



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Faculdade de Engenharia

Energy Harvest: Recolha de Energia em Vibrações

Pedro Emanuel da Costa Torres

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor António Espírito Santo

Covilhã, Outubro de 2015

Agradecimentos

No decorrer desta dissertação, tive o apoio da instituição e de várias pessoas ligadas à mesma, desde já agradecer a todos o que tornaram este trabalho possível.

Em primeiro lugar e de uma forma particular, quero expressar o meu agradecimento ao Professor Doutor António Espírito Santo, pela sua dedicação, disponibilidade e competência científica ao longo deste período.

À minha mãe Rosa, ao meu pai Manuel, ao meu irmão André, ao meu avô Joaquim, a minha avó Glória e a minha tia Helena, exprimir o meu profundo agradecimento pelo apoio, amor e atenção sem reservas ao longo de toda a minha formação na área de Engenharia Eletrotécnica e de Computardes.

Ao professor José Salvado, pela generosidade e partilha de conhecimentos ao longo deste trabalho.

A todos aqueles que ao longo destes meses partilharam comigo uma palavra amiga e de incentivo.

Resumo

Esta dissertação teve como principal objetivo produzir energia baseando-se nos conceitos de *Energy Harvesting*, que consiste em adquirir pequenas porções de energia para pequenas aplicações, através de transdutores eletromagnéticos de energia. Foram caracterizadas as vibrações presentes em automóveis e máquinas industriais, recorrendo a um acelerómetro de três eixos, cada um ligado a um módulo de aquisição desenvolvido na Universidade da Beira Interior. Através do Flux 2D, um software de elementos finitos, foram modelados e simulados exemplos académicos de transdutores presentes na literatura, em seguida optou-se por modelar e simular um novo modelo, após a análise dos resultados partiu-se para a construção de quatro protótipos diferentes, recorrendo a uma impressora 3D, concluindo-se qual era o que obtinha melhores resultados, fizeram-se pequenas alterações e aplicou-se juntamente com a placa de desenvolvimento CBC-EVAL-09 em que foi criado uma rede de sensores sem fios com um nó, utilizando eZ430-CC2500.

Palavras-chave

Dispositivos Eletromagnéticos e Recolha de Energia

Abstract

This dissertation has as main goal the study and application of concepts needed to harvest energy from vibrations using electromagnetic transducers. The energy harvested from the vibrations will be available to power systems developed with low energy requirements. The vibrations present in automobiles and industrial machines were characterized with a three axes accelerometer, connected to an acquisition module developed in the University of Beira Interior. Academic examples found in literature were simulated with the finite elements software tool Flux2D. A new model was proposed and simulated. The analysis of results supported the construction of four different prototypes. A 3D printer was used to rapidly prototype the harvesting devices. Later the development kit CBC-EVAL-09 was used to verify how the harvest device behaves when powering a network of wireless sensors developed with the eZ430-CC2500.

Keywords

Electromagnetic Devices and Energy Harvesting

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Índice	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Nomenclatura.....	xvii
1. Introdução e Motivação	21
1.1. Enquadramento	21
1.2. Objetivo	23
1.3. Organização da dissertação.....	23
1.4. Metodologia de pesquisa	23
1.5. Ferramentas e testes	24
2. Caracterização das Vibrações em Diferentes Situações	25
2.1. A utilização das vibrações no <i>Energy Harvesting</i>	25
2.2. Análise das fontes de vibração: dois casos de estudo	28
2.2.1. Plataforma de aquisição das vibrações	28
2.2.2. Automóvel	31
2.2.3. Indústria.....	33
3. Sistemas Eletromagnéticos de Conversão de Energia.....	41
3.1. Subsistema mecânico	41
3.2. Subsistema eletromagnético	43
3.3. Sistema global	45
4. Modelação e Simulação de Exemplos Académicos	49
4.1. Construção do modelo de elementos finitos	49
4.2. Simulação e análise de resultados	53
4.2.1. Simulações de análise estática.....	53
4.2.2. Simulações de análise dinâmica	54
5. Desenvolvimento de Dispositivos de Recolha das Vibrações	61
5.1. Proposta de configuração de um dispositivo de recolha de energia	61
5.2. Simulação e otimização através de elementos finitos	65
5.2.1. Simulações de análise estática.....	65

5.2.2. Simulações de análise dinâmica	67
6. Construção do Protótipo	69
6.1. Desenho das peças e impressão 3D	70
6.2. Ensaio do protótipo	73
6.3. Análise de resultados	76
7. Aplicação Prática	79
7.1. Conversor de energia com o CBC-EVAL-09 da Cymbet	79
7.2. Funcionamento de um nodo sensor wireless (eZ430-CC2500)	82
8. Conclusão.....	87
8.1. Visão geral sobre os resultados obtidos	87
8.2. Sugestão de trabalhos futuros	88
Referências Bibliográficas.....	89

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Conversores de energia mecânica para energia elétrica, utilizados em pequenas aplicações [3].	22
Figura 2.1 - Gerador eletromagnético de silício [5].	26
Figura 2.2 - Micro gerador eletromagnético [6].	26
Figura 2.3 - Gerador magnético com uma única parte móvel [7].	27
Figura 2.4 - Esquemático do protótipo com dois ímanes de um gerador de <i>Energy Harvesting</i> [8].	27
Figura 2.5 - Acelerómetro da <i>Analog Devices</i> ADXL 326.	28
Figura 2.6 - Constituição de um módulo de caracterização de vibrações.	29
Figura 2.7 - Medição e caracterizam das vibrações num automóvel.	31
Figura 2.8 - Representação no domínio do tempo e da frequência, segundo o eixo X para um automóvel.	31
Figura 2.9 - Representação no domínio do tempo e da frequência, segundo o eixo Y para um automóvel.	32
Figura 2.10 - Representação no domínio do tempo e da frequência, segundo o eixo Z para um automóvel.	33
Figura 2.11 - Medição e caracterizam das vibrações numa esmeriladora.	34
Figura 2.12 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo X para uma esmeriladora.	34
Figura 2.13 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo Y para uma esmeriladora.	35
Figura 2.14 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo Z para uma esmeriladora.	35
Figura 2.15 - Medição e caracterizam das vibrações num engenho de furar.	36

Figura 2.16 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo X para um engenho de furar.....	36
Figura 2.17 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo Y para um engenho de furar.....	37
Figura 2.18 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo Z para um engenho de furar.....	37
Figura 2.19 - Medição e caracterizam das vibrações num torno.	38
Figura 2.20 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo X para um torno mecânico.	38
Figura 2.21 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo Y para um torno mecânico.	39
Figura 2.22 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo Z para um torno mecânico.	39
Figura 3.1 - (a)Modelo com um grau de liberdade de um sistema massa, amortecedor e mola.	41
Figura 3.2 - Dois exemplos comuns de geradores eletromagnéticos [4].....	44
Figura 3.3 - Representação de um circuito eletromagnético.	45
Figura 3.4 - Circuito elétrico equivalente.	46
Figura 4.1 - Representação do modelo simulado no programa de elementos finitos.	49
Figura 4.2 - Arquitetura depois de aplicação de uma malha.	50
Figura 4.3 - Características do aço e do íman.	51
Figura 4.4 - Figura com as diferentes posições do íman.	53
Figura 4.5 - Fluxo nas diferentes posições do íman.	54
Figura 4.6 - Gráficos da Posição, Velocidade e Aceleração.	55
Figura 4.7 - Tensão eficaz para uma arquitetura com e sem aço de exemplos académicos.	56
Figura 4.8 - Corrente eficaz para uma arquitetura com e sem aço de exemplos académicos. ..	57
Figura 4.9 - Potência Média para uma arquitetura com e sem aço de exemplos académicos. ...	58
Figura 4.10 - Circuito resistivo com duas cargas.	58
Figura 5.1 - Representação do modelo simulado no programa de elementos finitos.....	61

Figura 5.2 - Íman cilíndrico com indicação das variáveis [18].	63
Figura 5.3 - Arquitetura do modelo depois de aplicação de uma malha.	65
Figura 5.4 - Fluxo para as diferentes posições do íman da arquitetura proposta.	66
Figura 5.5 - Figura com as diferentes posições do íman.	66
Figura 5.6 - Tensão Eficaz.	67
Figura 5.7 - Corrente Eficaz.	68
Figura 5.8 - Potência Média.	68
Figura 6.1 - Impressora 3D Prusa i3 Hephestos.	69
Figura 6.2 - Primeiro modelo.	70
Figura 6.3 - Segundo Modelo.	71
Figura 6.4 - Terceiro Modelo.	71
Figura 6.5 - Quarto Modelo.	71
Figura - 6.6 Mola planar.	72
Figura 6.7 - Sistema de teste constituído por um osciloscópio, gerador de sinais, amplificador, e coluna.	73
Figura 6.8 - Peças de suporte complementares.	73
Figura 6.9 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo X para o sistema de teste.	74
Figura 6.10 - Medição e caracterizam das vibrações do sistema de teste.	74
Figura 6.11 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo Y para o sistema de teste.....	75
Figura 6.12 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo Z para o sistema de teste.....	75
Figura 6.13 - Potência Média para o segundo modelo com uma frequência de 40Hz.	76
Figura 6.14 - Potência Média para o terceiro com uma frequência de 40Hz.	77
Figura 6.15 - Potência Média para o quarto com uma frequência de 40Hz.	78
Figura 7.1 - Placa de desenvolvimento CBC-EVAL-09.	79

Figura 7.2 - EnerChip CBC- EVAL- 09 Demonstração da placa de desenvolvimento diagrama de blocos, com o CBC51100 EnerChip 100uAh *Module* [21]. 80

Figura 7.3 - eZ430-CC2500 [22]. 82

Figura 7.4 - Transdutor eletromagnético, a alimentar o CBC-EVAL-09. 83

Figura 7.5 - Software da Cymbet que gere a rede de sensores sem fios. 84

Figura 7.6 - Comunicação entre os dois módulos..... 84

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Vantagens e desvantagens de três diferentes formas de obter energia [3].	22
Tabela 2.1 - Organização do <i>firmware</i> do Módulo [12].	30
Tabela 4.1 - Valor da potência para diferentes resistências.	59
Tabela 5.1 - Propriedades do um íman de Neodímio [17].	62
Tabela 5.2 - Tabela padrão <i>American Wire Gauge</i> (AWG) [19].	63
Tabela 7.1 - Seleção de entradas do transdutor eletromagnético [21].	81
Tabela 7.2 - Tabela que indica o estado da placa de desenvolvimento CBC EVAL-09 [21].	82
Tabela 8.1 - Valores de Tensão, Corrente e Potência dos capítulos 5 e 6.	87

Nomenclatura

Geral:

A	Área, [m ²];
\vec{a}	Aceleração, [m/s ²];
B	Intensidade do campo magnético, [T];
B_r	Magnetismo residual ou remanescente, [T];
d	Amortecimento, [N/m/s];
d_m	Amortecimento mecânico, [N/m/s];
d_e	Amortecimento elétrico, [N/m/s];
D	Altura do cilindro, [m];
\vec{F}	Força resultante, [N];
F_d	Força associada ao amortecimento, [N];
F_s	Força associada à mola, [N];
f_i	Fator de enchimento;
h_z	Distância da face ao eixo de simetria, [m];
I_{ef}	Corrente eficaz, [A];
$I_{máx}$	Corrente de pico, [A];
I_{in}	Corrente da fonte, [A];
$i(t)$	Varição da corrente ao longo do tempo, [A];
J_s	Magnetização de Saturação, [T];
k	Constante de elasticidade, [N/m];
l	Largura da bobina, [m];
L_w	Comprimento do fio, [m];
L_{in}	Indutância, [H];
m	Massa de um corpo, [Kg];
N	Número de espiras;
P_d	Potência dissipada, [W];
$P_{méd}$	Potência, [W];
P_t	Potência total, [W];
Q	Fator de qualidade;
R_c	Resistência da carga, [Ω];
R_{in}	Resistência interna da fonte, [Ω];
R	Resistência em série, carga mais a fonte, [Ω];

R_{cil}	Raio do cilindro, [m];
R_b	Resistência da bobina, [Ω/m];
r_0	Raio externo da bobina, [m];
r_i	Raio interno da bobina, [m];
S	Área efetiva da Bobina, [m^2];
T_{max}	Temperatura máxima, [$^{\circ}C$ ou F];
t_k	Espessura da bobina, [m];
$UCOEF(1)$	Número de coeficientes a serem introduzidos;
$UCOEF(2)$	Valor da amplitude de oscilação, [m];
$UCOEF(3)$	Frequência definida por o utilizador, [Hz];
VCX	Velocidade segundo o eixo x, [m/s];
VCY	Velocidade segundo o eixo y, [m/s];
V_{ef}	Tensão eficaz, [V];
$V_{máx}$	Tensão de pico, [V];
V_{in}	Fonte de tensão, [V];
V_T	Volume da bobina, [m^3];
W	Frequência angular, [rad/s];
W_n	Frequência de ressonância, [Hz];
w_d	Diâmetro do fio, [m];
x	Valor da posição segundo um eixo, [m];
\dot{x}	Valor da velocidade segundo um eixo x, [m/s];
\ddot{x}	Valor da aceleração segundo um eixo x, [m/s^2];
$y(t)$	Excitação sinusoidal, [m];
\dot{y}	Valor da velocidade segundo o eixo y, [m/s];
$z(t)$	Posição relativa do movimento, [m];
\dot{z}	Primeira derivada da posição z, velocidade, [m/s];
\ddot{z}	Segunda derivada da posição z, aceleração, [m/s^2];
Z	Amplitude de oscilação segundo o eixo Z, [m];

Simbologia grega:

Φ	Fluxo magnético, [Tm ²];
ε	Força eletromotriz induzida, [J/C];
ξ_m	Fator de amortecimento mecânico;
ξ_e	Fator de amortecimento elétrico;
φ	Fase entre a excitação e a oscilação da massa, [rad];
μ_r	Permeabilidade relativa, [N/A ²];
ρ	Resistividade do material da bobina, [Ω m];

Acrónimos:

ADC	Analog Digital Converter;
AC	Alternating Current;
AWG	American Wire Gauge;
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene;
COM	Component Object Model;
CAP	Output Holding Cap Charge;
DC	Direct Current;
EEPROM	Erasable Programmable Read-Only Memory;
EC	EnerChip Charge;
FFT	Fast Fourier Transformer;
HV	High Voltage;
I/O	Input/Output;
LED	Light emitting diode;
MPPT	Maximum Peak Power Tracking;
NdFeB	Neodymium Magnet
PLA	Polylactic Acid;
STL	Standard Triangle Language;
SI	International System of Units;
UBI	Universidade da Beira Interior;
USB	Universal Serial Bus;
V _{pp}	Voltage peak-to-peak;

1. Introdução e Motivação

Neste capítulo, é abordado a descrição do tema, os objetivos, as razões do trabalho, a aplicabilidade e a organização do documento.

1.1. Enquadramento

As redes de sensores sem fios são formadas por um conjunto de pequenos sensores que, a partir do local onde são inseridos, permitem uma recolha de informações do meio. Estes sensores podem ser aplicados em diversas áreas, como por exemplo: militares na deteção de movimentos inimigos ou na presença de materiais perigosos, meteorológica na deteção de catástrofes naturais, indústria na monitorização de equipamentos, ou, na medicina para aquisição de parâmetros biométricos.

Com a utilização cada vez mais recorrente destes sensores, e redes de sensores sem fios, é necessário encontrar uma alternativa à utilização de baterias primárias ou secundárias uma vez que estas têm de ser periodicamente carregadas ou substituídas. Esta substituição pode dificultar-se, caso as baterias estejam colocadas em locais de difícil acesso, ou, caso haja um elevado número de sensores, o que dificultaria o carregamento/substituição dos mesmos [1].

O *Energy Harvesting* procura solucionar estes problemas. O objetivo é recolher energia na forma em que esta existe na natureza, seja a partir do calor através do efeito termoelétrico, da radiação eletromagnética no espectro visível através de painéis fotovoltaicos e invisível utilizando antenas especiais para captar energia através das ondas de rádio, do fluxo de fluidos utilizando os mais variados canais de transporte e da energia cinética.

Este trabalho foca-se, essencialmente, na energia cinética que se caracteriza por estar disponível num corpo em movimento. Neste caso, aproveitar as vibrações que se podem encontrar nos mais diversos meios como por exemplo: na indústria [2].

Existem três formas de conversão de energia cinética: Piezoelétrica que consiste em gerar energia através de uma pressão mecânica exercida em materiais cristalinos (cerâmicos, polímeros), Electroestática, que utiliza o mesmo princípio de funcionamento que um condensador variável para gerar cargas entre o movimento relativo de duas placas e, por fim, a Eletromagnética que utiliza mecanismos baseados na lei de Faraday para produzir energia, recorrendo a um íman que oscila dentro de uma bobina, pode-se ver descrita a forma de funcionamento dos três métodos na Figura 1.1.

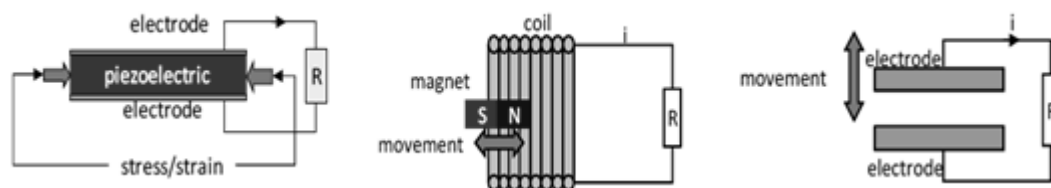


Figura 1.1 - Conversores de energia mecânica para energia elétrica, utilizados em pequenas aplicações [3].

Naturalmente, todos os dispositivos descritos apresentam vantagens e desvantagens, dependendo, essencialmente, das mais variadas aplicações onde se podem utilizar, como por exemplo: para altas amplitudes de vibração e frequências os dispositivos eletromagnéticos são mais favoráveis. A Tabela 1.1 faz uma comparação breve entre os diversos tipos de dispositivos.

Tabela 1.1 - Vantagens e desvantagens de três diferentes formas de obter energia [3].

	Dispositivos Piezoelétricos	Dispositivos Eletrostáticos	Dispositivos Eletromagnéticos
Vantagens	- Altas tensões de saída	- Altas tensões de saída	- Altas correntes à saída
	- Não é necessário controlar qualquer deslocamento	- Possibilidade de construir sistemas de baixo custo	- Longa longevidade
Desvantagens	- Material caro	- Baixa capacitância	- Baixas tensões de saída
	- Coeficiente de acoplamento ligado as propriedades do material	- Alto impacto de capacitâncias parasitas	- Difícil de desenvolver MEMS
		- Necessário controlar pequenas dimensões	- Material pode ser eventualmente dispendioso
			- Pouca eficiência para baixas frequência

Nesta dissertação serão abordados os dispositivos eletromagnéticos que, pelas suas características de longevidade e robustez, podem ser facilmente aplicáveis no mercado. Através deste tipo de equipamentos é possível implementar uma rede de sensores sem fios sem necessitar de substituir as baterias.

1.2. Objetivo

Com os desenvolvimentos da tecnologia, o tempo de vida útil das baterias secundárias constitui uma limitação na implementação de redes de sensores sem fios. O desenvolvimento de um dispositivo que, de uma forma otimizada, não necessita de ser carregado traria inúmeras vantagens, porque colocaria de partes inúmeras limitações. O propósito desta dissertação pretende apresentar uma proposta de um dispositivo de recolha de energia das vibrações.

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação é composta por oito capítulos, sendo que o primeiro destina-se ao enquadramento do tema e a descrever os objetivos que se pretendem alcançar, é descrito o conceito associado ao *Energy Harvesting*, focando-se, essencialmente, na conversão de energia cinética. No segundo capítulo, é feita uma breve análise ao estado de arte e são caracterizadas diferentes fontes de vibrações. No terceiro capítulo, é dimensionado matematicamente, um sistema eletromagnético, baseado no exemplo mola-massa-amortecedor. No quarto capítulo, são modelados e simulados num programa de elementos finitos exemplos académicos. No quinto capítulo, é proposto uma configuração de um dispositivo de recolha das vibrações e simulado, em semelhança com o capítulo anterior. No sexto capítulo constroem-se diferentes protótipos, utilizando uma impressora 3D e iniciam-se os testes experimentais. No sétimo capítulo, é aplicado o protótipo a um conversor de energia CBC-EVAL-09 e ao módulo de comunicação wireless eZ430-CC2500. Por fim, nas conclusões discute-se de uma forma geral, os resultados obtidos e sugerem-se trabalhos futuros.

1.4. Metodologia de pesquisa

O desenvolvimento da dissertação passou por várias fases desde o seu início até ao final. Em primeiro lugar foi realizada uma pesquisa teórica sobre o tema, que consistiu em identificar o trabalho já desenvolvido até aos dias de hoje. Em seguida, optou-se por uma recolha e estudo das vibrações em dois meios onde no futuro está tecnologia pode vir a ser aplicada. Após este estudo passou-se para uma fase teórico-prática, com a modelação matemática de um sistema massa-mola-amortecedor. Modelaram-se e simularam-se vários exemplos académicos, e aperfeiçoou-se um novo sistema. Por fim, optou-se por uma aplicação prática ao construir o

protótipo e aplicá-lo juntamente com um sistema de desenvolvimento, de forma a criar uma rede de sensores sem fios.

1.5. Ferramentas e testes

No decorrer desta dissertação, utilizaram-se as ferramentas que são apresentadas neste subcapítulo, começou-se por estudar e utilizar o componente ADXL326 da *Analog Devices* que é um acelerómetro de três eixos, em conjunto com três módulos, um por cada eixo, e o matlab como software interface máquina-homem. Este sistema foi desenvolvido na Universidade da Beira Interior e permite caracterizar as vibrações presentes nos mais variados meios. Posteriormente, partiu-se para a simulação e modelação através de um programa de elementos finitos designado Flux2D versão 7.40 da CEDRAT, que permitiu analisar exemplos académicos e dimensionar um novo transdutor. Para desenhar as peças utilizou-se o *DesignSpark Mechanical* da RS que é um software gratuito para desenhar e exportar os ficheiros em formato STL, para serem impressos na impressora 3D PrusaI3 Helphestos disponível no laboratório.

Os testes experimentais do protótipo tiveram por base um sistema constituído por um osciloscópio, que permite analisar o sinal de entrada, proveniente de um gerador de sinais, ligado a um amplificador de sinal para uma coluna de som, vibrasse com a frequência definida pelo utilizador.

2. Caracterização das Vibrações em Diferentes Situações

2.1. A utilização das vibrações no *Energy Harvesting*

Desde a década de 90 que se tem vindo a desenvolver dispositivos que permitem converter a energia cinética das vibrações em energia elétrica. Estes transdutores baseiam-se essencialmente nas leis de indução de Faraday e variam de tamanho, arquitetura, condições de vibração e valores de potência obtidos. Apesar disso, existem outros mecanismos de conversão que também podem ser utilizados, como por exemplo: utilização de materiais piezoelétricos, electroestáticos e eletromagnéticos [2].

