
mo_close;
end;
%% fazer o gráfico da força exercida vs a distância total dos
magnetos
m=plot(m_pos_vector,force_vector);
% criar a legendo do eixo dos xx
xlabel('Distância total dos magnetos permanentes (mm)')
% criar a legendo do eixo dos yy
ylabel('Força (N)')
%% fechar o FEMM
closefemm;
```

Anexo 3- Simulação de uma mola magnética composta por dois magnetos fixos e um magneto central móvel

```
%%% limpar a consola do MATLAB
clc;
%%% eliminar as variáveis que se encontram no workspace
clearall;
%%% alterar a localização dos ficheiros
cd('C:\Users\Luzia\Desktop\Tese\MATLAB_femm');
%%% abrir o FEMM
openfemm;
%%% criar um problema do tipo magnético
newdocument(0);
%%% guardar o ficheiro
mi_saveas('teste3.FEM');
%%% alterar as propriedades do problema
mi_probdef(0,'millimeters','axi',1e-8,0,30);
%%% alterar o espaçamento da grelha
mi_setgrid(1,'cart');
%%% desenhar o nó na origem
mi_addnode(0,0);
%%% delimitar o espaço de trabalho
mi_drawpolygon([0,-130;200,-130;200,200;0,200]);
%%% ajustar o desenho à janela do programa
mi_zoomnatural;
%%% desenhar os magnetos permanentes
% magneto fixo 1
mi_drawpolygon([7.5,0;21,0;21,3;7.5,3]);
% magneto móvel
mi_drawpolygon([7.5,10.5;21,10.5;21,7.5;7.5,7.5]);
% magneto fixo 2
mi_drawpolygon([7.5,60;21,60;21,63;7.5,63]);
%%% colocar o magneto móvel no grupo 1
% para os nós
mi_seteditmode('nodes');
mi_selectnode(7.5,7.5);
mi_selectnode(21,7.5);
mi_selectnode(21,10.5);
mi_selectnode(7.5,10.5);
```

```
mi_setnodeprop('<None>',1);
% para os segmentos
mi_seteditmode('segments');
mi_selectsegment(10,7.5);
mi_selectsegment(21,8.5);
mi_selectsegment(10,10.5);
mi_selectsegment(7.5,8.5);
mi_setsegmentprop('<None>',0,1,0,1);
mi_clearselected;
%%% adicionar os materiais ao problema
% adiciona Ar
mi_addmaterial('Ar',1,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0);
% adiciona NdFeB32
mi_addmaterial('Magneto_permanente',1.045,1.045,883310,0,0.694,0,0,1,0,
,0,0,0,0);
%%% adicionar as legendas dos blocos
% bloco magneto fixo 1
mi_addblocklabel(15,1.5);
% bloco magneto móvel
mi_addblocklabel(15,8.5);
% bloco magneto fixo 2
mi_addblocklabel(15,61.5);
% bloco do ar
mi_addblocklabel(100,100);
%%% selecionar as legendas dos blocos e adicionar os respetivos
materiais
% para o Ar
mi_selectlabel(100,100);
mi_setblockprop('Ar',0,0.8,'<None>',0,0,1);
mi_clearselected;
% magneto fixo 1
mi_selectlabel(15,1.5);
mi_setblockprop('Magneto_permanente',0,0.8,'<None>',90,0,1);
mi_clearselected;
% magneto móvel
mi_selectlabel(15,8.5);
mi_setblockprop('Magneto_permanente',0,0.8,'<None>',-90,1,1);
mi_clearselected;
% magneto fixo 2
mi_selectlabel(15,61.5);
```