Os transdutores têm vindo a ser projetados para que possam substituir as baterias. Estes dispositivos eletromagnéticos são desenvolvidos, fundamentalmente, numa escala de potência de saída que vai desde a ordem dos micro até à ordem dos mili-watts de potência. As fontes de energia mecânica podem ser encontradas facilmente. O corpo humano, ao deslocar-se, produz movimentos com uma amplitude de frequência tipicamente inferior a 10Hz. Por seu lado, as máquinas produzem movimentos cuja frequência é regra geral superior a 30Hz [4].

Num artigo de revisão bibliográfica concebido por S.P. Beeby, M.J. Tudor e N.M. White [5], em 2005, da Universidade de Southampton, expõem-se alguns exemplos de aplicação em que microdispositivos produzem energia utilizando as vibrações. Nesta fonte bibliográfica refere-se que em 2001 Williams *et al.*, da Universidade de Sheffield, criaram um transdutor piezoelétrico, constituído essencialmente por uma massa e uma mola, capaz de disponibilizar cerca de $1\mu\text{W}$ de potência para uma frequência de 70Hz, e $100\mu\text{W}$ para uma frequência de 330Hz. Makoto Mizuno dos Laboratórios de Nanotecnologia e Sistemas Avançados no Japão e Chetwynd, da Universidade de Warwick, desenvolveram, em 2003, um microdispositivo com 10cm^3 de volume, a operar a um frequência de 58kHz, que disponibilizava 6nW de potência apresentando na sua saída um valor de tensão eficaz de 1,4mV. Um outro tipo de transdutor é descrito por Pérez-Rodrigues *et al.* Sendo constituído por uma base de silicone, uma bobina planar de 576 espiras, um íman de NdFeB e uma mola de alumínio. Estes investigadores verificaram que os resultados obtidos para vibrações com uma frequência de 400Hz são de cerca de $1,44\mu\text{W}$ de potência. Em 2005, Beeby *et al.* desenvolveram um gerador com uma base de silício, 4 ímanes de NdFeB e uma bobina. Para uma frequência de ressonância de 9,5kHz foi disponibilizada uma potência de 9,5nW.

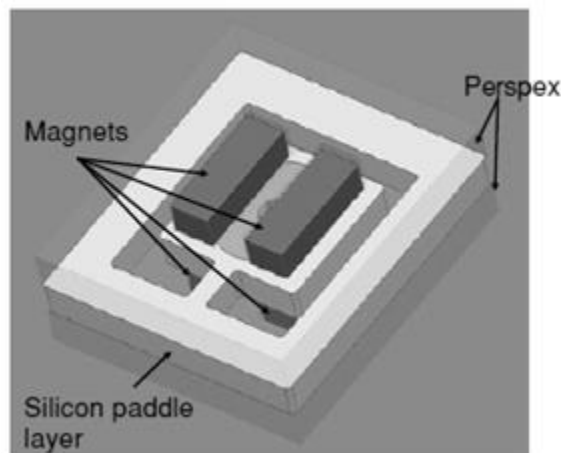


Figura 2.1 - Gerador eletromagnético de silício [5].

Em 2007, S.P. Beeby *et al.* [6] dimensionaram um micro gerador eletromagnético com o intuito de recolher energia através de vibrações, o dispositivo, com um volume de $0,15\text{cm}^3$, é constituído por 4 ímãs envolvendo uma bobina de 2300 espiras, permite alcançar uma potência final de $46\mu\text{W}$, para um resistência de carga de $4\text{k}\Omega$ e uma tensão eficaz de 428mV , com uma frequência de ressonância de 52Hz .

Um gerador de energia utilizando os movimentos do corpo humano, Figura 2.3, foi desenvolvido por C.R.Saha *et al.*, do Instituto Nacional de Tyndall [7], em 2007. O protótipo foi utilizado durante dois movimentos específicos do corpo humano. Os resultados de potência obtidos variam entre os $300\mu\text{W}$, em andamento, e os $2,5\text{mW}$, em corrida lenta.

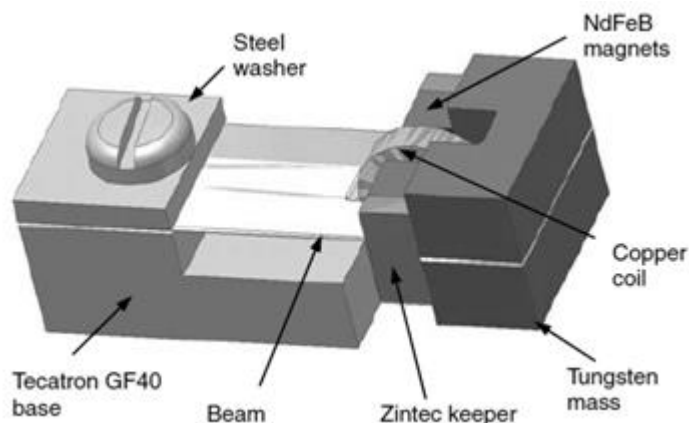


Figura 2.2 - Micro gerador eletromagnético [6].

O movimento associado ao andar produz deslocamentos com frequência de 2Hz a que corresponde uma potência de saída de 0,30mW. Por seu lado, o movimento associado ao correr lentamente produz movimentos com uma frequência de 2,75Hz responsáveis por disponibilizar uma potência de saída de 1,86mW.

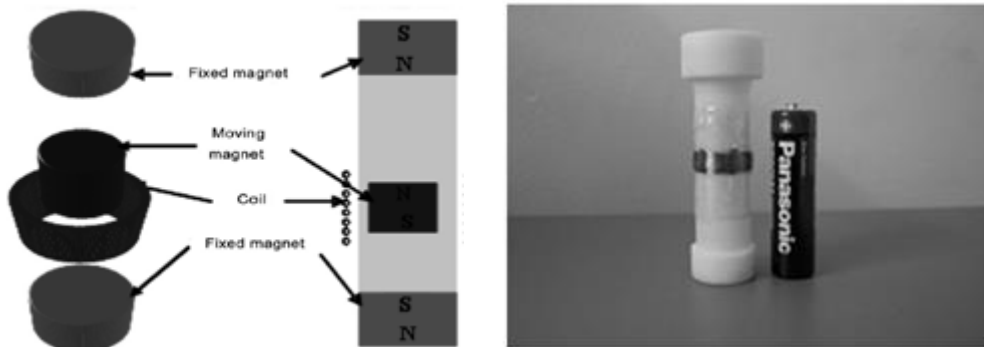


Figura 2.3 - Gerador magnético com uma única parte móvel [7].

Um outro protótipo otimizado de modo a incrementar a potência de saída foi o sistema eletromagnético representado por Vindod R Challa, Shuo Cheng e David P Arnold [8], da Universidade da Flórida, em 2012, e que se ilustra na Figura 2.4. Este protótipo era composto por dois ímãs fixos e uma bobina móvel. Quando opera a uma frequência de 28,1Hz disponibiliza uma potência de saída que vai dos 2,6 até aos 49,2mW, com uma eficiência aproximada dos 45%.

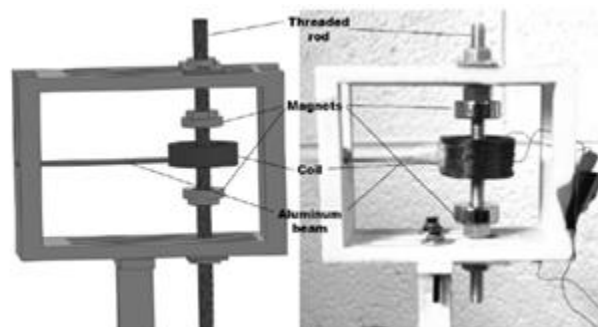


Figura 2.4 - Esquemático do protótipo com dois ímãs de um gerador de *Energy Harvesting* [8].

2.2. Análise das fontes de vibração: dois casos de estudo

2.2.1. Plataforma de aquisição das vibrações

A plataforma de aquisição de vibrações foi utilizada para caracterizar as vibrações presentes em diferentes ambientes, caracterizando em três orientações diferentes x,y,z. A aquisição das vibrações segundo estes eixos é realizada através de um acelerómetro da *Analog Devices* ADXL326, representado na Figura 2.5. O sensor é o responsável pela aquisição das vibrações que serão, posteriormente, enviadas para os módulos de aquisição responsáveis por o tratamento dos dados recolhidos [9].



Figura 2.5 - Acelerómetro da *Analog Devices* ADXL 326.

Estes módulos são constituídos por duas entradas, uma entrada analógica (Ch1), na qual o sinal é devidamente amplificado e filtrado para ser convertido no domínio digital pelo método de aproximações sucessivas com um ADC de 12bits de resolução e um canal digital (ChA), em que o *duty cycle* de entrada é determinado com recurso ao *Timer A* do microcontrolador num valor correspondente à aceleração.

O processador utilizado da *Texas Instrument* MSP430F5419 possui uma frequência de relógio de 16Mhz, com uma memória dedicada de 15kBytes, com um ADC de 12bits, com capacidade para operar em modo de conversão de 8bits ou estender-se para os 16bits [10]. Esta opção condiciona a frequência de amostragem que é determinada em função do espaço de memória disponível. O utilizador define a duração do intervalo de tempo no decorrer da qual pretende efetuar a aquisição de dados. Por exemplo, para um intervalo de tempo de 1 segundo, a frequência de amostragem para 8bits é de 15kHz, enquanto que para 16bits é de 7,5kHz.

A sincronização dos três módulos, cada um responsável por adquirir a aceleração segundo um eixo, é realizada com recurso ao sinal de *trigger* no qual uma transição de estado desencadeia uma nova recolha. Existem dois tipos de *trigger*: o interno, em que se dá o disparo e é iniciado o processo de aquisição e a linha *trigger_out* é levada a alto; e o externo, em que o processo de aquisição se inicia, quando a linha do *trigger-in* deteta uma transição de flanco ascendente. Esta estratégia é utilizada para sincronizar a aquisição dos dados entre todos os três módulos.

A comunicação entre o computador e os módulos de aquisição é conseguida através de uma porta USB. A EEPROM possui o *firmware* necessário a inicialização do controlador USB responsável por a gestão da comunicação é realizada através de identificadores próprios no início de cada pacote de dados. Os módulos aguardam o envio, por parte do computador, de um pacote de dados que se inicia por um dos seguintes caracteres: C- para configuração, S- para sincronização, D- para dados e T- para programar o nível do *trigger* desejado. Na tabela 1 são esquematizados o pacote de dados e comandos.

Na Figura 2.6 é possível visualizar o sistema, que é desenvolvido e composto por partes facilmente identificáveis, o número 1 representa a seleção da alimentação, o 2 a entrada do sensor analógico, o 3 a entrada do sensor digital, o 4 o controlador por USB, o 5 exibe o microcontrolador da TI MSP430F5419, o 6 os LED de estado, o 7 as entradas e saídas genéricas, o 8 a fonte de alimentação, e o 9 uma entrada micro-USB [11].

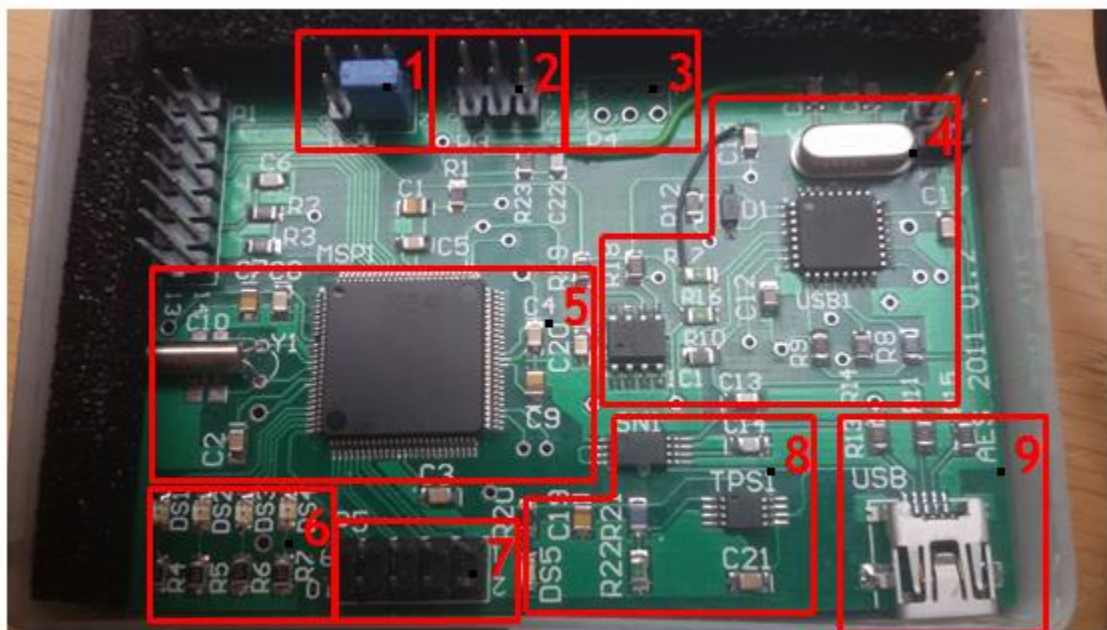


Figura 2.6 - Constituição de um módulo de caracterização de vibrações.

Tabela 2.1 - Organização do *firmware* do Módulo [12].

Comando	Computador	Módulo
C	Dados (16 ou 8bits)	
	Duração da <i>frame</i> de aquisição	OK ou KO
	Canal CHA ou Ch1	
	ID do IS	
S	Origem do <i>trigger</i>	
	-	OK ou KO
D	-	15kByte
T	Nível de <i>trigger</i>	OK ou KO

No processamento dos dados e exibição dos resultados no computador é utilizado o Matlab através da *toolbox* de comunicações série, que disponibiliza um conjunto de funções que facilitam a implementação da comunicação com os módulos.

A aplicação requer alguns parâmetros que o utilizador necessita introduzir, tais como as portas COM, através das quais se processam as comunicações com os módulos, qual a frequência de amostra pretendida e o número de bits a utilizar no processo de aquisição. Após estas configurações, os módulos estão prontos a adquirir o sinal.

As ferramentas utilizadas na análise de sinais e das suas componentes de frequência têm, por base, a análise de Fourier. Esta é utilizada em sinais periódicos ou de duração limitada. A aplicação permite a visualização dos resultados em dois modos, com base no tempo ou com base na frequência através da aplicação da FFT aos dados recolhidos [12].

2.2.2. Automóvel

Para o estudo das vibrações presentes nos automóveis, utilizou-se um Volkswagen Passat de 2001 com o acelerómetro de três eixos colocado junto ao motor, Figura 2.7, é também possível visualizar qual o sentido de cada eixo.



Figura 2.7 - Medição e caracterizam das vibrações num automóvel.

Após a colocação do acelerómetro na posição ilustrada na figura anterior, foram recolhidos os dados de cada eixo, no domínio do tempo e da frequência. Para o eixo X Figura 2.8.

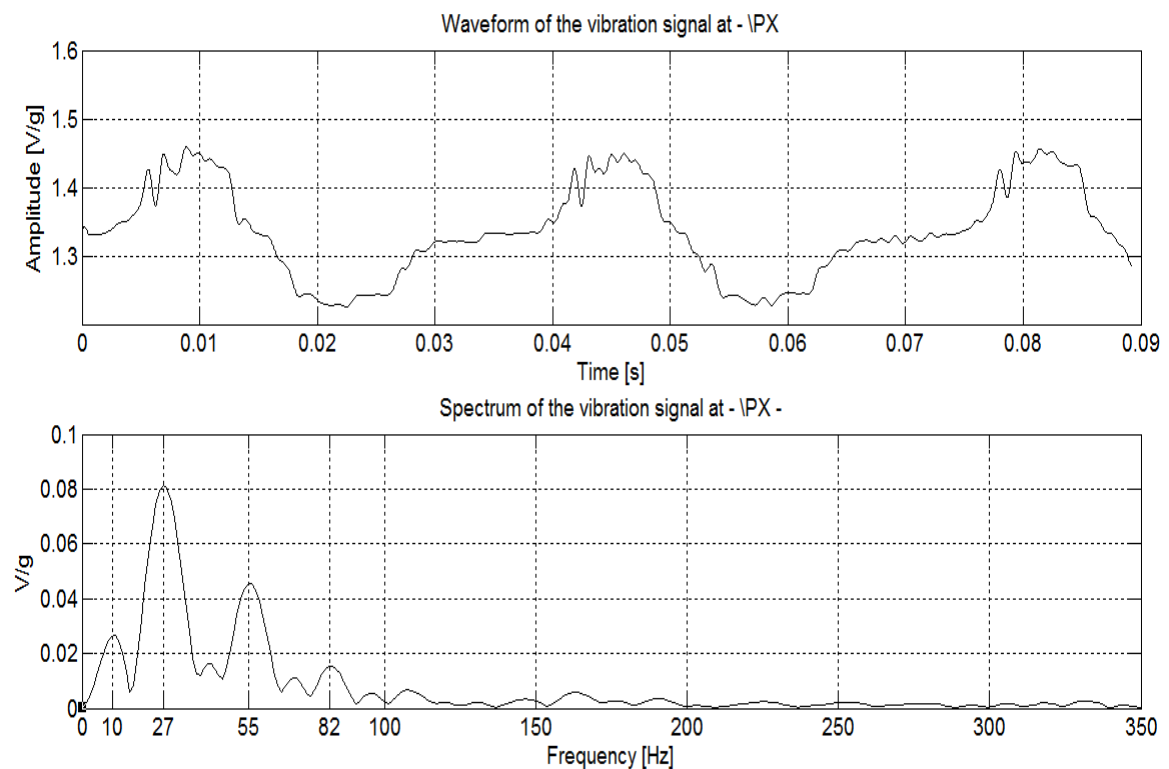


Figura 2.8 - Representação no domínio do tempo e da frequência, segundo o eixo X para um automóvel.

Segundo o eixo do X no domínio do tempo é possível verificar que existe um sinal sinusoidal causado pela vibração do motor, sem nenhuma mudança engatada, apesar de existirem pequenas distorções é possível verificar o perfil do sinal.

Após a aplicação do FFT ao sinal verifica-se que a frequência predominante situa-se por volta dos 27Hz, para obter a amplitude de uma forma simplificada, é necessário somar o valor de cada dos picos mais significativos, como por exemplo, para 27Hz é 80mV, para 55Hz de 43mV e para 82Hz de 16mV, que no total resulta 139mV.

Para o eixo Y, Figura 2.9, no domínio do tempo verifica-se que existe um padrão no perfil do sinal, mas é difícil de caracterizar qual o tipo de oscilação. No domínio da frequência, denota-se que a frequência predominante são os 27Hz, mas há uma distribuição dos valores de pico maiores, para os 27Hz de 55mV, 55Hz de 18mV e os restantes por volta dos 23/24mV que no total a amplitude deve resultar nos 139mV.

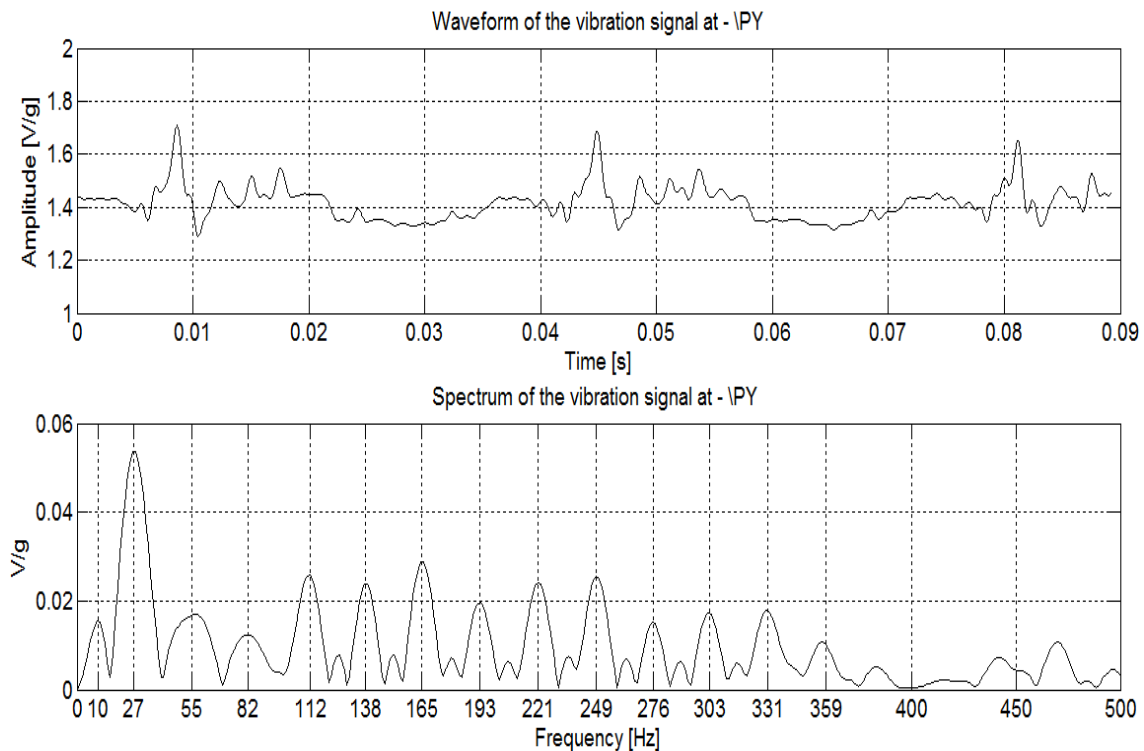


Figura 2.9 - Representação no domínio do tempo e da frequência, segundo o eixo Y para um automóvel.

Os resultados para o eixo Z, são apresentados na Figura 2.10.

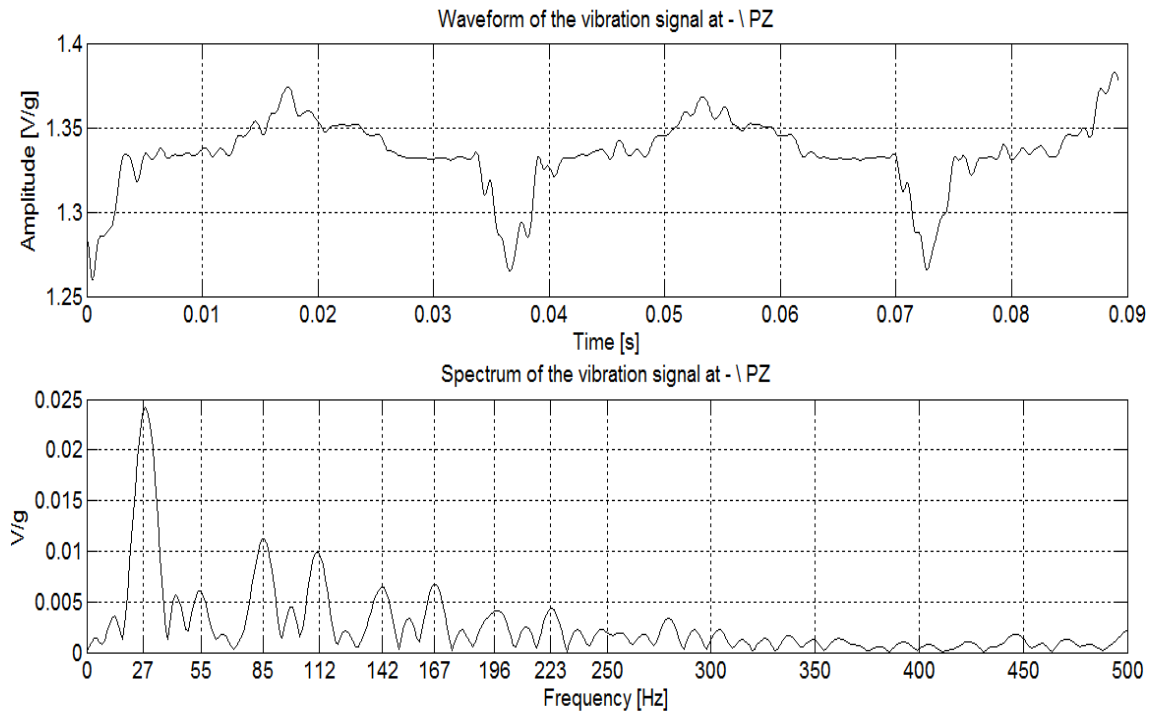


Figura 2.10 - Representação no domínio do tempo e da frequência, segundo o eixo Z para um automóvel.