```
mi_setblockprop('Magneto_permanente',0,0.8,'<None>',90,2,1);
mi_clearselected;
%%% guardar o ficheiro
mi_saveas('teste3.FEM');
%%% alterar a posição do magneto permanente móvel e calcular a força
para cada posição
%%% definir as posições
m_pos_init=4.5;
m_pos_step=2.5;
m_pos_final=49.5;
%%% definir a variável para percorrer os vários arrays
vector_index=0;
%%% fazer um ciclo 'for' para calcular a força desde a posição inicial
até à posição final
form_pos=m_pos_init:m_pos_step:m_pos_final
% incrementa o index dos arrays
vector_index=vector_index+1;
% fazer a análise do problema
mi_analyze(0);
% abrir a solução correspondente à geometria analisada
mi_loadsolution;
% selecionar o magneto móvel
mo_groupselectblock(1);
% calcular a força exercida no magneto móvel
force_vector(vector_index)=mo_blockintegral(19);
% registar a posição do magneto permanente móvel para os
diferentes valores da força
m_pos_vector(vector_index)=m_pos-27;
% selecionar tudo o que pertença ao grupo 1 (magneto móvel)
mi_selectgroup(1);
% alterar a posição do magneto permanente móvel
mi_movetranslate(0,m_pos_step);
% fechar a janela do pós-processamento
mo_close;
end;
%%% fazer o gráfico da força vs a distância do magneto móvel em
relação à sua posição de repouso
m=plot(m_pos_vector,force_vector);
%%% criar as legendas (eixo dos xx e dos yy)
```

```
xlabel(' Distância do magneto móvel em relação à sua posição de  
repouso (mm)')  
ylabel('Força (N)')  
%%% fechar o FEMM  
closefemm;
```

Anexo 4 - Simulação de uma mola magnética composta por um magneto fixo e um magneto móvel

```
%%% limpar a consola do MATLAB  
clc;  
%%% eliminar as variáveis que se encontram no workspace  
clearall;  
%%% alterar a localização dos ficheiros  
cd('C:\Users\Luzia\Desktop\Tese\MATLAB_femm');  
%%% abrir o FEMM  
openfemm;  
%%% criar um problema do tipo magnético  
newdocument(0);  
%%% guardar o ficheiro  
mi_saveas('teste4.FEM');  
%%% alterar as propriedades do problema  
mi_probdef(0,'millimeters','axi',1e-8,0,30);  
%%% alterar o espaçamento da grelha  
mi_setgrid(1,'cart');  
%%% desenhar o nó na origem  
mi_addnode(0,0);  
%%% delimitar o espaço de trabalho  
mi_drawpolygon([0,-130;130,-130;130,130;0,130]);  
%%% ajustar o desenho à janela do programa  
mi_zoomnatural;  
%%% desenhar os magnetos permanentes  
% magneto fixo  
mi_drawpolygon([7.5,0;21,0;21,3;7.5,3]);
```

```

% magneto móvel
mi_drawpolygon([7.5,3.5;21,3.5;21,6.5;7.5,6.5]);
%%% colocar o magneto móvel no grupo 1, para facilitar as translações
verticais
% para os nós
mi_seteditmode('nodes');
mi_selectnode(7.5,3.5);
mi_selectnode(21,3.5);
mi_selectnode(21,6.5);
mi_selectnode(7.5,6.5);
mi_setnodeprop('<None>',1);
% para os segmentos
mi_seteditmode('segments');
mi_selectsegment(10,3.5);
mi_selectsegment(21,4.5);
mi_selectsegment(10,6.5);
mi_selectsegment(7.5,4.5);
mi_setsegmentprop('<None>',0,1,0,1);
% remover a seleção
mi_clearselected;
%%% adicionar os materiais ao problema
% adiciona Ar
mi_addmaterial('Ar',1,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0);
% adiciona NdFeB32 - magneto permanente
mi_addmaterial('Magneto_permanente',1.045,1.045,883310,0,0.694,0,0,1,0,
,0,0,0,0);
%%% adicionar as legendas dos blocos
mi_addblocklabel(15,1.5);
mi_addblocklabel(15,5.5);
mi_addblocklabel(100,100);
%%% selecionar as legendas dos blocos e adicionar os respetivos
materiais
% para o Ar
mi_selectlabel(100,100);
mi_setblockprop('Ar',0,0.8,'<None>',0,0,1);
mi_clearselected;
% magneto fixo
mi_selectlabel(15,1.5);
mi_setblockprop('Magneto_permanente',0,0.8,'<None>',90,0,1);
mi_clearselected;

```

```
% magneto móvel
mi_selectlabel(15,5.5);
mi_setblockprop('Magneto_permanente',0,0.8,'<None>',-90,1,1);
mi_clearselected;
%%% guardar o ficheiro
mi_saveas('teste4.FEM');
%%% alterar a posição do magneto móvel e calcular a força para cada
posição
%%% definir as posições
m_pos_init=6.5;
m_pos_step=0.5;
m_pos_final=40;
%%% definir a variável para percorrer os vários arrays
vector_index=0;
%%% fazer um ciclo 'for' para calcular a força desde a posição inicial
até à posição final
form_pos=m_pos_init:m_pos_step:m_pos_final
% incrementa o index dos arrays
vector_index=vector_index+1;
% fazer a análise do problema
mi_analyze(0);
% abrir a solução correspondente à geometria analisada
mi_loadsolution;
% seleccionar o magneto móvel
mo_groupselectblock(1);
% calcular a força exercida no magneto móvel
force_vector(vector_index)=mo_blockintegral(19);
% registar a posição do magneto móvel para os diferentes valores
da força
m_pos_vector(vector_index)=m_pos;
% seleccionar tudo o que pertença ao grupo 1
mi_selectgroup(1);
% alterar a posição do magneto móvel
mi_movetranslate(0,m_pos_step);
% fechar a janela do pós-processamento
mo_close;
end;
%%% fazer o gráfico da força vs a distância total dos magnetos
m=plot(m_pos_vector,force_vector);
```

```
%%% criar a legenda do eixo dos xx
xlabel('Distância total dos magnetos permanentes(mm)')
%%% criar a legenda do eixo dos yy
ylabel('Força (N)')
%%% fechar o FEMM
closefemm;
```

Anexo 5 - Simulação de uma mola magnética composta por um magneto permanente fixo e por uma estrutura tipo sanduíche móvel

```
%%% limpar a consola do MATLAB
clc;
%%% eliminar as variáveis que se encontram no workspace
clearall;
%%% alterar a localização dos ficheiros
cd('C:\Users\Luzia\Desktop\Tese\MATLAB_femm');
%%% abrir o FEMM
openfemm;
%%% criar um problema do tipo magnético
newdocument(0);
%%% guardar o ficheiro
mi_saveas('teste4.FEM');
%%% alterar as propriedades do problema
mi_probdef(0,'millimeters','axi',1e-8,0,30);
%%% alterar o espaçamento da grelha
mi_setgrid(1,'cart');
%%% desenhar o nó na origem
mi_addnode(0,0);
%%% delimitar o espaço de trabalho
mi_drawpolygon([0,-130;180,-130;180,200;0,200]);
%%% ajustar o desenho à janela do programa
mi_zoomnatural;
%%% desenhar os magnetos permanentes
% magneto permanente fixo
mi_drawpolygon([7.5,0;21,0;21,3;7.5,3]);
```

```
% magneto/aço/magneto - estrutura tipo sanduíche móvel
mi_drawpolygon([7.5,9.5;21,9.5;21,12.5;7.5,12.5]);
mi_drawpolygon([7.5,12.5;21,12.5;21,15.5;7.5,15.5]);
mi_drawpolygon([7.5,15.5;21,15.5;21,18.5;7.5,18.5]);
%% colocar estrutura tipo sanduíche móvel no grupo 1, para facilitar
as translações verticais
% para os nós
mi_seteditmode('nodes');
mi_selectnode(7.5,9.5);
mi_selectnode(21,9.5);
mi_selectnode(21,12.5);
mi_selectnode(7.5,12.5);
mi_selectnode(21,15.5);
mi_selectnode(7.5,15.5);
mi_selectnode(21,18.5);
mi_selectnode(7.5,18.5);
mi_setnodeprop('<None>',1);
% para os segmentos
mi_seteditmode('segments');
mi_selectsegment(10,9.5);
mi_selectsegment(21,11);
mi_selectsegment(10,12.5);
mi_selectsegment(7.5,11);
mi_selectsegment(7.5,14);
mi_selectsegment(21,14);
mi_selectsegment(10,15.5);
mi_selectsegment(7.5,17);
mi_selectsegment(10,18.5);
mi_selectsegment(21,17);
mi_setsegmentprop('<None>',0,1,0,1);
mi_clearselected;
%% adicionar os materiais ao problema
% adiciona Ar
mi_addmaterial('Ar',1,1,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0);
% adiciona NdFeB32 - magneto permanente
mi_addmaterial('Magneto_permanente',1.045,1.045,883310,0,0.694,0,0,1,0
,0,0,0,0);
% adiciona aço
mi_addmaterial('Aço',1404,1404,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0);
```