Para o eixo Z no domínio do tempo é possível verificar que o sinal de entrada tem um padrão parecido com uma onda quadrada, com uma amplitude de aproximadamente 100mV. No domínio, a frequência predominante são os 27Hz, e a soma de todos os valores de pico tem de corresponder à amplitude referida anteriormente.

2.2.3. Indústria

Na indústria utilizaram-se três máquinas diferentes, uma esmeriladora, um engenho de furar e um torno, os testes realizados têm como base o domínio da frequência, pois para esta dissertação os resultados no domínio do tempo que são exemplificados no subcapítulo anterior não são cruciais.

Para a realização destes testes usou-se a oficina na Faculdade de Engenharias que se pode assemelhar a um estaleiro industrial. Começou-se por colocar o acelerómetro no topo da esmeriladora, que é um equipamento destinado a cortar e a polir objetos, Figura 2.11.



Figura 2.11 - Medição e caracterizam das vibrações numa esmeriladora.

A Figura 2.12 representa o gráfico no domínio da frequência para o eixo X, e os resultados mostram que a frequência predominante corresponde ao 100Hz, com uma amplitude de 9,5mV, ao somar todos os valores de pico, o valor de amplitude ronda os 30mV, o que em comparação com o automóvel é bastante inferior, isto deve-se ao facto de que no automóvel, o acelerómetro estava colocado junto ao motor, enquanto que na esmeriladora estava colocado, tal como indica na, Figura 2.11, no seu topo com uma proteção que impede a máquina de vibrar com uma amplitude elevada.

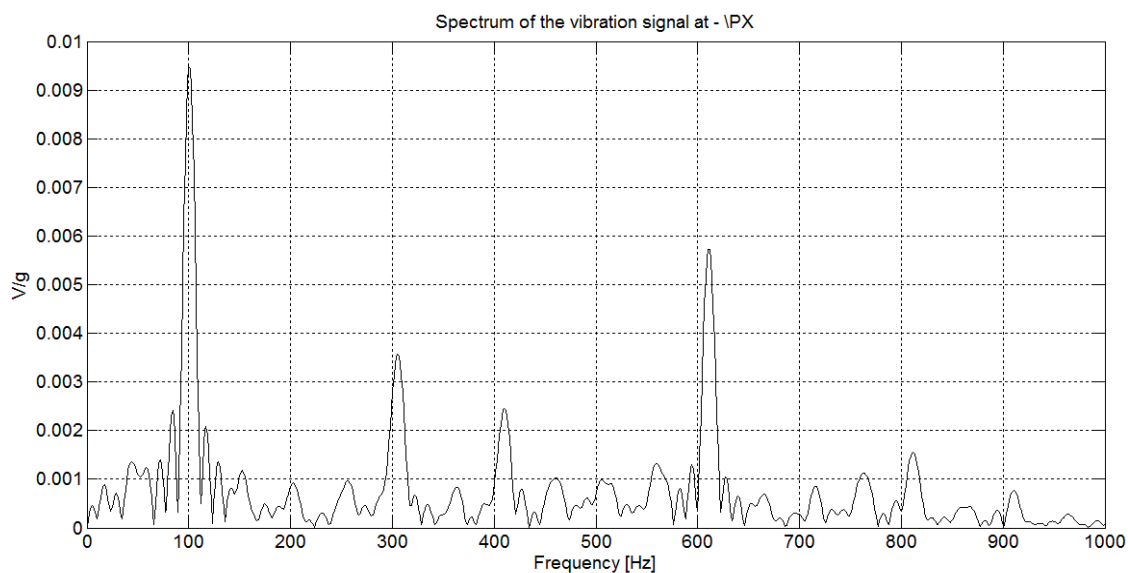


Figura 2.12 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo X para uma esmeriladora.

Para o eixo Y, Figura 2.13, a frequência que se destaca são os 100Hz, o valor da amplitude do sinal é superior em relação ao eixo do X e ronda os 12mV, enquanto que na Figura 2.14, para os 100Hz o valor da amplitude do sinal ronda o 5,5mV e é distribuído pelas restantes frequências, isto também se deve ao facto de que para o eixo Z não existir grande impacto das vibrações.

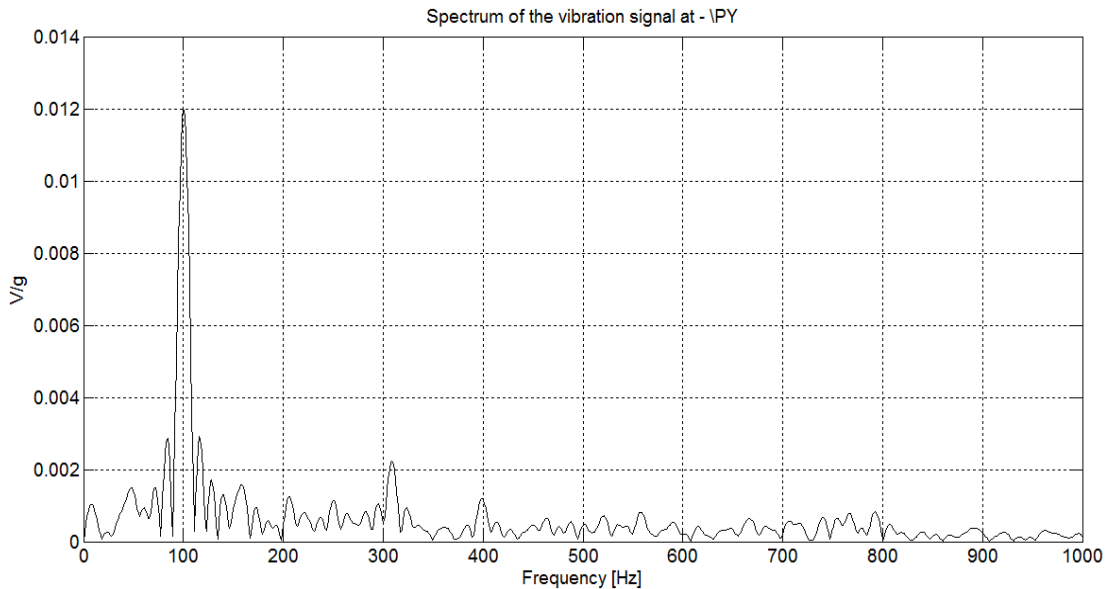


Figura 2.13 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo Y para uma esmeriladora.

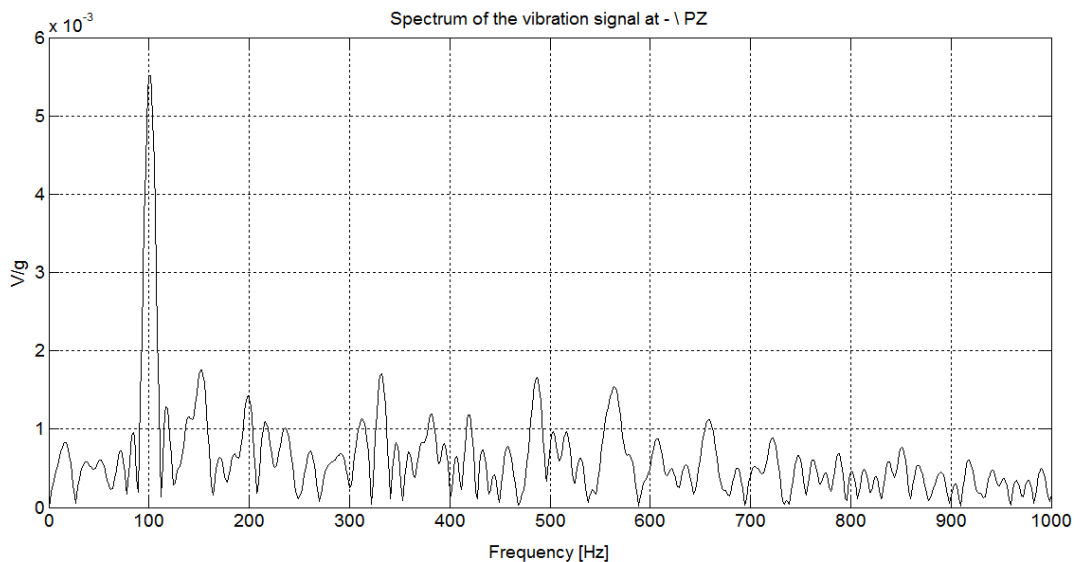


Figura 2.14 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo Z para uma esmeriladora.

A segunda máquina a ser utilizada foi o engenho de furar, Figura 2.15, que tem como função numa oficina de abrir, alargar ou acabar furos de peças, Figura 2.15.

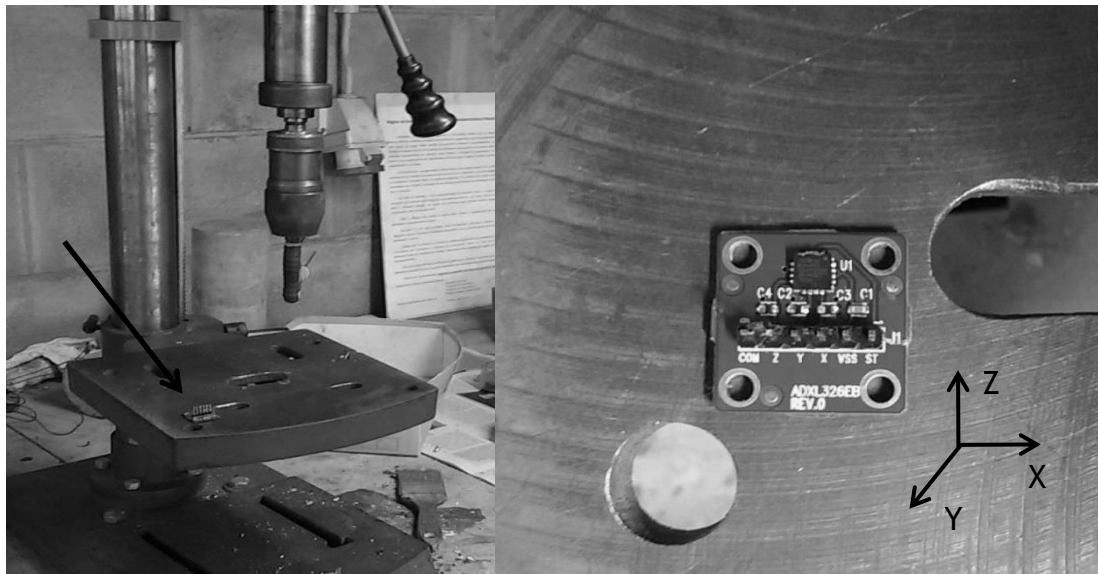


Figura 2.15 - Medição e caracterizam das vibrações num engenho de furar.

Para o engenho de furar existe uma frequência predominante de 110Hz e amplitude de oscilação é significativamente inferior à esmeriladora para o eixo X, Figura 2.16.

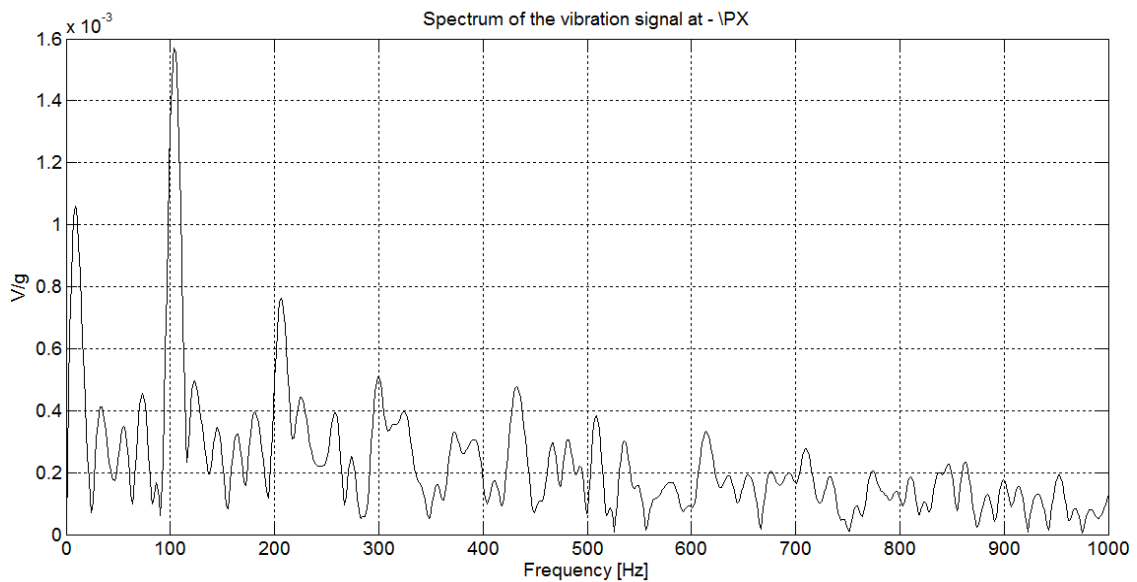


Figura 2.16 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo X para um engenho de furar.

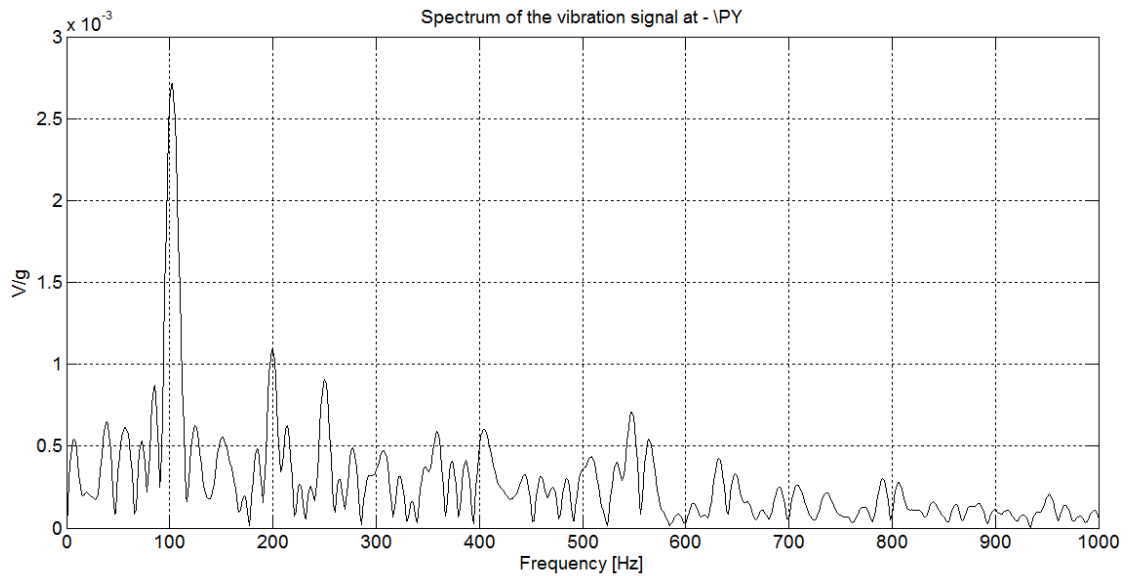


Figura 2.17 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo Y para um engenho de furar.

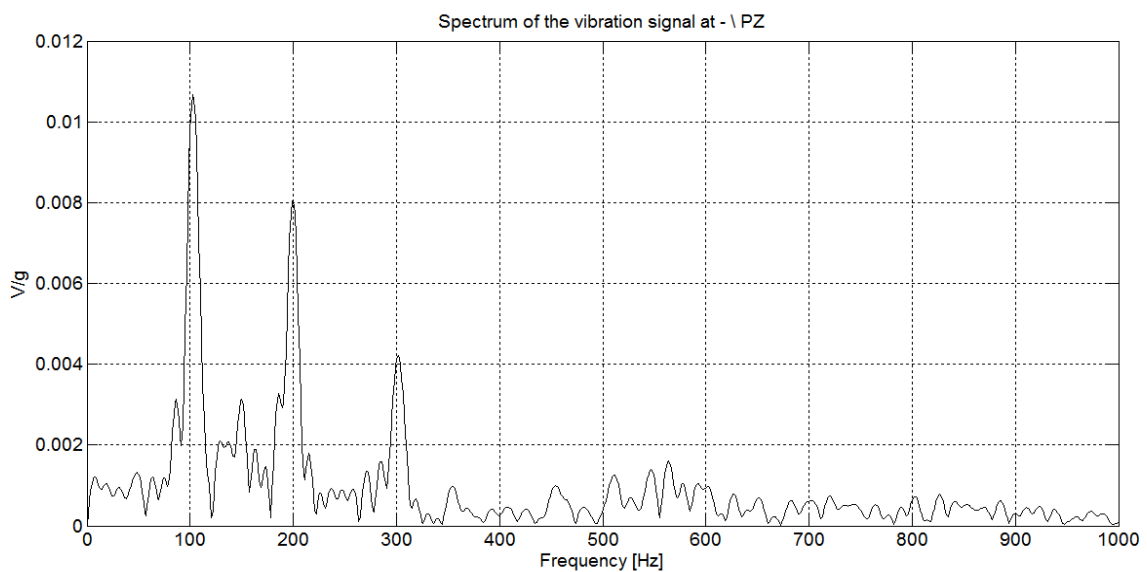


Figura 2.18 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo Z para um engenho de furar.

Para o eixo Y, Figura 2.17, e o eixo Z, Figura 2.18, os resultados são semelhantes aos obtidos na figura anterior com um ligeiro aumento da amplitude do sinal na frequência dominante. O engenho de furar foi utilizado sem estar a furar nenhum objeto, o contrário provavelmente aumentaria o valor das amplitudes das oscilações para os mais diversos eixos.

A última máquina utilizada foi o torno que tem como principal função a maquinação de peças metálicas, para recolher as vibrações foi colocado o acelerómetro na parte superior do torno, tal como indicado na, Figura 2.19, em seguida foi posto a aparelho em funcionamento, mas sem nenhuma peça a ser moldada.



Figura 2.19 - Medição e caracterizam das vibrações num torno.

Para o eixo X, Figura 2.20, denota-se que existem várias frequências predominantes, o primeiro valor de pico que se destaca é perto dos 500Hz com uma amplitude de 0,8mV, que é uma valor, em comparação com os referidos nos exemplos, anteriores bastante inferior. Em seguida surge outro valor elevado perto dos 580Hz com uma amplitude de 0,75mV. O valor da amplitude mais elevada surge perto dos 750Hz com uma amplitude de 0,85mV. Neste exemplo torna-se complicado verificar qual é a frequência predominante neste equipamento, devido ao facto de existirem diversos valores de pico ao longo da gama de frequências.

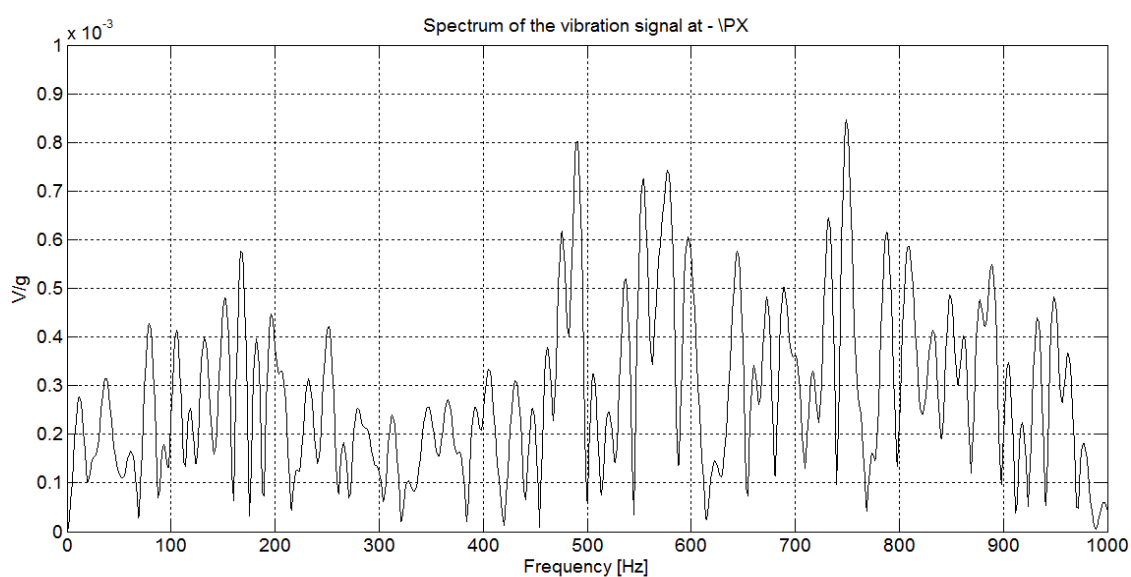


Figura 2.20 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo X para um torno mecânico.

Para o eixo Y, Figura 2.21, ao contrário do exemplo anterior identifica-se que a frequência predominante ronda os 500Hz, com uma amplitude de quase 4,5mV e para o eixo Z, Figura 2.22, voltam a existir novamente várias frequências com valores de pico muito próximos entre si, destacam-se os 450Hz, 500Hz, 580Hz, 640Hz e 690Hz com valores de amplitude entre os 1,6 até 1,8mV.

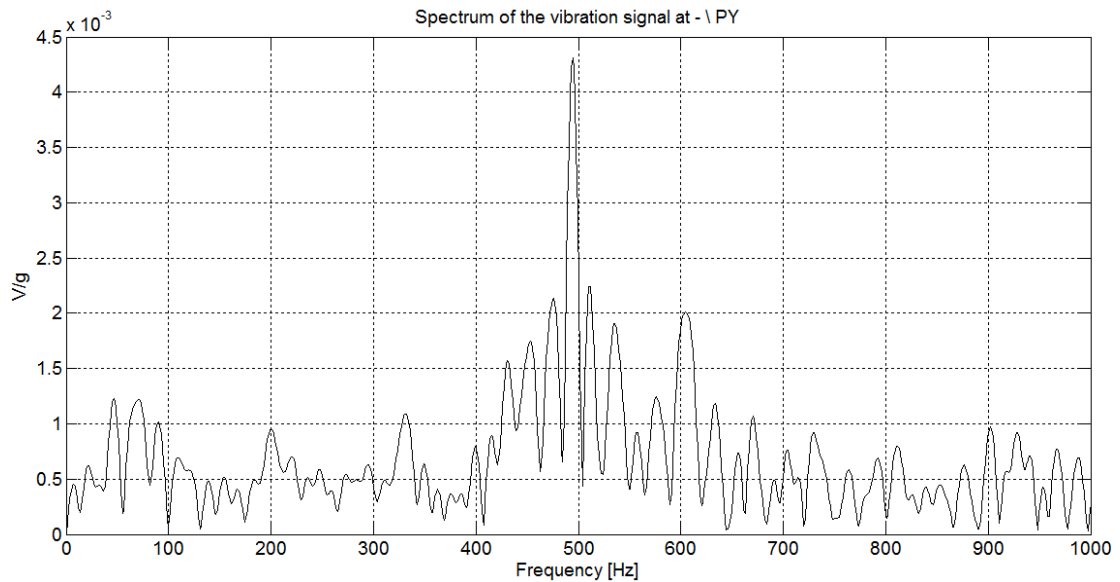


Figura 2.21 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo Y para um torno mecânico.

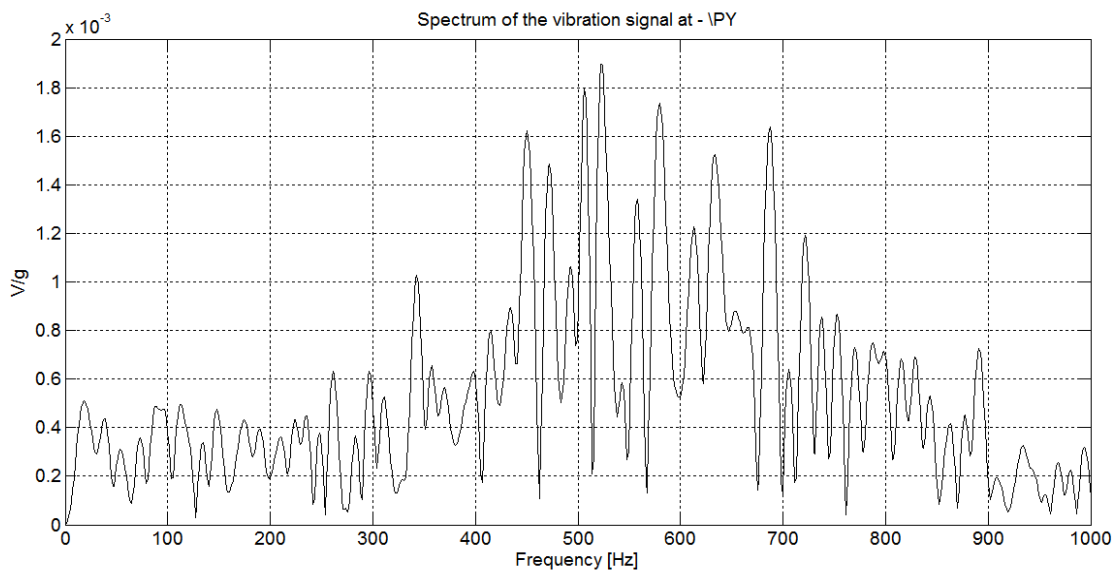


Figura 2.22 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo Z para um torno mecânico.

3. Sistemas Electromagnéticos de Conversão de Energia

3.1. Subsistema mecânico

O objetivo dos transdutores de vibração é converter a energia das vibrações em energia elétrica. No entanto, e do ponto de vista teórico, o desenvolvimento destes transdutores é semelhante ao sistema mola-massa. O primeiro modelo genérico para recolher energia foi desenvolvido por Williams and Yates. O sistema da Figura 3.1 é composto por uma mola linear, apenas com um grau de liberdade e com uma constante de elasticidade da mola k , e um amortecedor, com um fator de amortecimento d , ambos acoplados a um corpo de massa m . A equação que rege o seu movimento é obtida por aplicação da segunda lei de Newton [2]

$$\vec{F} = m\vec{a} \Leftrightarrow -(\vec{F}_s + \vec{F}_d) = m\vec{a} \Leftrightarrow -k(x - y) - d(\dot{x} - \dot{y}) = m\ddot{x}. \quad (1)$$

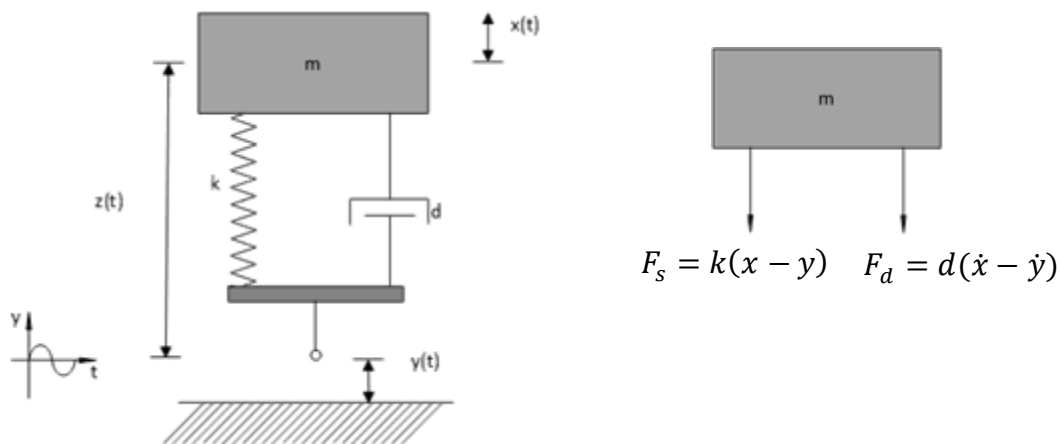


Figura 3.1 - (a) Modelo com um grau de liberdade de um sistema massa, amortecedor e mola.

(b) Corpo dinâmico com oscilações associados a forças da mola F_s e de amortecimento F_d .

Na Figura 3.1, a variável x refere-se à posição da massa em suspensão. Enquanto a variável y se refere à variação da posição da parte inferior da mola. Para coordenadas relativas, introduz-se a variável z , dada por

$$z = x - y. \quad (2)$$

Deste modo, a equação 2 assume a seguinte representação

$$m\ddot{x} = -kz - d\dot{z}, \quad (3)$$

e, conseqüentemente, podemos escrever que

$$m\ddot{z} + d\dot{z} + kz = -m\ddot{y}. \quad (4)$$

Quando na presença de vibrações, a massa desloca-se da sua posição de repouso. Esse deslocamento pode ser utilizado por um transdutor para gerar energia elétrica.

A excitação sinusoidal $y(t)$ pode ser descrita como

$$y(t) = Y \sin(\omega t), \quad (5)$$

em que Y é a amplitude das vibrações, e ω é a frequência angular.

A função de transferência permite facilitar a análise dinâmica de sistemas lineares. Para isso é conveniente converter a modelação realizada no domínio do tempo para o domínio da frequência, utilizando para tal a transformada de Laplace. Assim, o modelo caracterizado pela equação diferencial

$$m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + d \frac{dz(t)}{dt} + kz(t) = -m \frac{d^2 y(t)}{dt^2}, \quad (6)$$

pode ser descrito recorrendo à transformada de Laplace como

$$ms^2 z(s) + dsz(s) + kz(s) = -my(s). \quad (7)$$

Resulta assim a função transferência que descreve o funcionamento de dispositivos como o apresentado anteriormente na Figura 3.1, corresponde a função $H(s)$

$$H(s) = \frac{Z(s)}{Y(s)} = \frac{-ms^2}{ms^2 + ds + k}. \quad (8)$$

Efetuada a substituição $s = j\omega$ obtêm-se

$$H(\omega) = \frac{-j^2 \omega^2 m}{m(j\omega)^2 + d j\omega + k} = \frac{\omega^2 m}{k - m\omega^2 + d j\omega}. \quad (9)$$

Introduzindo a frequência de ressonância, dada por $\omega_n = \sqrt{k/m}$, em que o fator de amortecimento é definido por $\xi_m = d/2m\omega_n$, a equação (9) transforma-se em,

$$H(\omega) = \frac{\omega^2}{(\omega_n^2 - \omega^2) + 2\xi_m \omega_n j}. \quad (10)$$

3.2. Subsistema eletromagnético

Os dispositivos eletromagnéticos utilizam um acoplamento físico entre o sistema mecânico e o sistema elétrico que permite converter a energia mecânica em energia elétrica. No dimensionamento deste tipo de dispositivo, fatores como o tamanho, as propriedades dos materiais e a configuração geométrica de elementos como o íman ou a bobina despenham um papel importante. O acoplamento mais usual nestes dispositivos recorre a um magneto que oscila dentro de uma bobina. Pela lei de Faraday, a variação do fluxo magnético criará uma diferença de potencial responsável pela circulação de corrente designada por corrente induzida. O fluxo magnético é definido pela expressão

$$\Phi = \iint_A B dA, \quad (11)$$

Onde, A indica a área e B a intensidade do campo magnético.

O valor da força eletromotriz induzida ε , numa espira de área A é igual à taxa de variação ao longo do tempo do fluxo magnético Φ através dessa mesma espira. Matematicamente, no ano de 1845, Franz Ernest Neumann escreveu que

$$|\varepsilon| = \left| \frac{d\Phi}{dt} \right|, \quad (12)$$

A lei de Faraday expressa a intensidade da força eletromotriz induzida. Em 1834 Heinrich E. Lenz definiu que a força eletromotriz induzida é igual ao oposto da variação do fluxo magnético que lhe deu origem, ou seja,

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (13)$$

Os geradores eletromagnéticos são constituídos por um, ou vários, ímanes, responsáveis por produzir campos magnéticos de valor elevado, e uma bobina que se vai sujeitar à variação do campo magnético. Existem duas arquiteturas possíveis: com bobina fixa e o íman em movimento; ou o oposto.

O deslocamento causado por este movimento gera energia elétrica. A tensão induzida é também conhecida com força contra eletromotriz (emf).

Na primeira arquitetura, o campo magnético formado em relação à bobina é horizontal e, na segunda arquitetura, é vertical.

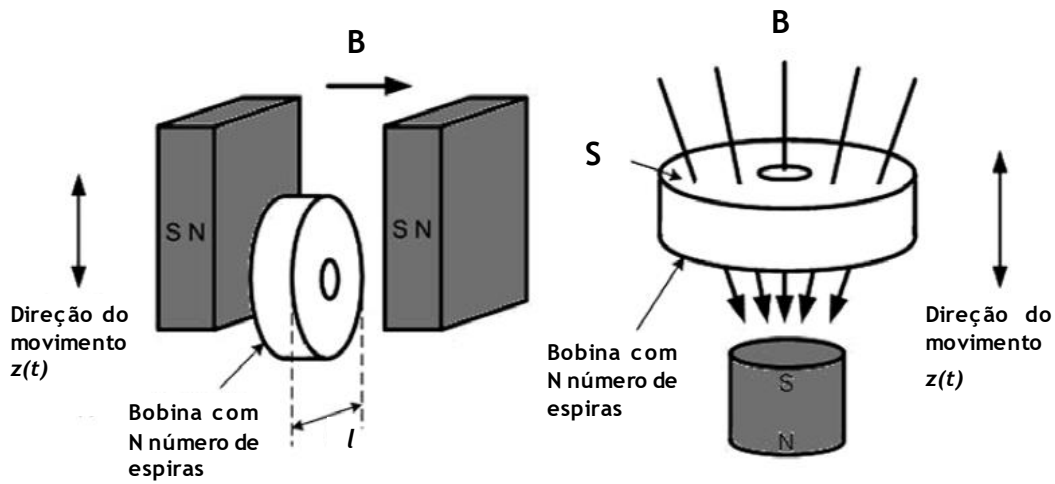


Figura 3.2 - Dois exemplos comuns de geradores eletromagnéticos [4].

A Figura 3.2 representa estas duas arquiteturas. Para a primeira figura a força eletromotriz é dada por,

$$emf = -N \times B \times l \times \frac{dz}{dt}. \quad (14)$$

Na equação anterior o parâmetro N corresponde ao número de espiras da bobina, o B diz respeito à densidade de fluxo dentro da bobina, o l à largura da bobina e o dz/dt é a velocidade relativa entre o ímã e a bobina.

Na segunda figura, a equação da força eletromotriz é dada por,

$$emf = -N \times S \times \frac{dB}{dz} \times \frac{dz}{dt}. \quad (15)$$

Considerando que S é a área efetiva da bobina e dB/dz é o gradiente da densidade de fluxo ao longo da direção de movimento entre o ímã e a bobina [4].

Em ambos os casos a velocidade relativa do movimento $z(t)$ pode ser expressa como:

$$emf = k \times \frac{dz}{dt}, \quad (16)$$

O caso k pode representar $-NlB$ e $-NS \frac{dB}{dz}$.

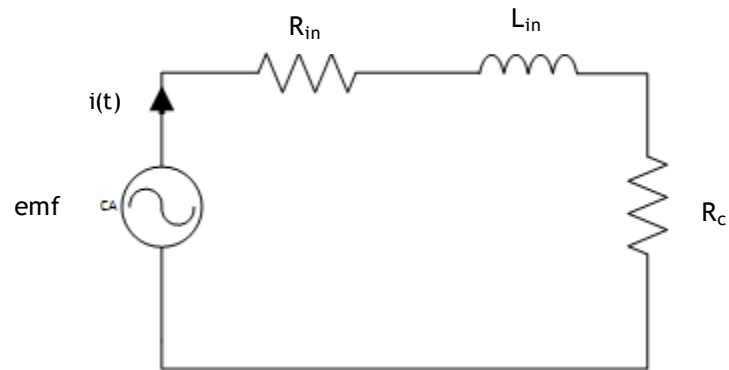


Figura 3.3 - Representação de um circuito eletromagnético.

A Figura 3.3 representa o circuito corresponde ao gerador eletromagnético ao qual se aplica uma carga R_c . A relação entre a corrente e a resistência induzida pela emf é dada por

$$e.m.f + i \times (R_c + R_{in}) + L_{in} \frac{di}{dt} = 0, \quad (17)$$

e

$$i \times (R_c + R_{in}) + L_{in} \frac{di}{dt} = -NBl \frac{dz(t)}{dt}. \quad (18)$$

3.3. Sistema global

O circuito elétrico equivalente que descreve o processo de conversão da energia cinética das vibrações em energia elétrica pode ser encontrado através da equação de transferência acima referenciada (7),

$$-m \cdot y(s) = sz(s) \left(ms + d + \frac{k}{s} \right). \quad (19)$$

A equação pode ser reescrita como

$$-I(s) = V(s) \left(sC + \frac{1}{R} + \frac{1}{sL} \right). \quad (20)$$

Assim tem-se $I(s) = ma(s)$, $V(s) = sZ(s)$, $C = m$, $R = \frac{1}{b}$, $L = \frac{1}{k}$.

O conceito de amortecedor provém de um dispositivo que produz um atrito ou amortecimento mecânico, matematicamente traduzido pela equação (21) ou elétrico que se traduz na equação (22).

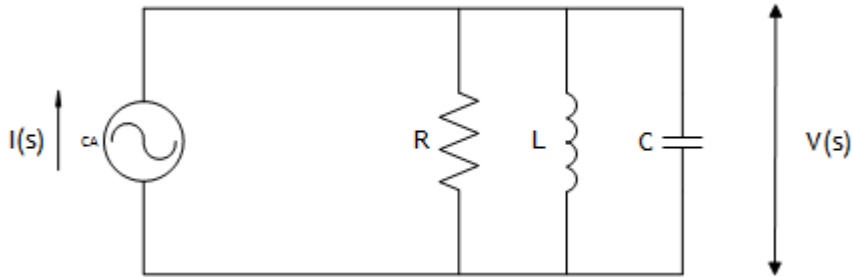


Figura 3.4 - Circuito elétrico equivalente.

$$\xi_m = \frac{d_m}{2m\omega_n}, \quad (21)$$

$$\xi_e = \frac{d_e}{2m\omega_n}. \quad (22)$$

Em que ξ_m é o fator amortecimento mecânico, ξ_e o fator de amortecimento elétrico e fator de qualidade , Q .

$$Q_T = \frac{1}{2\xi_T}. \quad (23)$$

Potência de saída para dispositivos de *Energy Harvesting*. Assumindo que a entrada sinusoidal é de $y(t) = Y\sin(\omega t)$

A solução pode-se assumir como

$$z(t) = Z\sin(\omega t - \varphi). \quad (24)$$

O Z é a amplitude de oscilação e φ é a fase entre a excitação e a oscilação da massa. Pode ser substituído nas equações tal, amplitude e a fase podem ser encontradas através da seguinte fórmula

$$Z = \frac{m\omega^2 Y}{-m\omega^2 + j\omega d + k}. \quad (25)$$

Também pode ser representado segundo a transformada de Fourier,

$$Z = \frac{m\omega^2 Y}{\sqrt{(k-m\omega^2)^2 + (j\omega d)^2}}, \quad (26)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega d}{k-m\omega^2}\right). \quad (27)$$

A potência dissipada com o amortecimento é a soma das potências extraídas por um transdutor mecânico e a potência mecânica perdida no amortecimento e é representada por [4]:

$$P_d = d \left(\frac{d(t)^2}{dt} \right). \quad (28)$$

4. Modelação e Simulação de Exemplos Académicos

Para um estudo mais detalhado do modo de operação dos dispositivos eletromagnéticos de conversão de energia utilizaram-se ferramentas de elementos finitos que permitem a modelação e simulação numérica de exemplos académicos. Parâmetros como a geometria dos dispositivos, as condições de fronteira, os materiais utilizados na construção e respetivas propriedades foram tomados em consideração. O programa utilizado foi o Flux2D V7.40.

Este capítulo recorre a duas configurações que servem de base ao desenvolvimento destes dispositivos. O primeiro modelo numérico é constituído por um íman que oscila dentro de uma bobina. O segundo modelo apenas difere do primeiro porque considera um invólucro de aço que envolve o íman e a bobina.

Foram realizados dois tipos diferentes de estudo: o estático que é realizado com o íman imobilizado em diferentes posições dentro da bobina; e o dinâmico em que o íman oscila dentro da bobina com uma determinada frequência e amplitude.

4.1. Construção do modelo de elementos finitos

Na construção do modelo de elementos finitos começou-se por desenhar a geometria, foram criados pontos de modo a que unidos representassem um íman, uma bobina, um espaço de deslocamento e, por fim, um espaço envolvente que é o ar. Após este passo inicial é necessário subdividir a figura em regiões. A geometria considera-se como tendo uma simetria axial.

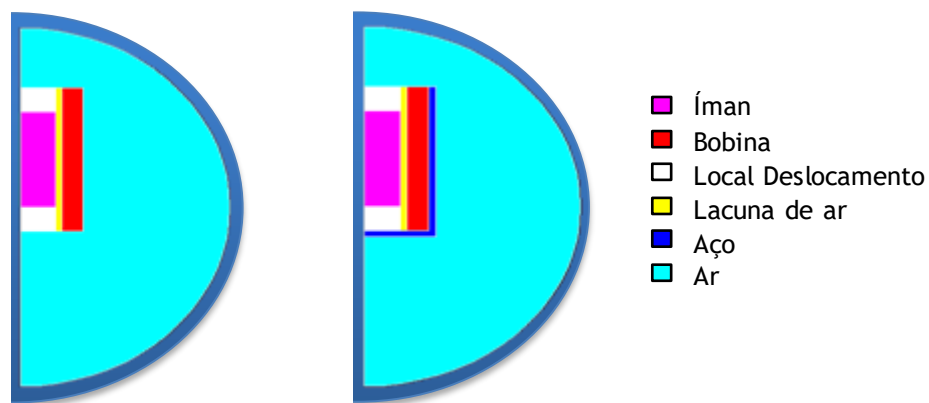


Figura 4.1 - Representação do modelo simulado no programa de elementos finitos.

É agora necessário criar uma malha composta por elementos triangulares como elementos finitos de segunda ordem. Estes elementos permitem resolver as equações diferenciais parciais, que utilizando condições fronteira específicas, podem ser solucionadas e devolvem valores solução. As regiões são subdivididas em partes mais simples, de forma a resolver o problema apelando a minimização de uma função e ao erro associado.

Esta subdivisão tem inúmeras vantagens, entre as quais:

- representação precisa da geometria;
- a inclusão das propriedades dos materiais;
- fácil representação da solução total.

Na criação desta malha, Figura 4.2, há aspetos que necessitam receber atenção, nomeadamente, os ângulos formados entre a ligação dos vários nós. Estes garantem a qualidade dos elementos finitos formados e são subdivididos em dois tipos, em elementos triangulares, em que os ângulos devem ser superiores a 15° , caso contrário serão considerados como de fraca qualidade e serão rodeados por um retângulo verde, e os elementos quadrangulares, em que o ângulo terá de ser superior a 22° e a relação entre o comprimento L e largura l deverá ser menor do que 5. Caso isto não aconteça o elemento será rodeado por verde-escuro, ou se for muito pequeno, por um retângulo azul [13].

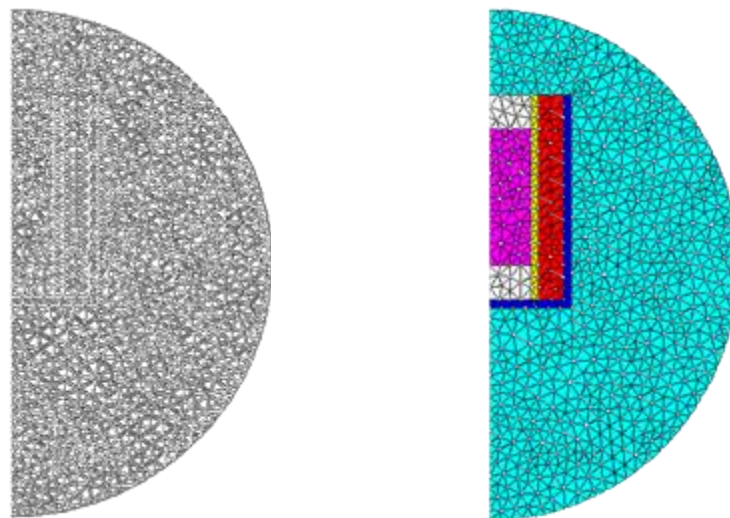


Figura 4.2 - Arquitetura depois de aplicação de uma malha.