```
%%% adicionar as legendas dos blocos
mi_addblocklabel(15,1.5);
mi_addblocklabel(15,11);
mi_addblocklabel(15,14);
mi_addblocklabel(15,17);
mi_addblocklabel(100,100);
%%% seleccionar as legendas dos blocos e adicionar os respectivos
materiais
% para o Ar
mi_selectlabel(100,100);
mi_setblockprop('Ar',0,0.8,'<None>',0,0,1);
mi_clearselected;
% magneto fixo
mi_selectlabel(15,1.5);
mi_setblockprop('Magneto permanente',0,0.8,'<None>',90,0,1);
mi_clearselected;
% estrutura tipo sanduíche móvel
% magneto
mi_selectlabel(15,11);
mi_setblockprop('Magneto permanente',0,0.8,'<None>',-90,1,1);
mi_clearselected;
% aço
mi_selectlabel(15,14);
mi_setblockprop('Aço',0,0.8,'<None>',0,1,1);
mi_clearselected;
% magneto
mi_selectlabel(15,17);
mi_setblockprop('Magneto permanente',0,0.8,'<None>',90,1,1);
mi_clearselected;
% alterar a posição da estrutura tipo sanduíche
mi_selectgroup(1);
mi_movetranslate(0,-6);
mi_clearselected;
%%% guardar o ficheiro
mi_saveas('teste4.FEM');
%%% alterar a posição da estrutura tipo sanduíche e calcular a força
para cada posição
%%% definir as posições
m_pos_init=12.5;
m_pos_step=0.5;
```