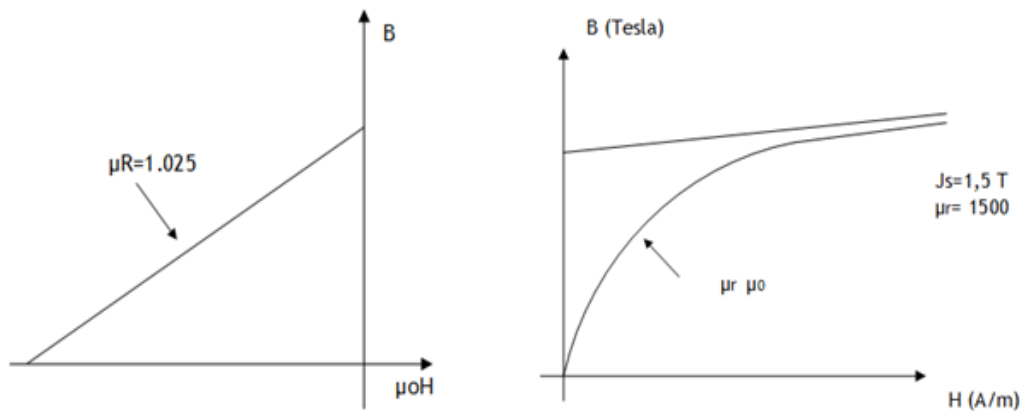


Figura 4.3 - Características do aço e do íman.

Concluída a primeira fase de construção do modelo é a vez de definir as propriedades dos materiais utilizados. Nesta secção há que ter em conta que o íman é definido por duas propriedades diferentes: o magnetismo residual, B_r , e a permeabilidade relativa μ_r . Para o invólucro de aço, há uma característica que é necessário ter consideração, que é a magnetização de saturação, J_s .

O software Flux 2D permite criar um circuito elétrico que pode ser associado ao modelo numérico desenvolvido. Os utilizados no desenvolvimento deste dispositivos é o *Transient Magnetics*. O objetivo passa por associar à bobina uma carga (resistência), para medir alguns dos parâmetros mais importantes como, a corrente, a tensão e a potência.

O programa permite que o utilizador crie diversas rotinas para expandir a capacidade computacional das suas funções e assim satisfazer as necessidades especificidades do programador. Nas simulações é importante fazer oscilar um íman imerso numa bobina. Esta ação deve ocorrer observando uma determinada amplitude e frequência específicas. Os resultados obtidos das simulações permitem analisar os valores supracitados. A linguagem de programação utilizada no desenvolvimento dessa funcionalidade foi o Fortran.

```
SUBROUTINE USRLIV (UCOEF , VCX,VCY)
C
C This subroutines defines a spring with translating motion
C
REAL UCOEF(1), VCX,VCY
C*****
INCLUDE 'TEMPS'
C
VCY = (UCOEF (2)*COS (UCOEF (3)*6.283185*TPS))
VCX = 0
PRINT*, TPS
PRINT*, VCY
PRINT*, VCX
C
RETURN
END
```

A sub-rotina USRLIV é utilizada para impor uma velocidade segundo um eixo vertical para obter um movimento de translação do íman. Os parâmetros de entrada são descritos como: *UCOEF(1)*, que representa o número de coeficientes a serem introduzidos pelo utilizador; *UCOEF(2)* é o valor da amplitude; e *UCOEF(3)* o valor da frequência. Os valores da saída são representados por *VCX*, que corresponde ao valor da velocidade segundo o eixo horizontal, e *VCY*, que corresponde ao valor da velocidade segundo o eixo vertical [14].

O programa foi implementado de modo a que a *VCX* fosse 0 e *VCY* corresponde-se a uma entrada variável ao longo do tempo, e representada matematicamente como $VCY = A\cos(\omega t)$.

As propriedades físicas associam as diversas regiões aos respetivos materiais, nesta secção faz-se a junção entre a geometria, as propriedades dos materiais, as condições de fronteira e o circuito elétrico.

No fim é pedido ao programa que corra a simulação englobando todos os parâmetros, recorrendo ao solve, onde é necessário definir uma escala temporal, a precisão de cada iteração e o deslocamento máximo permitido [15].

4.2. Simulação e análise de resultados

4.2.1. Simulações de análise estática

A análise estática é utilizada quando o íman se encontra parado dentro da bobina. Parâmetros como a posição do magneto e a dimensão da bobina são importantes para perceber como varia o fluxo dentro da bobina em cada uma das posições.

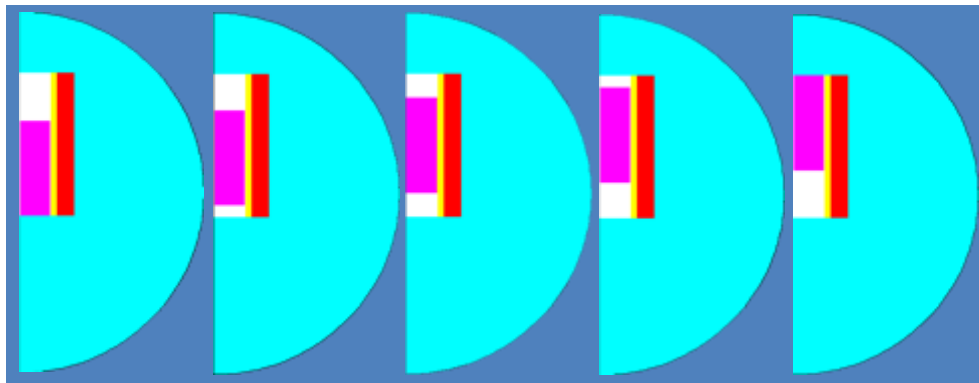


Figura 4.4 - Figura com as diferentes posições do íman.

Considerando a imagem central como referência, o primeiro modelo encontra-se a menos quatro milímetros, o segundo a menos dois milímetros, o quarto está a dois milímetros e por fim o quinto encontra-se a quatro milímetros, o que perfaz no total um deslocamento de oito milímetros verticalmente.

Nesta análise apresentam-se os resultados variando a posição da íman e calculando o valor do fluxo magnético dentro da bobina para diferentes pontos, este fluxo é gerado através de um número de linhas de campo que atravessa um superfície plana com uma determinada área colocada perpendicularmente a um campo magnético.

Matematicamente escreve-se

$$\Phi = B A \cos\theta. \quad (29)$$

Pode traduzir-se o fluxo magnético por Φ , B representa o campo magnético e A a área de superfície plana.

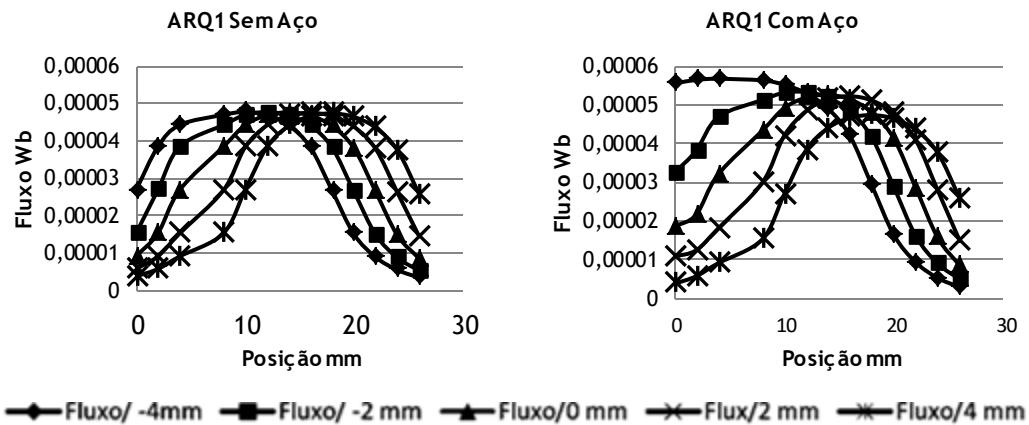


Figura 4.5 - Fluxo nas diferentes posições do íman.

Variando a posição do íman tal como indicado na Figura 4.5, constata-se que o fluxo se comporta de uma forma semelhante, este comportamento está relacionado com as linhas de campo que são mais densas no centro do íman, o que torna o campo magnético mais intenso. É nesta zona que o fluxo é máximo, ao afastar-se do centro em direção às extremidades o fluxo vai diminuindo de forma gradual até chegar a valores perto do 0.

Na Figura 4.5 o fluxo é ligeiramente superior, pois o aço é um material ferromagnético com elevada permeabilidade magnética em relação ao ar, desta forma faz com que a densidade de fluxo dentro da bobina seja mais elevada.

4.2.2. Simulações de análise dinâmica

Na análise dinâmica é importante perceber que que o íman oscila dentro da bobina. Ao criar a sub-rotina em fortran foi necessário especificar um sinal de entrada oscilatório com duas características fundamentais, a amplitude que está relacionada com o espaço de deslocamento do íman, e a frequência que corresponde ao número de oscilações.

Para a simulação foi imposto um harmónico puro com as seguintes características, a equação 30 refere-se a posição e matematicamente traduz por

$$y(t) = \text{sen}(wt), \quad (30)$$

a primeira derivada corresponde à velocidade

$$\dot{y}(t) = A \cos(wt), \quad (31)$$

e, por fim, a aceleração

$$\ddot{y}(t) = -wAsen(wt). \quad (32)$$

A Figura 4.6 representa os gráficos da posição, velocidade e aceleração utilizados, no decorrer das simulações, com um deslocamento de 5mm.

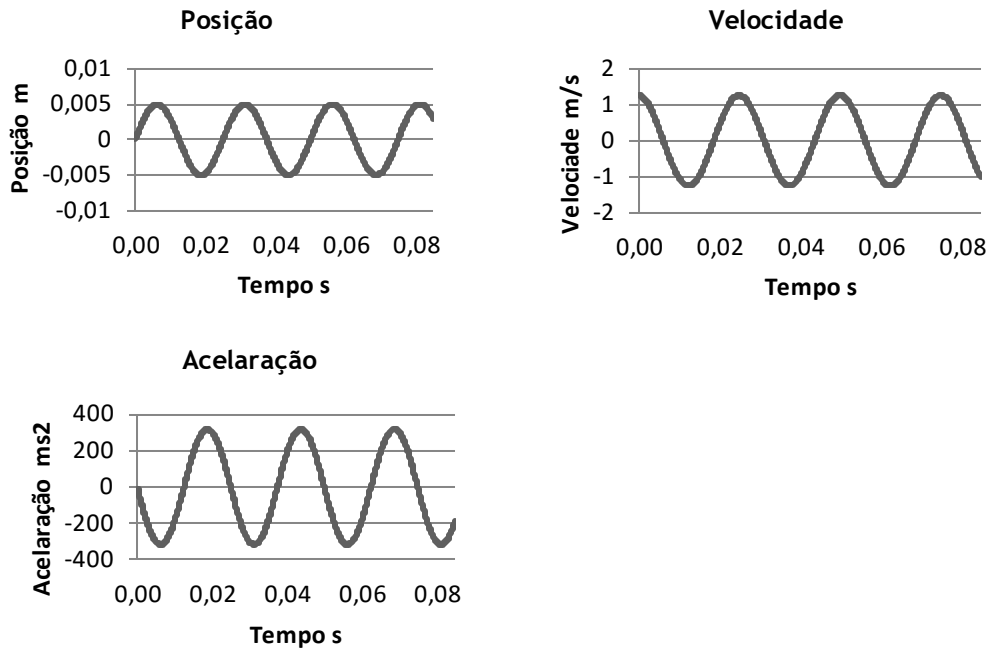


Figura 4.6 - Gráficos da Posição, Velocidade e Aceleração.

Para a entrada consideraram-se diferentes frequências e amplitudes de oscilação, com o intuito de analisar os parâmetros fundamentais que permitem um estudo sobre a influência da fonte na carga, destacam-se a tensão e correntes eficazes que correspondem aos valores que deveriam ter em corrente contínua para produzir numa resistência a mesma taxa de dissipação de energia (potência) que produz em corrente alternada, e por fim a potência média que é fornecida a carga.

As expressões relacionadas com a tensão e a corrente eficaz são as seguintes:

$$V_{ef} = \frac{V_{máx}}{\sqrt{2}}, \quad (33)$$

$$I_{ef} = \frac{I_{máx}}{\sqrt{2}}. \quad (34)$$

Na Figura 4.7 são ilustrados os valores de tensão para uma arquitetura sem/com aço, com a mesma amplitude, para diferentes resistências com uma frequência de 50Hz e de 100Hz.

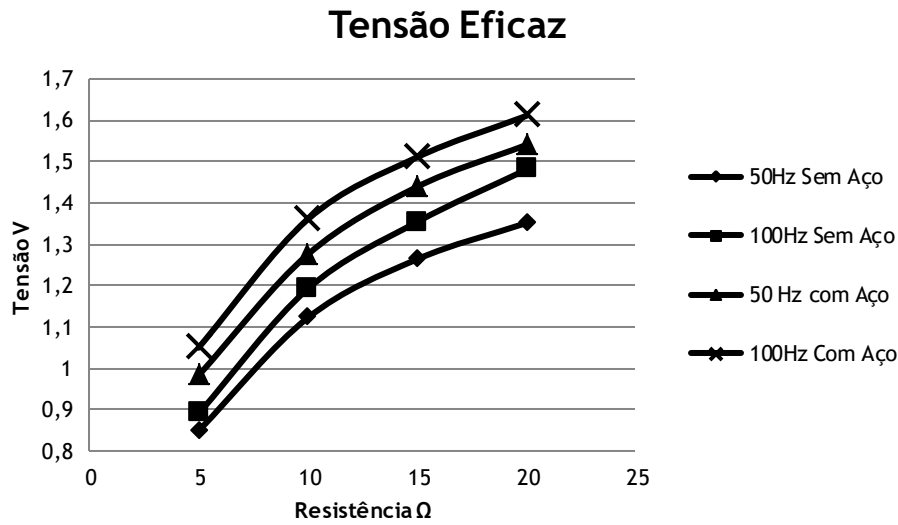


Figura 4.7 - Tensão eficaz para uma arquitetura com e sem aço de exemplos académicos.

A tensão eficaz na carga está diretamente relacionada com a resistência que esta oferece à passagem da corrente, quanto maior é a resistência menor será a tensão.

O cálculo do valor eficaz é de extrema importância pois permite comparar valores obtidos em AC com as grandezas associadas em DC.

A diferença entre as duas arquiteturas está no invólucro de aço que envolve a segunda figura, esse aumento da tensão está diretamente relacionado com o aumento do fluxo.

Para as posições onde o fluxo é máximo, o valor de tensão correspondente será também maior.

Para a tensão eficaz há algumas conclusões que se podem verificar facilmente. Para uma arquitetura com aço, os valores de tensão são superiores, devido às suas propriedades ferromagnéticas. Em contrapartida com o ar, que não possui essas características, e com o aumento do valor da resistência, valor da tensão aumenta por inerência. Os valores da tensão situam-se entre os 0,85 e os 1,62V.

O valor da corrente eficaz resulta da divisão da tensão eficaz pela resistência de carga associada, que se pode verificar através da fórmula:

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{R_c} \quad (35)$$

Na Figura 4.8 é possível verificar o perfil da corrente para os mesmos parâmetros utilizados no cálculo da tensão eficaz.

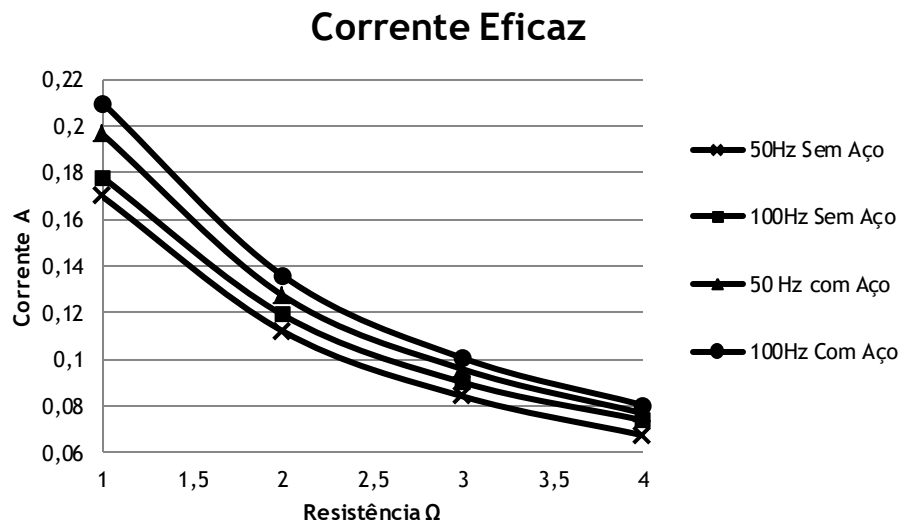


Figura 4.8 - Corrente eficaz para uma arquitetura com e sem aço de exemplos académicos.

A corrente eficaz, e à semelhança do capítulo anterior para uma arquitetura com aço, os valores da corrente são superiores e variam entre 0,0675 e 0,21A.

O valor da potência média resulta da multiplicação da tensão pela corrente eficaz, este valor permite calcular a potência dissipada numa resistência quando percorrida por uma corrente elétrica alternada.

Matematicamente pode-se traduzir como:

$$P_{med} = V_{ef} \times I_{ef}. \quad (36)$$

Na Figura 4.9 é possível verificar o perfil da potência média para os mesmos parâmetros utilizados anteriormente.

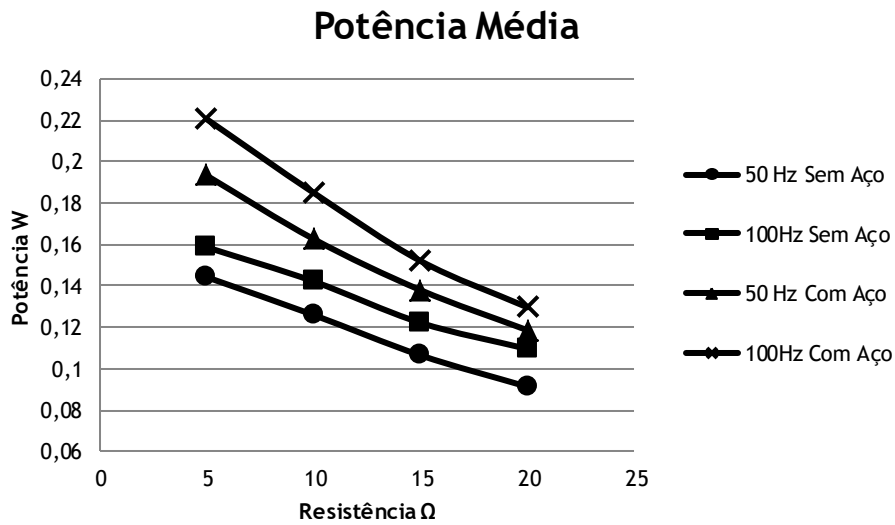


Figura 4.9 - Potência Média para uma arquitetura com e sem aço de exemplos académicos.

Para a potência média, neste caso os valores da potência média são superiores na resistência de 5Ω , que se situa perto da resistência interna da bobina imposta que era de 3Ω . Os valores da potência nesta situação variam de $0,09$ até $0,22W$.

No dimensionamento de uma fonte, existem algumas considerações gerais, tais como adaptar a impedância de uma fonte à impedância de uma carga.

A adaptação da impedância permite que a potência entregue pela fonte à carga seja máxima.

O circuito resistivo representado na Figura 4.10 mostra uma fonte de tensão em série com uma resistência interna (R_{in}) e com uma resistência de carga (R_c).

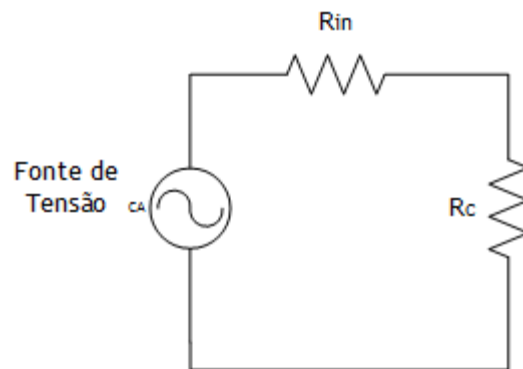


Figura 4.10 - Circuito resistivo com duas cargas.

Para maximizar a potência fornecida da fonte à carga, é necessário minimizar a dissipação de potência interna da fonte através da resistência R_{int} e a dissipação da potência na carga através da resistência R_c .

Considerando os valores de tensão e resistências utilizados nas simulações, ou seja, a resistência interna da fonte (R_{int}) igual a 3Ω , considerando que para uma arquitetura sem aço a fonte de tensão é 1V. Matematicamente pode-se calcular a potência transferida através das seguintes expressões matemáticas,

$$R = R_{in} + R_c, \quad (37)$$

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R}, \quad (38)$$

$$P_t = I_{in}^2 \times R_c. \quad (39)$$

Por exemplo, para um valor de resistência de carga de 1Ω ,

$$R = 3 + 1 = 4\Omega,$$

$$I_{in} = \frac{1}{4} = 0,25 \text{ mA},$$

$$P_t = 0,25^2 \times 1 = 0,0625 \text{ W}.$$

Na seguinte, Tabela 4.1 estão representadas resistências utilizadas no decorrer das simulações.

Tabela 4.1 - Valor da potência para diferentes resistências.

$R_{in} \Omega$	$R_c \Omega$	$R \Omega$	$I_{in} \text{ mA}$	$P_t \text{ W}$
3	1	4	0,25	0,0625
3	3	6	0,16667	0,08333
3	5	8	0,125	0,078125
3	10	13	0,0769	0,05917
3	15	18	0,05556	0,04629
3	20	23	0,0435	0,0378

Pelo quadro seguinte, podemos concluir que a potência entregue pela fonte à carga é máxima quando o valor da resistência da fonte é igual ao valor da resistência da carga [16].

5. Desenvolvimento de Dispositivos de Recolha das Vibrações

Com base no estudo detalhado de modelos académicos e recorrendo ao software de simulação por elementos finitos flux2D, definiu-se um modelo específico para ser estudado e desenvolvido. Levou-se em consideração os parâmetros estudados até aqui e o material disponível para a realização do procedimento experimental.

Numa primeira fase deste capítulo descreve-se a configuração do dispositivo de recolha de energia através do Flux2D, em seguida, analisam-se os resultados obtidos através das simulações estáticas e dinâmicas. Na última parte do capítulo estuda-se a capacidade de ajuste da frequência de ressonância.

5.1. Proposta de configuração de um dispositivo de recolha de energia

À semelhança do capítulo anterior, o procedimento adotado na construção do modelo de elementos finitos, teve início com o desenho da geometria, que consistiu em desenhar os vários pontos que a definem e em seguida uni-los através de segmentos de reta de modo a estabelecer as várias regiões do modelo. Assim, temos um íman, uma bobina, uma área de deslocamento, um entreferro de ar e o ar envolvente do modelo, tal como se representa na Figura 5.1.

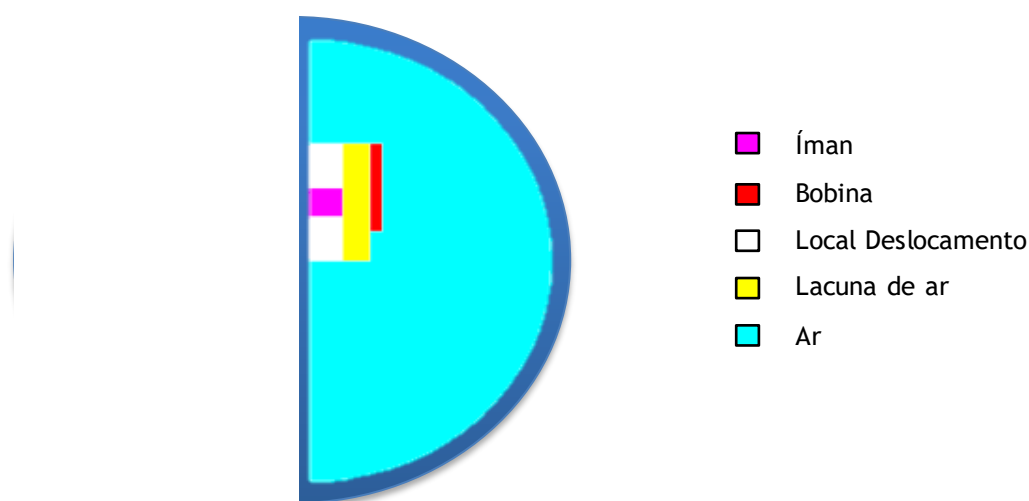


Figura 5.1 - Representação do modelo simulado no programa de elementos finitos.

Após a definição das várias superfícies da geometria, e à semelhança do que foi escrito anteriormente, é necessário criar uma malha. As principais características desta subdivisão em particular estão relacionadas com a região de deslocamento, que não pode conter elementos triangulares, e com a região de entreferro que não pode conter elementos triangulares. Se estas duas condições se verificarem, assim como as referidas anteriormente, como os graus internos dos triângulos, a malha está pronta para a próxima fase.

Na próxima fase é necessário definir as propriedades dos materiais, neste protótipo é utilizado um íman de Neodímio (NdFeB). Nas suas propriedades é necessário introduzir a densidade de fluxo B_r que é 1,17T e a permeabilidade relativa μ_r igual a 1,05N/A² que é um valor tabelado para todos os ímanes deste material.

O valor do fluxo remanescente é obtido através do fabricante, que indica que o íman pertence a classe N35, da qual se retira alguma informação da Tabela 5.1 [17].

Tabela 5.1 - Propriedades do um íman de Neodímio [17].

Grade	Br (T)	Tmax °C/F
N35	11,7 - 12,2	80°C / 176F
N38	12,2 - 12,5	80°C / 176F
N40	12,5 - 12,8	80°C / 176F
N42	12,8 - 13,2	80°C / 176F
N45	13,2 - 13,8	80°C / 176F
N48	13,8 - 14,2	80°C / 176F
N50	14,0 - 14,5	70°C / 158F
N52	14,3 - 14,8	70°C / 158F

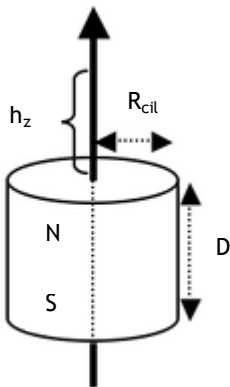
Através do fluxo remanescente pode-se estudar as propriedades do íman, iniciou-se o estudo por perceber que a densidade de fluxo magnético de um íman, também designado por "campo magnético" ou "indução magnética". E é medido em tesla (unidade SI).

Um íman permanente produz um campo magnético no seu núcleo e nos seus arredores. A intensidade de campo tem uma direção que pode ser atribuída a cada ponto dentro e fora do magneto. Ao posicionar uma pequena agulha de uma bússola no campo magnético de um íman, este orienta-se na direção do campo, com uma força que é proporcional à força do campo magnético.

Não existem fórmulas simples que calculem o campo para as mais várias formas do íman, existem sim, fórmulas simples para geometrias simétricas menos complexas, que indicam o

campo magnético com um eixo de simetria na direção do polo norte para o polo sul. Posteriormente, indicam-se a fórmula para um íman cilíndrico [18].

$$B = \frac{B_r}{2} \left(\frac{D+h_z}{\sqrt{R_{cil}^2 + (D+h_z)^2}} - \frac{h_z}{\sqrt{R_{cil}^2 + h_z^2}} \right). \quad (40)$$



B_r : Campo Remanescente, independente da geometria do íman.

h_z : Distância da face no eixo de simetria.

D : Altura do cilindro.

R_{cil} : Raio do cilindro

Figura 5.2 - Íman cilíndrico com indicação das variáveis [18].

Em seguida, associa-se um circuito ao modelo numérico, é necessário para isso criar um circuito para que possa ser analisado posteriormente. Assim, o circuito é definido por uma bobina, com 200 espiras e resistência interna de 12Ω , e uma resistência de carga (R_c) que será alterada ao longo das diversas simulações.

No dimensionamento do gerador um dos parâmetro mais importantes a ter em consideração, é a bobina, em que o número de espiras aliadas e a resistência do enrolamento são fundamentais para obter uma potência de saída otimizada.

O número de espiras é definido consoante a geometria da bobina, e o tipo de condutor utilizado é importante nas definições das propriedades da mesma.

Tipicamente recorre-se *American Wire Gauge* (AWG) que representa a escala normalizada utilizada na padronização de condutores e cabos elétricos. A escolha do diâmetro do condutor a utilizar tem em consideração o número de voltas sem isolamento, a área, a resistência do cobre e corrente máxima permitida.

O condutor disponível na universidade possui um diâmetro de 0,16mm. Tendo isso em consideração e recorrendo à Tabela 5.2 pode-se verificar alguns dos valores tabelados AWG, para o condutor que será utilizado [19].

Tabela 5.2 - Tabela padrão *American Wire Gauge* (AWG) [19].

Número AWG	Diâmetro (mm)	Secção (mm ²)	Número de espiras por cm	Kg por Km	Resistência (Ω/Km)	Capacidade (A)
31	0,2268	0,04	39,8	0,36	425	0,11
32	0,2019	0,032	44,5	0,28	531,2	0,09
33	0,1798	0,0254	56	0,23	669,3	0,072
34	0,1601	0,0201	56	0,18	845,8	0,057
35	0,1426	0,0159	62,3	0,14	1069	0,045
36	0,127	0,0127	69	0,1	1338	0,036
37	0,1131	0,01	78	0,089	1700	0,028

Com as particularidades de cada condutor, e recorrendo à tabela acima mencionada, pode-se obter matematicamente os seguintes parâmetros:

O volume da bobina pode-se traduzir matematicamente por,

$$V_T = \pi(r_0^2 - r_i^2)t_k. \quad (41)$$

O comprimento do condutor

$$L_W = \frac{4f_i V_T}{\pi w_d^2}. \quad (42)$$

A resistência da bobina

$$R_b = \rho \frac{N^2 \pi (r_0 + r_i)}{f_i (r_0 - r_i) t_k}. \quad (43)$$

E o número de espiras

$$N = \frac{L_W}{r_i + \frac{(r_0 - r_i)}{2}}. \quad (44)$$

Tipicamente o valor do enchimento f_i é desconhecido.

A ferramenta de análise por elementos finitos possibilita diferentes tipos de simulação. Em situações de funcionamento estático é utilizado o método de resolução *Magnetostatic*. Considerando que existe movimento das partes móveis do modelo quer se utilize o método de resolução *Transient Magnetics* [13].

Em seguida, recorrendo à rotina apresentada no capítulo anterior, é simulado o protótipo para diversas resistências de carga e diversas amplitudes de deslocamento do íman. O tempo de simulação escolhido foi de 1 segundo para todas as simulações dinâmicas.

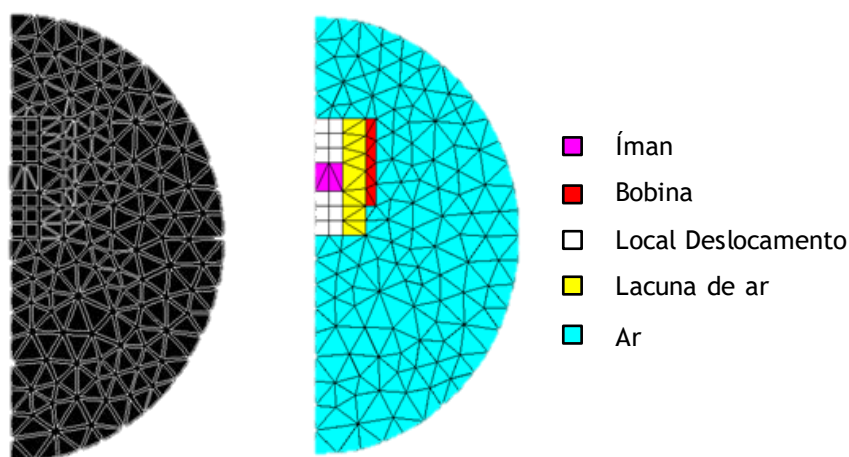


Figura 5.3 - Arquitetura do modelo depois de aplicação de uma malha.

5.2. Simulação e otimização através de elementos finitos

Neste subcapítulo são retratados e analisados os ensaios efetuados ao modelo experimental. O estudo começa com uma análise estática, com o intuito de analisar o fluxo gerado pelo ímã dentro da bobina. Na segunda parte é realizado o estudo de análise dinâmica, onde o principal objetivo passa por variar o valor da resistência de carga e da frequência do movimento oscilatório para assim analisar a potência de saída correspondente.

5.2.1. Simulações de análise estática

Na análise estática, e à semelhança do capítulo anterior, é colocado o ímã em diferentes posições, a posição do magneto e dimensão da bobina, são parâmetros importantes para perceber como varia o fluxo dentro da bobina em cada uma das posições, Figura 5.5.

Neste estudo expõem-se os resultados obtidos variando a posição do ímã e calculando o fluxo magnético ao longo do local de deslocamento para diferentes posições.

Pelo Figura 5.4 verifica-se que o fluxo é máximo dentro da bobina nas últimas três posições do ímã. Ou seja, nas primeiras duas posições o ímã não se encontra imerso na bobina, como as suas linhas de fluxo, que se concentram principalmente em torno dele mesmo, não provocam um fluxo máximo dentro da mesma.

Para melhorar os resultados obtidos, e em coerência com o capítulo anterior, poder-se-ia adicionar um invólucro de aço, ou outro tipo de material ferromagnético. Como o aço é dificilmente moldável optou-se por não colocar nesta etapa do trabalho de forma a transpor este estudo teórico para um estudo prático.

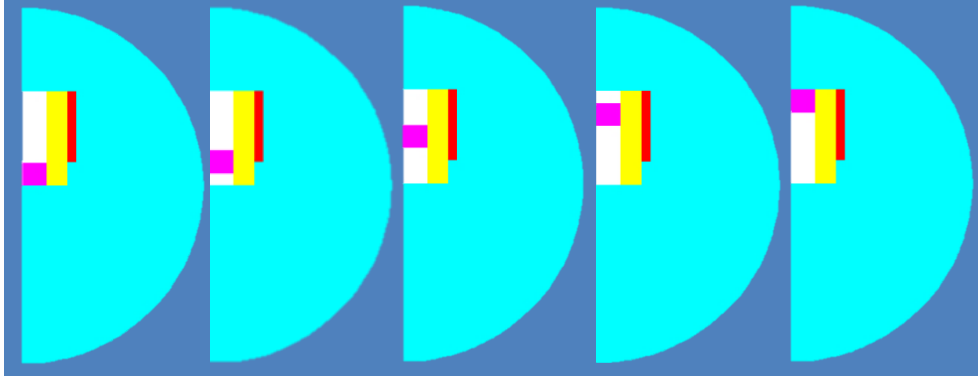


Figura 5.5 - Figura com as diferentes posições do íman.

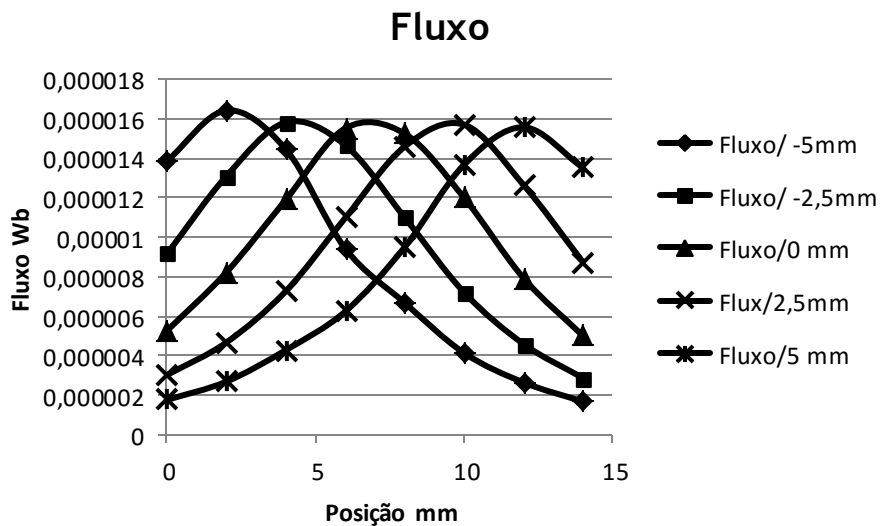


Figura 5.4 - Fluxo para as diferentes posições do íman da arquitetura proposta.

Uma outra forma de aperfeiçoar os valores obtidos de fluxo magnético, seria diminuir a dimensão do entreferro, isso faria com que o íman tivesse mais perto da bobina e o fluxo fosse orientado de forma a diminuir as perdas. A desvantagem deste método seria o facto de o íman unido a uma mola com a vibração poder embater numa das paredes da bobina não completando o percurso na sua totalidade.

5.2.2. Simulações de análise dinâmica

Para esta simulação dinâmica optou-se por um movimento com as mesmas características que no capítulo anterior, sendo uma entrada sinusoidal com duas amplitudes de oscilação 12 e 16mm. Foram utilizadas três frequências diferentes: 20,40 e 60Hz. As resistências usadas variam entre os 5,8 e os 33,1 Ω .

Na Figura 5.6 pode-se concluir que à medida que o valor da frequência sobe, o valor da tensão será igualmente superior independentemente do valor da resistência. Quando mais elevada for a resistência, o valor da tensão aumenta em coerência, isto deve-se ao facto de oferecer uma maior oposição à passagem de corrente.

Um apontamento importante é que o valor da tensão irá aumentar até chegar ao máximo, que ocorre para valores de resistência muito altos, no caso da frequência de 60Hz para 16mm de deslocamento, o valor é de 0,2941V.

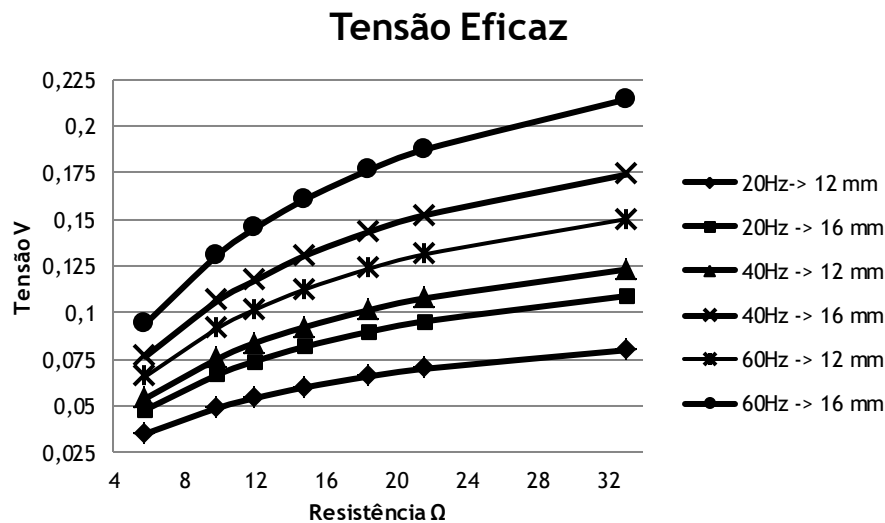


Figura 5.6 - Tensão Eficaz.

A corrente evolui de modo contrário ao da tensão, ou seja, quanto menor for a resistência maior será a corrente e menor a tensão. Os valores da corrente são também superiores para valores de frequências mais elevadas, como se pode verificar na Figura 5.7.

Os valores alcançados variam entre os 2,4mA, para uma frequência de 20Hz, com um deslocamento de 12mm e 16,2mA, para uma frequência de 60Hz e um deslocamento de 16mm.

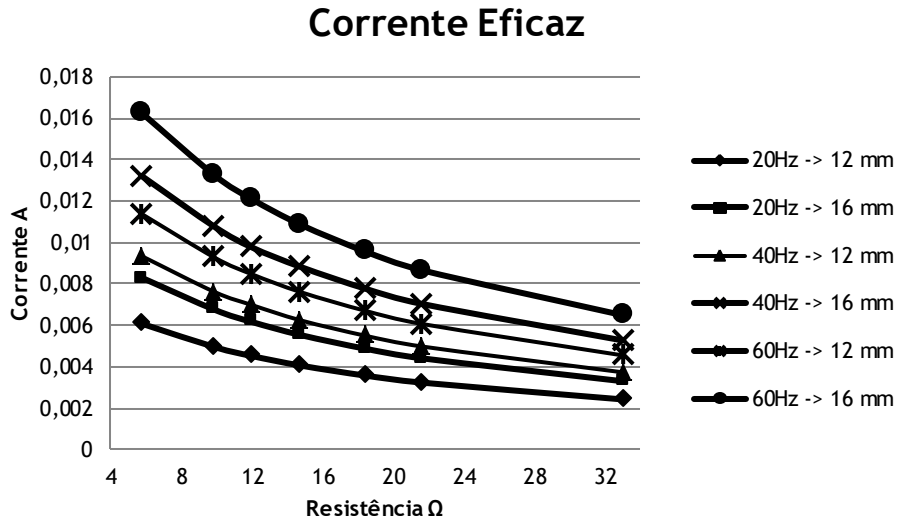


Figura 5.7 - Corrente Eficaz.

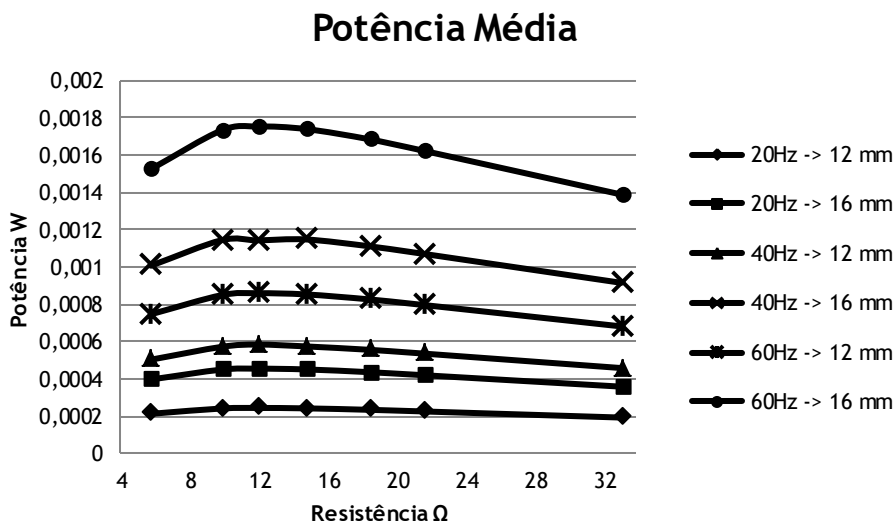


Figura 5.8 - Potência Média.

O gráfico da potência média resulta da multiplicação da tensão eficaz pela corrente eficaz, e pode-se verificar que para frequências mais altas haverá uma potência superior. A potência será máxima quando a resistência interna da bobina for igual à resistência interna da carga, como se pode verificar na, Figura 5.8

Neste caso, também é importante referir que para um deslocamento de 16mm, os resultados são melhores do que para um deslocamento de 12mm. Os resultados variam entre 0,19mW e 1,7mW.

6. Construção do Protótipo

Neste capítulo abordam-se os detalhes observados na construção de um protótipo funcional, otimizado para recolher energia através das vibrações, para isso, foram construídos vários modelos e analisadas as diferenças entre eles.

Na primeira etapa da construção foi necessário desenhar as peças idealizadas, utilizou-se o *Designspark Mechanical*, um programa de desenho tridimensional gratuito, disponibilizado pela RS. Uma vantagem importante deste software é que permite exportar o ficheiro no formato STL (*Standard Triangle Language*) utilizado pela maioria das impressoras 3D.

Em seguida foi necessário subdividir a peça em coordenadas, para esse efeito, o fatiador utilizado foi o Cura, com a versão 15.04, este software é gratuito e desenvolvido pela Ultimaker e permite converter ficheiros STL para o código *gcode*, utilizado pelas impressoras 3D.

A impressora utilizada foi a Prusa i3 Hephestos, Figura 6.1, que de entre as principais características destacam-se: tamanho de impressão 20x20x20 cm, com um bico de extrusão de 0,4mm e que utiliza filamento PLA (Ácido poliláctico) ou ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) [20].

O plástico usado na impressão das peças foi o PLA.



Figura 6.1 - Impressora 3D Prusa i3 Hephestos.

6.1. Desenho das peças e impressão 3D

A geometria das peças está diretamente relacionada com os parâmetros estudados anteriormente, desde do perímetro para o encapsulamento da bobina, a mola e a estrutura de suporte que será útil para realizar os testes experimentais.

Foram desenhados e serão posteriormente apresentados quatro modelos diferentes, que apesar da semelhança em termos de geometria, possuem características específicas que irão afetar os resultados obtidos.

Foram também tomadas em consideração as dimensões do íman de Neodímio, 8mm de diâmetro e 4mm de altura, e as características do fio de cobre, nomeadamente, o seu diâmetro que considerando o isolamento é de 0,16mm.

No primeiro modelo não existe uma diferença significativa entre a sua altura e a do íman, mas existe uma desproporcionalidade entre o diâmetro de ambos, essa disparidade deve-se ao facto da mola ter um diâmetro de 48mm e necessitar de espaço para oscilar sem embater nas paredes da bobina (Figura 6.2 - Primeiro modelo).

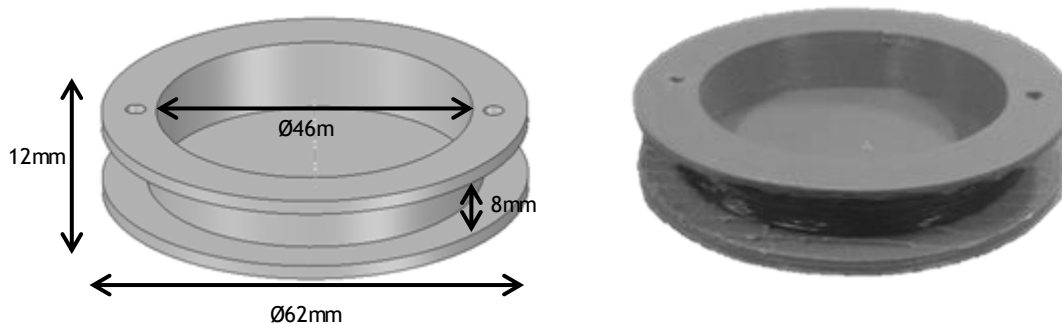


Figura 6.2 - Primeiro modelo.