```
m_pos_final=40;
%% definir a variável para percorrer os vários arrays
vector_index=0;
%% fazer um ciclo 'for' para calcular a força desde a posição inicial
até à posição final
for m_pos=m_pos_init:m_pos_step:m_pos_final
% incrementa o index dos arrays
vector_index=vector_index+1;
% fazer a análise do problema
mi_analyze(0);
% abrir a solução correspondente à geometria analisada
mi_loadsolution;
% selecionar a estrutura tipo sanduíche móvel
mo_groupselectblock(1);
% calcular a força exercida na estrutura tipo sanduíche móvel
force_vector(vector_index)=mo_blockintegral(19);
% registar a posição da estrutura tipo sanduíche móvel para os
diferentes valores da força
m_pos_vector(vector_index)=m_pos;
% selecionar tudo o que pertença ao grupo 1 (neste caso, estrutura
tipo sanduíche)
mi_selectgroup(1);
% alterar a posição da estrutura tipo sanduíche móvel
mi_movetranslate(0,m_pos_step);
% fechar a janela do pós-processamento
mo_close;
end;
%% fazer o gráfico da força exercida vs a distância total da mola
m=plot(m_pos_vector,force_vector);
%% criar a legenda do eixo dos xx
xlabel('Distância total da mola (mm)')
%% criar a legenda do eixo dos yy
ylabel('Força (N)')
%% fechar o FEMM
closefemm;
```

Anexo 6 - Procedimento utilizado no banco de ensaio, para obtenção dos valores experimentais

Uma vez montado o banco de ensaio começou-se por comprimir, o máximo possível, a mola magnética, mediu-se a distância dos magnetos permanentes com a ajuda de uma régua, obtendo-se a constante denominada por ponto “Zero”.

De seguida deixou-se a mola magnética retomar a sua posição de equilíbrio, e marcou-se um ponto, designado por “M₁”.

Tendo os dois pontos mais importantes marcados na folha de distâncias, começou-se por colocar um peso sobre a estrutura de madeira, de modo a este conseguir comprimir a mola magnética, marcando de seguida o ponto e apontando o valor do peso colocado. Continuou-se a colocar pesos cada vez mais pesados, marcando sempre o seu ponto, bem como o valor do peso.

Obtidos todos os pontos, considerou-se como referência o ponto em que a mola magnética se comprimiu o máximo possível e mediu-se na folha, a distância entre esse ponto e os outros pontos marcados. Na figura A.4 encontra-se algumas das medições efetuadas.

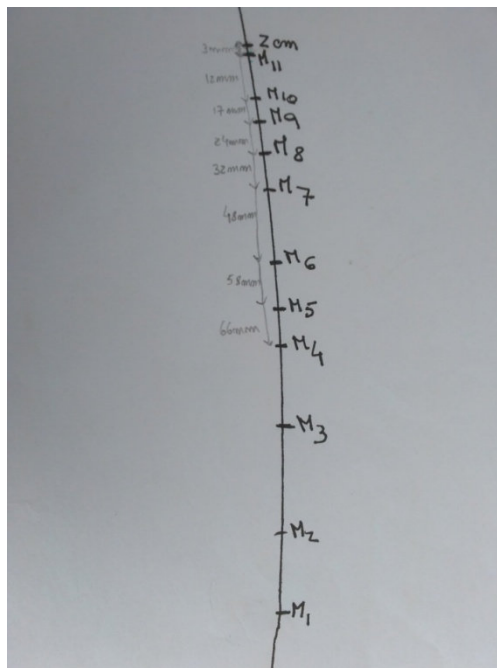


Figura A.4 – Folha de distâncias.

Tendo todas as distâncias medidas no papel, foi necessário calcular a distância real entre os magnetos permanentes. Para isso utilizou-se a expressão (6.1).

$$D_{real} = D_{papel} * 1.5 + 20 \quad (6.1)$$

onde

D_{real} representa a distância real entre os magnetos permanentes;

D_{papel} representa a distância medida na folha de distâncias.

Na equação (6.1), foi necessário multiplicar o valor D_{papel} por 1.5, pois a distância desde o centro do braço de madeira até à extremidade da esquerda mede **35cm** e a distância desde o centro até à extremidade da direita mede **52.5 cm**, ou seja, mede 1.5 vezes mais do que a distância da esquerda. Na figura A.5 encontram-se esquematizadas as distâncias da estrutura de madeira.

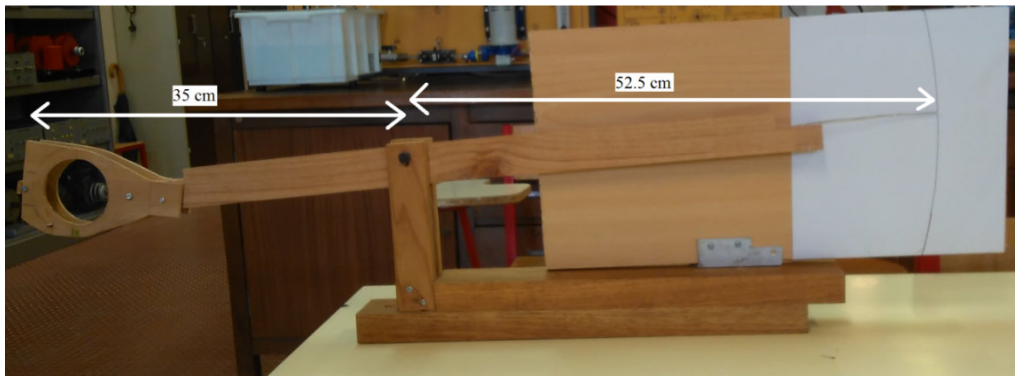


Figura A.5 – Distâncias da estrutura de madeira.

De modo a calcular a força exercida no magneto móvel superior efetuou-se a equação (6.2).

$$F = m * g \quad (6.2)$$

onde, m representa a massa dos pesos que foram colocados em cima do braço de madeira.

Na tabela A.IX encontram-se todos os valores obtidos a partir do banco de ensaio.

Tabela A.IX – Valores obtidos através do banco de ensaio				
	Distância medida no papel [mm]	Distância real total entre os magnetos permanentes [mm]	Massa [g]	Força [N]
Zero	-	20	-	-
M ₁₁	3	24.5	9000	88.2
M ₁₀	12	38	5930	58.114
M ₉	17	45.5	3800	37.24
M ₈	24	56	2161	21.178
M ₇	32	68	1756	17.209
M ₆	48	92	1005	10.339
M ₅	58	107	810	7.938
M ₄	66	119	625	6.125
M ₃	89	153.5	430	4.214
M ₂	107	180.5	300	2.94
M ₁	124	206	0	-