No segundo modelo optou-se por manter a altura e diminuir o diâmetro interno da bobina (Figura 6.3), para isso foi necessário adicionar uns suportes suplementares ao protótipo inicialmente dimensionados.

Para facilitar na aquisição dos parâmetros experimentais foram também colocados dois terminais, com as saídas ligadas aos terminais da bobina.

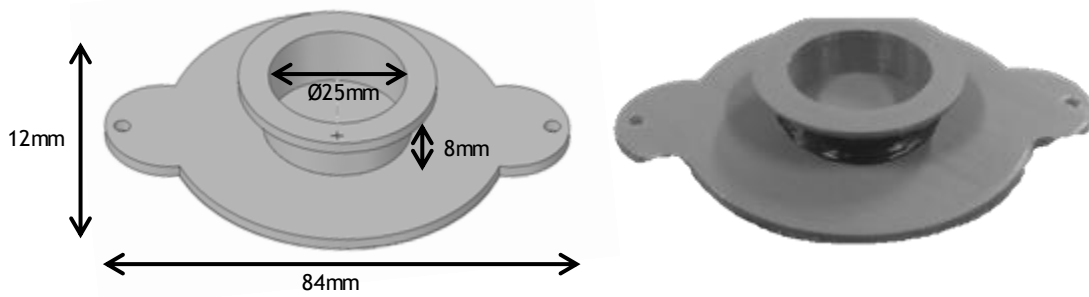


Figura 6.3 - Segundo Modelo.

O terceiro modelo é semelhante ao descrito anteriormente, difere dos anteriores no diâmetro interno da bobina e na altura da bobina, o primeiro relativamente menor e o segundo maior (Figura 6.4).

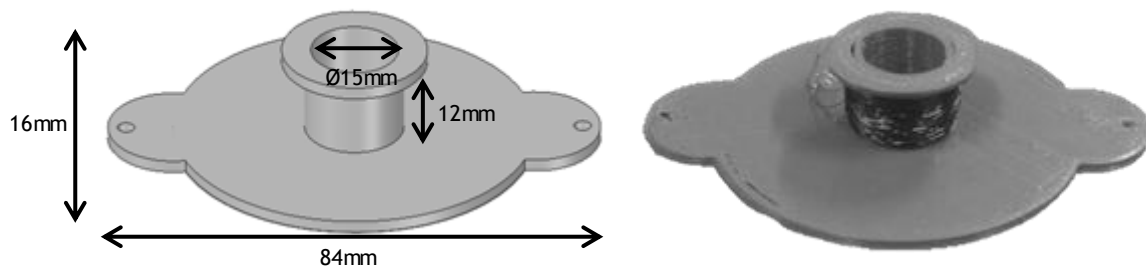


Figura 6.4 - Terceiro Modelo.

No quarto, e último modelo, mantém o raio interno e aumenta a altura da bobina (Figura 6.5).

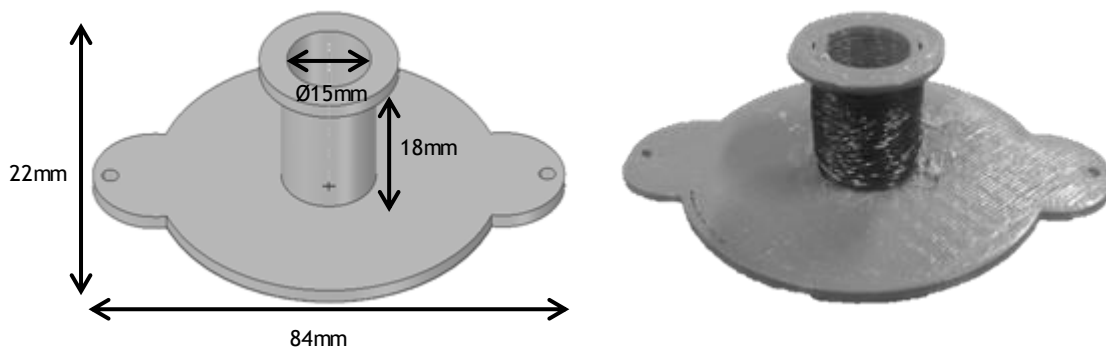


Figura 6.5 - Quarto Modelo.

Para completar foi também desenhada e imprimida uma mola planar, Figura - 6.6, a dificuldade no desenho da mola prendeu-se pelo facto de não se poder traduzir

matematicamente, a sua geometria para o valor correspondente da frequência de ressonância.

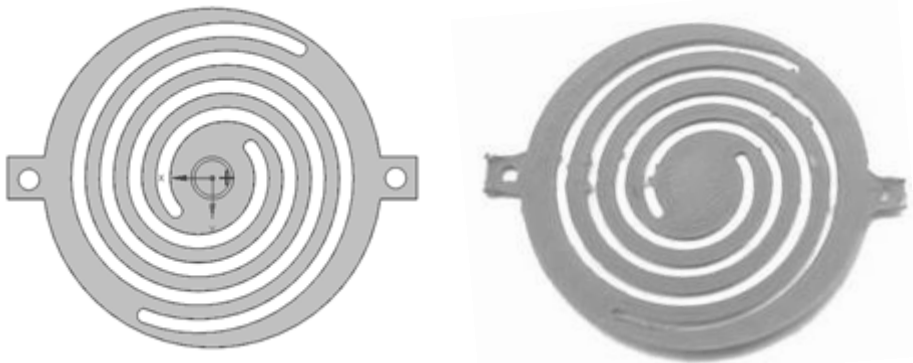


Figura - 6.6 Mola planar.

6.2. Ensaio do protótipo

Para testar os modelos foi utilizado um acionador oscilador. Um sinal de entrada sinusoidal, proveniente de um gerador de sinais, que em conjunto com um amplificador de sinal ligado a uma coluna de som, produz, para uma frequência e amplitude definidas, a vibração corresponde segundo um eixo horizontal, Figura 6.7.



Figura 6.7 - Sistema de teste constituído por um osciloscópio, gerador de sinais, amplificador, e coluna.

O suporte para a mola planar e para a bobina pode-se visualizar na Figura 6.10. Para definir vários deslocamentos foi necessário criar pequenas peças de suporte, Figura 6.8, que alterassem esse parâmetro, sem ser necessário fazer uma nova.

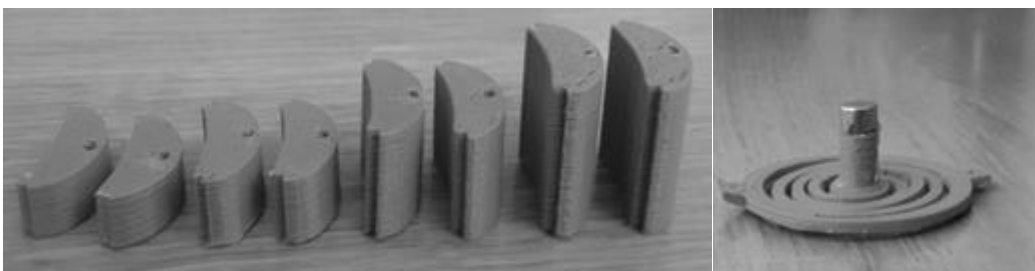


Figura 6.8 - Peças de suporte complementares.

Foram ainda analisados os sinais provenientes do gerador de sinais recorrendo aos módulos de aquisição descritos no capítulo 2. Com uma frequência e amplitude definidas pelo utilizador.

Para caracterizar as vibrações do sistema de teste no domínio da frequência foi desenhada e impressa uma peça que fizesse de suporte ao acelerómetro, Figura 6.10. configurou-se o valor da amplitude de oscilação para 40Hz, a frequência de ressonância da mola quando acoplada à massa do sistema, para o eixo X o sinal, Figura 6.9, obteve uma amplitude de 53mV.

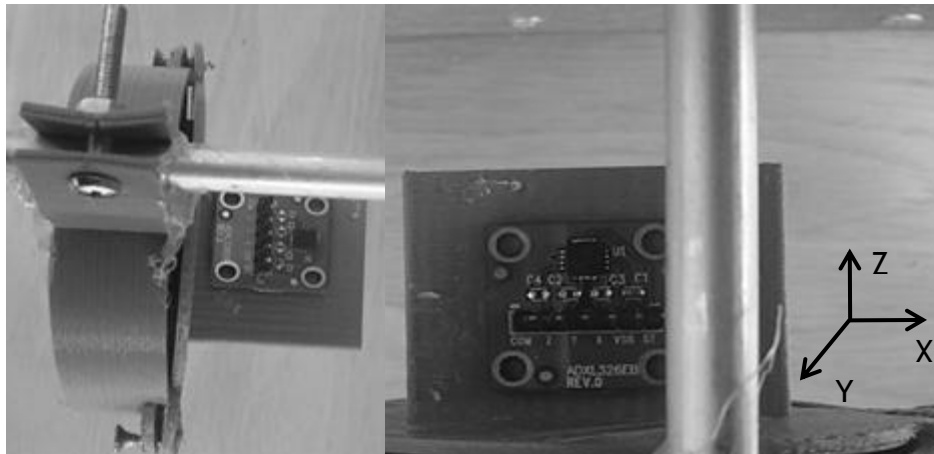


Figura 6.10 - Medição e caracterizam das vibrações do sistema de teste.

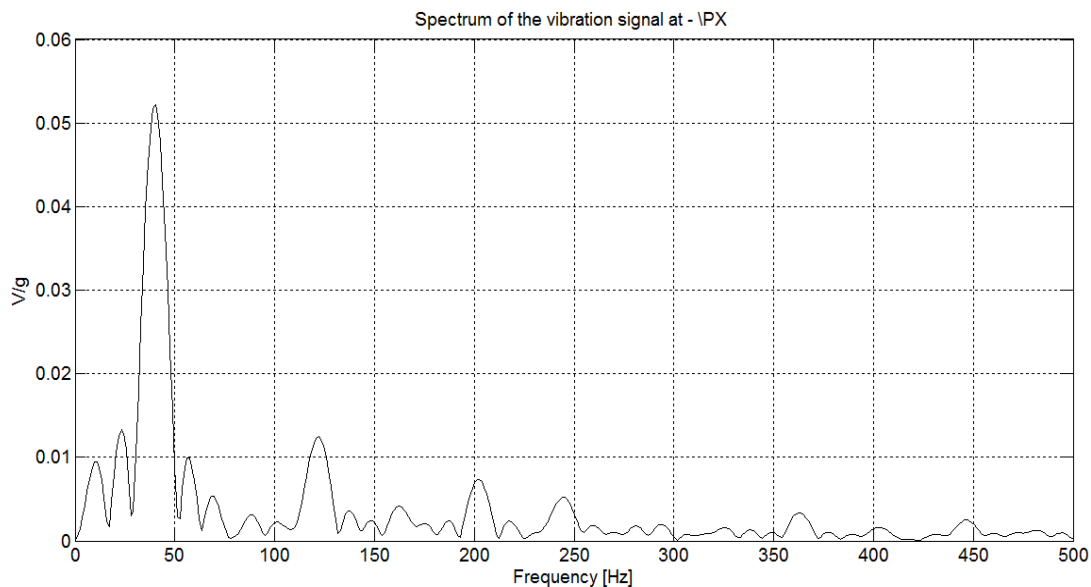


Figura 6.9 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo X para o sistema de teste.

O eixo Y, Figura 6.11, era o eixo sobre qual o movimento era imposto pelo sistema de teste, logo foi onde se obteve melhores resultados com a amplitude do sinal chegar aos 87mV. A Figura 6.12, que representa o eixo Z, a amplitude do sinal foi quase nula e não se encontra bem definida.

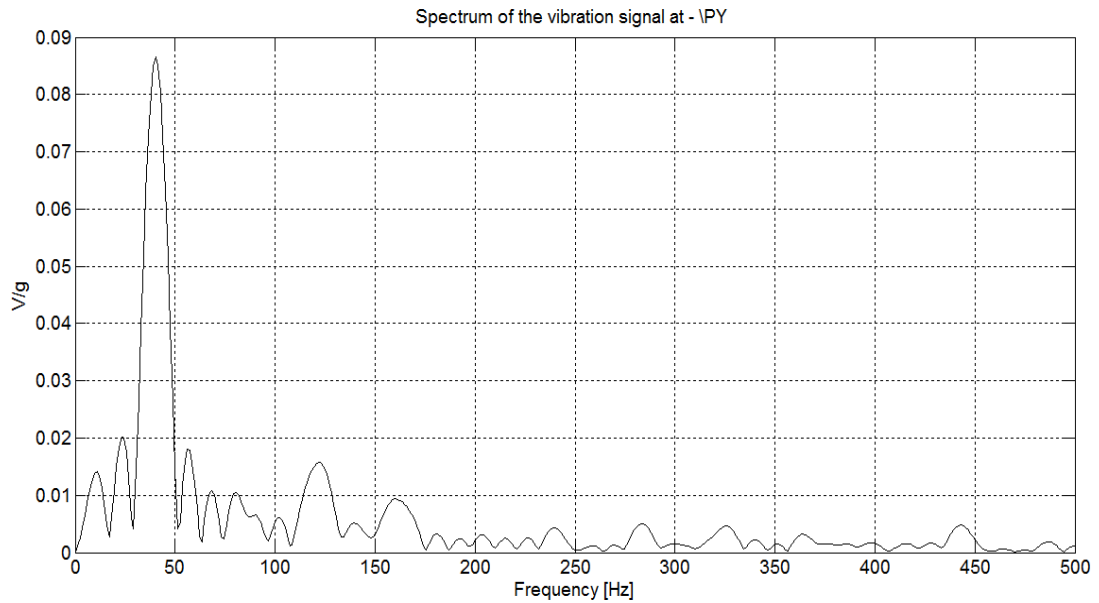


Figura 6.11 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo Y para o sistema de teste.

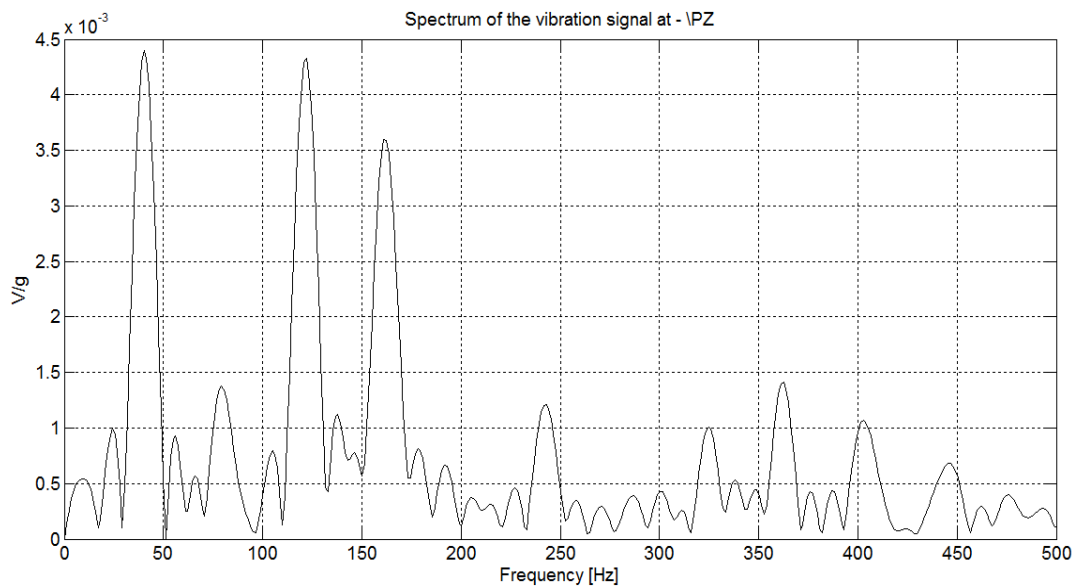


Figura 6.12 - Representação no domínio da frequência, segundo o eixo Z para o sistema de teste.

6.3. Análise de resultados

Na análise dos resultados expõem-se o valor da potência média obtida para as diferentes arquiteturas já mencionadas.

Para o primeiro modelo, com uma resistência interna de $33,6\Omega$, e uma tensão em circuito aberto de $8mV$, não foi possível testar para diferentes amplitudes e frequências dado que os seus valores eram muito baixos o que poderia induzir em erro as conclusões a tirar deste protótipo.

No segundo modelo, com uma resistência interna de $18,9\Omega$ e uma tensão em circuito aberto de $85mV$, os ensaios realizados variando a resistência de $5,8$ até $33,1\Omega$, na frequência de 10 até $100Hz$ e na amplitude de oscilação de $10mm$ até $16mm$.

Os resultados apresentados na Figura 6.13 referem-se ao valor da potência média obtida para diferentes deslocamentos com uma frequência de $40Hz$. Pode verificar-se em semelhança com o capítulo anterior que, para maiores deslocamentos, ter-se-á uma potência superior, que pode variar desde de $2,7\mu W$ até $22,1\mu W$.

É importante referir que os $40Hz$ coincidem com a frequência de ressonância da mola. Para frequências diferentes deste valor, o valor da potência média obtida é muito próximo de zero, Figura 6.13.

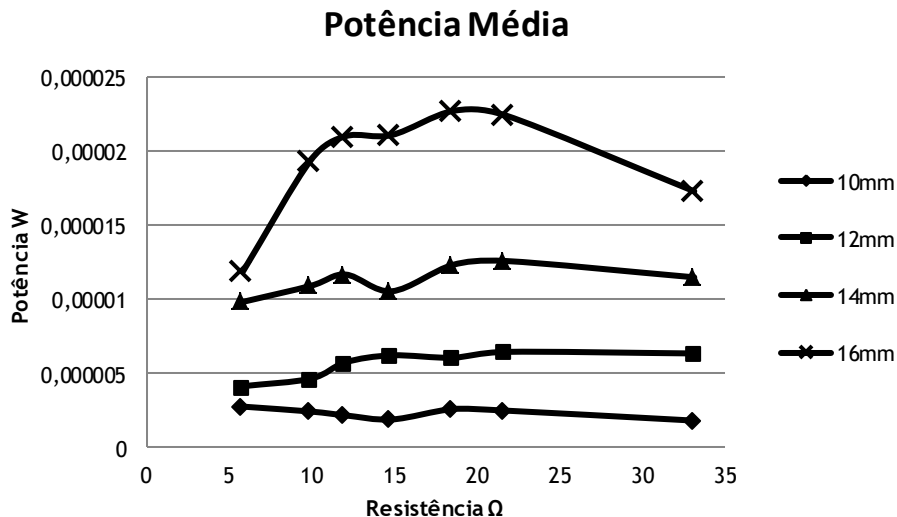


Figura 6.13 - Potência Média para o segundo modelo com uma frequência de $40Hz$.

Os valores de tensão obtidos no protótipo anterior foram demasiado baixos o que fez com que se alterassem pequenas características do mesmo, ao reduzir o raio interno da bobina, possibilitou que as linhas de fluxo se concentrassem a volta da mesma e reduzir o espaço entre a bobina e o íman, devido ao facto de o ar apresentar uma elevada relutância magnética.

Para o terceiro modelo, com uma resistência interna de 12Ω e uma tensão em circuito aberto de 222mV , Figura 6.14, os resultados são mais satisfatórios que os anteriores e atingem valores deste 11nW até $0,83\text{mW}$.

Neste exemplo, já é notório que os valores da potência média são superiores para um valor de resistência interna da bobina igual ao valor da resistência de carga.

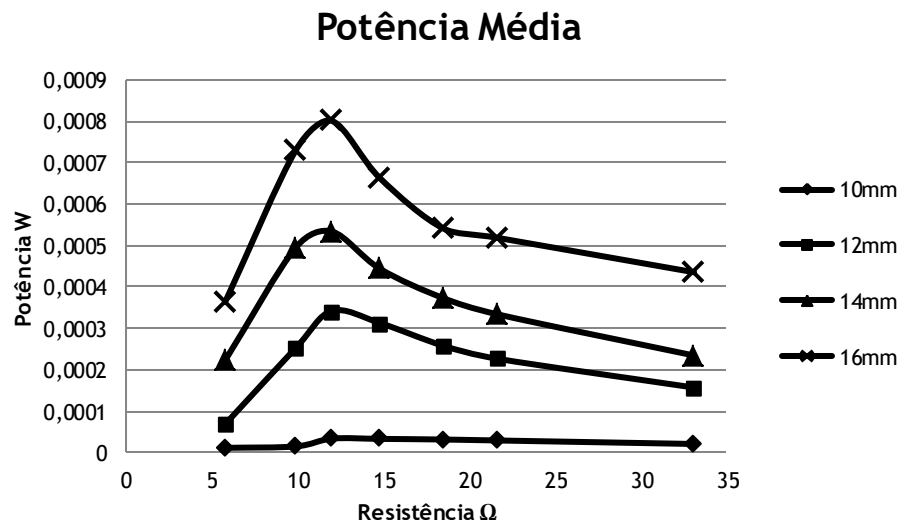


Figura 6.14 - Potência Média para o terceiro com uma frequência de 40Hz.

Para o quarto modelo em relação ao anterior fez-se uma pequena alteração na altura da bobina, para que fosse possível ao íman percorrer uma distância superior no seu interior. Este protótipo, com uma resistência interna de $12,3\Omega$, disponibiliza uma tensão em circuito aberto de 180mV . Em comparação com o modelo anteriormente apresentado possui uma potência média menor, isto deve-se ao facto de os 16mm não serem suficientes para percorrer a totalidade da bobina.

Os valores máximos de potência variam entre 88nW e $0,63\text{mW}$, Figura 6.15.

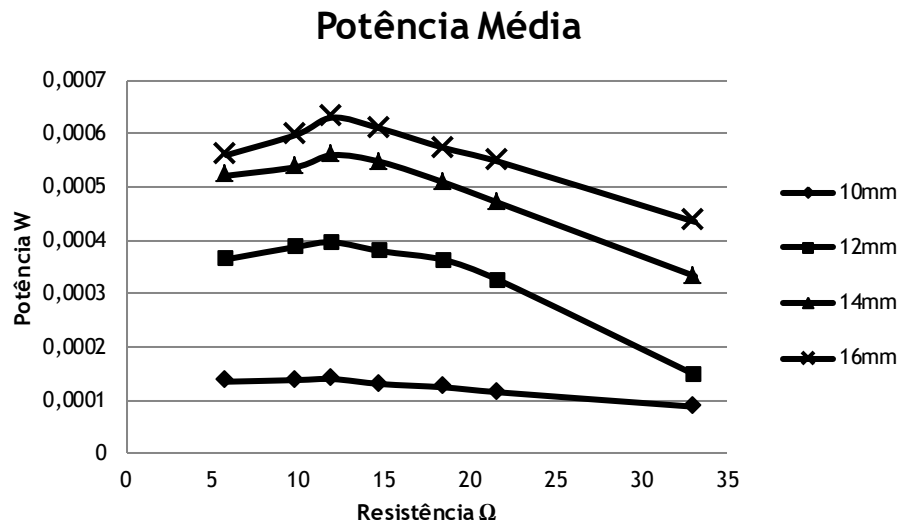


Figura 6.15 - Potência Média para o quarto com uma frequência de 40Hz.

7. Aplicação Prática

Uma possível aplicação prática deste transdutor consiste em produzir energia através das vibrações para alimentar um módulo wireless. Numa primeira fase será estudado o sistema de desenvolvimento da Cymbet CBC-EVAL-09 que permite recolher a energia produzida e efetuar a sua regulação para que possa ser posteriormente utilizada. Em seguida o módulo de desenvolvimento wireless eZ430-CC2500 permitirá criar uma rede de sensores sem fios. Este capítulo serve essencialmente para verificar que é possível, após recolher a energia produzida, instalar uma rede de sensores que comuniquem entre si.

7.1. Conversor de energia com o CBC-EVAL-09 da Cymbet

O CBC-EVAL-09 é um sistema de desenvolvimento utilizado no desenvolvimento de aplicações de *Energy Harvesting* e suporta vários transdutores de energia como entrada: células fotovoltaicas, gerador térmico de energia em AC e DC, gerador eletromagnético em AC, e gerador piezoelétrico em AC.

Esta placa de desenvolvimento permite ao utilizador testar rapidamente sistemas de recolha de energia, pois tem incorporado um sistema avançado para localizar o ponto máximo de potência através de algoritmos que permitem extrair a máxima quantidade de energia. Essa tarefa é desenvolvida por microprocessador dedicado que faz a gestão inteligente da energia disponível. Possui ainda de duas baterias de estado sólido de 50 μ Ah cada produzidas pela EnerChip [21].

A fotografia da placa CBC-EVAL-09 é ilustrada na Figura 7.1.

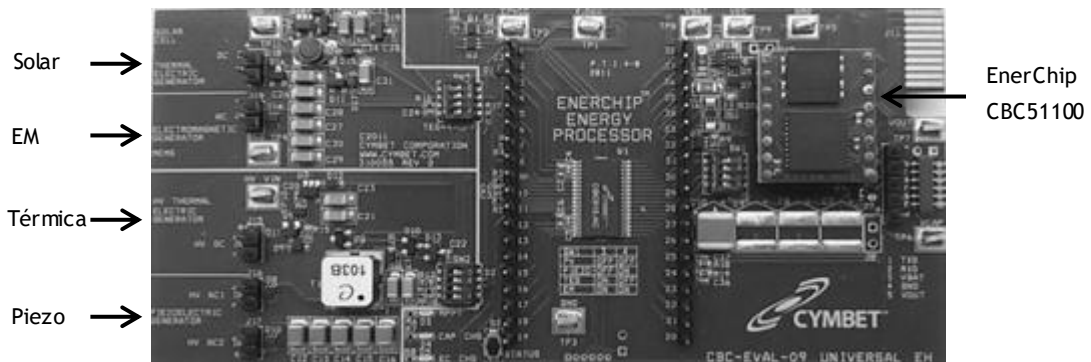


Figura 7.1 - Placa de desenvolvimento CBC-EVAL-09.

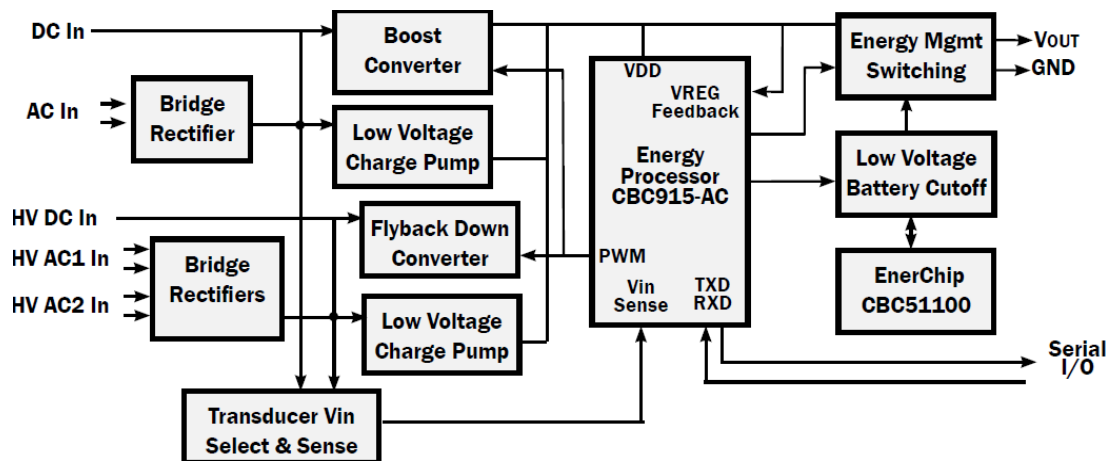


Figura 7.2 - EnerChip CBC- EVAL- 09 Demonstração da placa de desenvolvimento diagrama de blocos, com o CBC51100 EnerChip 100uAh Module [21].

O sistema de desenvolvimento é descrito por:

DC In - Transdutores *Energy Harvesting* com uma entrada inferior a 4,06V DC.

AC In - Transdutores *Energy Harvesting* com uma entrada inferior a 4,06V DC.

HV DC IN - Para transdutores com uma tensão de entrada de 4,06V DC até 20V DC.

HV AC1 IN e HV AC2 IN - Para transdutores com uma tensão de entrada de 4,06V DC até 20V AC.

Bridge Rectifiers - Retifica a entrada de AC para DC.

Boost Converter - Eleva a tensão de DC ou AC In para 4,06Volt.

Low Voltage Charge Pumps - Usada para inicializar o processador de energia CBC915.

Flyback Down Converter - Baixa o HV DC IN ou HV ADC1 IN/HV AC2 IN para 4,06V.

Energy Processor - O processador EnerChip CBC915-AC localiza o ponto máximo de potência para o transdutor de entrada.

Tranducer Input Voltage Select and Sense Switches - Monitoriza todas as entradas e ligas ao *energy processor*.

EnerChip CBC51100 Solid State Battery Module - Duas baterias Enerchip (CBC3150 E CBC050) de 50µAh cada para armazenar energia.

Low Voltage Cut-off - No caso da tensão dos EnerChips cair para valores inferiores a 3.0V DC, o circuito é desligado para as baterias não descarregarem.

Energy Management Switching Matrix - Controla o encaminhamento da saída Vout para o sistema de carregamento. O utilizador pode seleccionar e indicar a entrada do transdutor para a saída de tensão.

Serial I/O - Estas duas linha de comunicação ligada o processador dedicado a outro microcontrolador de uso genérico, tais como o MSP430 que é utilizado nos módulos wireless de demonstração Ez430-RF2500.

O sistema de desenvolvimento possui três comutadores diferentes ligados ao longo do circuito que permitem seleccionar qual é a entrada do transdutor de energia que o utilizador pretende utilizar. Neste caso, utilizar-se-á o gerador eletromagnético, a Tabela 7.1 representa a posição correta dos comutadores.

Tabela 7.1 - Seleção de entradas do transdutor eletromagnético [21].

SW3			SW2			SW1		
Slide#	OFF	ON	Slide#	OFF	ON	Slide#	OFF	ON
1		x	1	x		1		EG CHGD
2		x	2	x		2	Not Used	Not Used
3		x	3	x		3		x
4		x	4	x		4		x

O sistema de desenvolvimento tem três LED que permitem verificar o estado de carregamento e conversão de energia. O primeiro refere-se ao MPPT (*Maximum Peak Power Tracking*) que indica que o processador dedicado está a igualar a impedância de entrada do regulador de energia à impedância de saída do transdutor. Para que se verifique uma máxima transferência de energia. O segundo LED CAP (*Output Holding Cap Charge*) refere-se ao momento em que o condensador está carregado. Por fim, o terceiro LED EC (*EnerChip Charge*) menciona que as baterias do EnerChip começaram a ser carregadas, e está disponível a alimentação para a carga. A esquematiza ao estado em que se encontra no sistema de desenvolvimento.

Outro aspeto bastante importante são as condições mínimas de funcionamento do CBC-EVAL-09. Para o transdutor eletromagnético que possui uma saída em AC, é necessário garantir no mínimo 1,2Vpp até no máximo 12Vpp

Inicialmente, os transdutores utilizados não atingiam esses valores, para colmatar esta situação foi necessário adicionar mais espiras à bobina, passar de 200 para 500 para que a tensão pico-a-pico subisse para 1,312Vpp e se garantisse assim as condições mínimas de funcionamento [21].

Tabela 7.2 - Tabela que indica o estado da placa de desenvolvimento CBC EVAL-09 [21].

LED			Estado
EC	CAP	MPPT	
○	○	●	Procura do ponto máximo de potência
○	●	○	A saída está a espera do condensador carregar
●	○	○	EnerChip a carregar
●	●	●	Operação Normal -> Sistema em regulação
○	●	●	Estado da saída alterado, acende quando o SW2 é mantido por 5s
●	○	●	A carga é desligada quando o Enerchip está a carregar
●	●	○	A carga é desligada e o sistema se encontra em regulação

7.2. Funcionamento de um nodo sensor wireless (eZ430-CC2500)

O eZ430-RF2500 é um sistema de desenvolvimento de comunicações sem fios baseado no MSP430, que possibilita aliar o microcontrolador ao rádio CC2500 de 2.4GHz. Este pode ser configurada através de uma interface USB, e baseia-se no *SimpliciTI*, um protocolo aberto de comunicação rádio frequência com um baixo consumo, para redes de sensores sem fios de baixo consumo energético, existem dois módulos como se representa na Figura 7.3 [22].

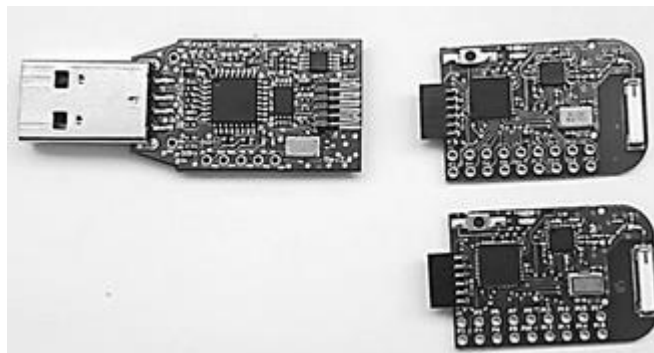


Figura 7.3 - eZ430-CC2500 [22].

Outro aspeto importante deste módulo de comunicação sem fios é o consumo energético associado ao MSP430F2274, que opera numa gama de tensões entre 1,8 e os 3,6V, com um consumo médio de energia a que corresponde uma corrente de funcionamento de 270µA ou, em modo de repouso, de 0,7µA. O CC2500 funciona no mesmo intervalo de tensões que o microcontrolador, e tipicamente apresenta uma corrente de funcionamento de 15mA quando está a transmitir dados.

Após a verificação de todos os parâmetros iniciou-se o processo de alimentação do CBC-EVAL-09, tal como descrito anteriormente alimentou-se diretamente o protótipo constituído por um íman de neodímio preso na mola planar, juntamente com uma estrutura que se agrega a uma bobina de 500 espiras com uma resistência interna de $39,8\Omega$. A saída do transdutor foi ligada à entrada AC para dispositivos eletromagnéticos disponibilizada pelo sistema de desenvolvimento, Figura 7.4.

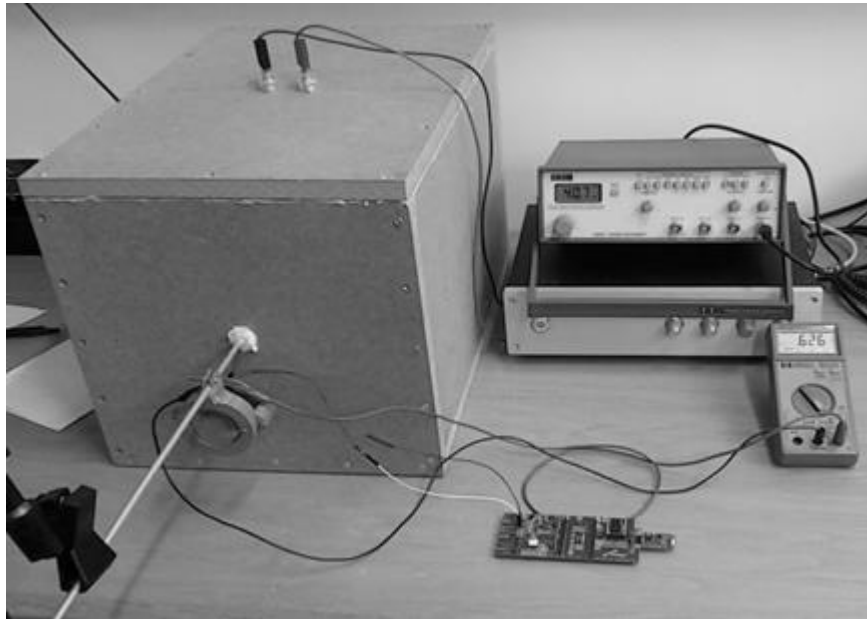


Figura 7.4 - Transdutor eletromagnético, a alimentar o CBC-EVAL-09.

O módulo ligado ao computador através da porta USB serve de “*master*” no decorrer das comunicações. Por seu lado, o módulo ligado ao sistema de desenvolvimento opera em modo “*slave*”. Enquanto a comunicação não ocorre, o master espera resposta por parte do “*slave*”. Como se pode visualizar na interface do computador, disponibiliza ao utilizador informações bastante simples, tais como a temperatura, as horas e a tensão de alimentação, como representado na Figura 7.5.

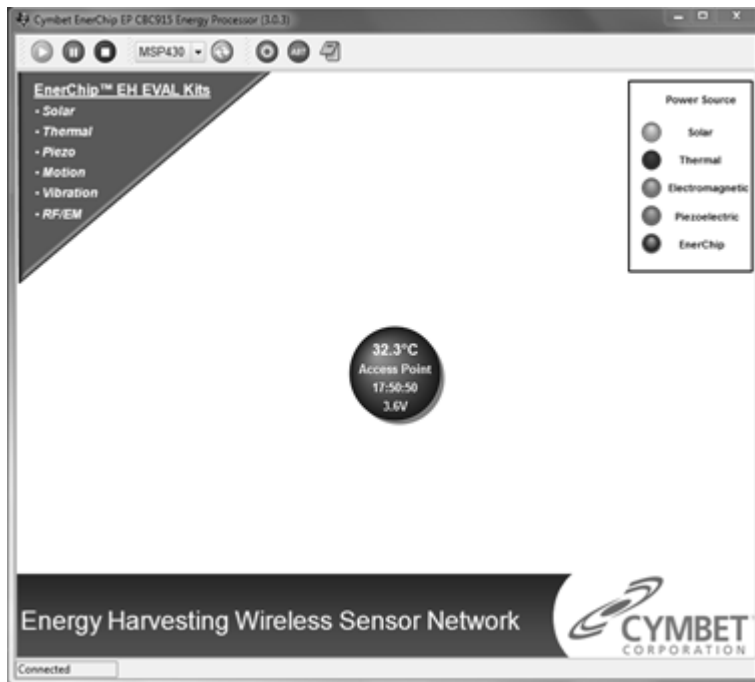


Figura 7.5 - Software da Cymbet que gere a rede de sensores sem fios.

Na figura o recetor (Access Point) não está a receber dados, como é possível verificar pela interface do software. Em seguida é colocado o módulo rádio ligado ao sistema de desenvolvimento em funcionamento. O circuito começa a ser alimentado, nos primeiros instantes, o processador dedicado procura ajustar o ponto máximo de potência fornecida (MPPT). Em seguida fica a aguardar que o condensador carregue para poder alimentar o módulo de comunicação sem fios e assim dar início à transmissão de dados (CAP). Na Figura 7.6 é possível verificar através do software que está a ocorrer a transmissão de dados [22].

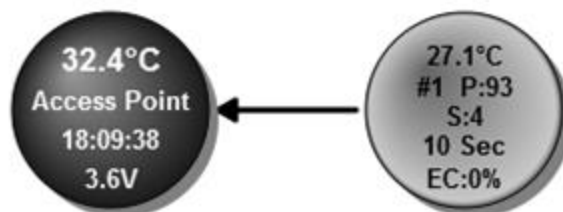


Figura 7.6 - Comunicação entre os dois módulos.

É possível constatar qual é a fonte que está a alimentar o CBC-EVAL-09, existem várias cores que distinguem graficamente cada uma delas: para solar é amarela; para térmica é violeta; para piezoelétrica é verde, o Enerchip azul escuro e neste caso eletromagnética azul claro. Outros dados que se podem verificar Figura 7.6 são, a temperatura, 27,1 °C, o número do nó #1, a potência em micro watts, P:93, indica também o estado (S4) em que se encontra, há quatro tipos de estados, o S1 em MPPT, o S2 a carregar o condensador, S3 a carregar o EnerChip, e S4 em normal operação. Há ainda a ter em consideração o tempo entre cada transmissão, 10 segundos, e a percentagem de bateria do Enerchip, neste caso 0 por cento, porque toda a energia gerada está a ser gasta na transmissão dos dados.

8. Conclusão

8.1. Visão geral sobre os resultados obtidos

Nesta dissertação abordaram-se dispositivos eletromagnéticos, que tiveram como principal objetivo uma aplicação prática dos mesmos, a primeira conclusão a tirar após o desenvolvimento deste projeto é que o conceito *Energy Harvest*, provém da noção de produzir energia para aplicações de baixa potência, logo, nunca vai satisfazer as necessidades energéticas mundiais. No entanto, possui algumas vantagens, pode ser aplicado em diversas áreas, destacando-se principalmente os locais de difícil acesso, onde esta tecnologia pode no futuro representar uma alternativa à substituição das baterias.

Sobre aos resultados obtidos, o modelo apresentado e simulado no quinto capítulo e em termos comparativos com o terceiro protótipo do sexto capítulo, ambos possuem uma bobina de 200 espiras com uma resistência interna de 12Ω e um ímã de neodímio de 4mm de altura e 8mm de diâmetro, considerando a frequência de ressonância do conjunto massa - mola planar como tendo um valor de 40Hz, para um deslocamento de 12 e 16mm, podem-se consultar os valores na Tabela 8.1.

Tabela 8.1 - Valores de Tensão, Corrente e Potência dos capítulos 5 e 6.

Freq. 40Hz	Tensão Eficaz (mV)		Corrente Eficaz (mA)		Potência Média (mW)	
	Simulação	Protótipo	Simulação	Protótipo	Simulação	Protótipo
12mm	83,76	64,1	6,98	5,33	0,585	0,341
16mm	117,5	98,2	9,76	8,17	1,14	0,81

Após analisar os valores, verifica-se rapidamente que os resultados obtidos não diferem muito entre si. O erro pode ter ocorrido, ao medir a amplitude de oscilação da mola planar.

O valor máximo de potência média obtido foi de 0,81mW, se compararmos aos resultados exemplificados no segundo capítulo, estão num patamar perfeitamente aceitável, segundo as características de cada um, mas ainda existem critérios que podem ser melhorados, como por exemplo, as dimensões do protótipo.

Na modelação e simulação de modelos académicos verificou-se que ao incluir um material ferromagnético no invólucro da bobina e do ímã o valor da potência seria superior, não

foi utilizado no decorrer desta dissertação devido ao facto de materiais com essas características serem difíceis de moldar, ao invés da utilização de uma impressora 3D em que facilmente se pode desenhar uma peça e imprimi-la consoante a aplicação a desenvolver.

Outra conclusão importante refere-se ao facto de a máxima transferência de energia ocorrer quando a resistência interna do transdutor for igual a resistência da carga. Ou seja, para as mais diversas aplicações, nunca existirá um modelo padrão de um transdutor eletromagnético, será necessário dimensionar e modelar um modelo que se adequa à aplicação em causa.

Para finalizar, as simulações decorreram num ambiente laboratorial, ou seja, os protótipos não foram sujeitos a quaisquer condições idênticas às que eventualmente seriam submetidos em ambientes indústrias, tais como altas temperaturas ou humidade, entre outras. Um último reparo, vai para a indústria e em outras fontes de vibração, as oscilações podem coincidir com diversas orientações/eixos, o que poderá tornar difícil o dimensionamento de um transdutor.

8.2. Sugestão de trabalhos futuros

A primeira sugestão será melhorar as dimensões dos protótipos, apesar de não serem de grandes dimensões, nos dias de hoje, consegue-se obter melhores resultados com materiais de pequenas dimensões, desde que o preço se justifique. Um dos fatores predominantes para o modelo ter uma dimensão média é a mola planar, futuramente será possível dimensionar e construir uma mola que tenha dimensões mais pequenas com uma amplitude de oscilação idêntica.

A mola planar é de facto um fator de extrema importância, um dos objetivos destes transdutores pode passar pela modelação matemática de uma mola para determinar a frequência ressonância.

Outro aspeto importante, seria dimensionar a parte eletrónica que permite gerir e otimizar a energia proveniente dos transdutores.

A última sugestão será então criar uma rede de sensores sem fios recorrendo a esta tecnologia numa indústria. Como por exemplo, num estaleiro adaptar os transdutores para as mais variadas máquinas e fazer o rastreamento em tempo real de cada uma.

Referências Bibliográficas

- [1] “Rede de Sensores sem fios - Conhece esta tecnologia? - Pplware.” [Online]. Available: <http://pplware.sapo.pt/microsoft/windows/rede-de-sensores-sem-fios-conhece-esta-tecnologia/>. [Accessed: 25-Sep-2015].
- [2] D. Spreemann and Y. Manoli, *Electromagnetic Vibration Energy Harvesting Devices*. 2012.
- [3] S. Boisseau, G. Despesse, and B. A. Seddik, “Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting,” *Small-Scale Energy Harvest.*, pp. 1-39, 2012.
- [4] T. Kazmierski and S. Beeby, *Energy harvesting systems*, no. January. 2011.
- [5] S. Beeby, M. Tudor, and N. White, “Energy harvesting vibration sources for microsystems applications,” vol. 175, 2006.
- [6] S. P. Beeby, R. N. Torah, M. J. Tudor, P. Glynne-Jones, T. O’Donnell, C. R. Saha, and S. Roy, “A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting,” vol. 1257, 2007.
- [7] C. R. Saha, T. O’Donnell, N. Wang, and P. McCloskey, “Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 147, no. 1, pp. 248-253, 2008.
- [8] V. R. Challa, S. Cheng, and D. P. Arnold, “The role of coupling strength in the performance of electrodynamic vibrational energy harvesters,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 2, p. 025005, 2013.
- [9] G. Description and F. B. Diagram, “Accelerometer,” 2009.
- [10] R. Detection, N. External, P. V. Needed, F. Program, S. Supervisor, P. Counter, S. Operational, S. Supervisor, R. Core, and S. Voltage, “MSP430F543x and MSP430F541x Mixed-Signal Microcontrollers,” 2014.
- [11] A. E. Santo, J. Salvado, and R. Calado, “Monitorização de Vibrações em Máquinas Lineares de Relutância Comutadas.”
- [12] M. Wellard, J.-P. Ravasio, S. Guesne, C. Bell, A. Oloyede, G. Tevelen, J. Pope, and K. Momot, “The Use of a Fibre-Optic Sensor to Record Hydrostatic Pressure in Articular Cartilage Undergoing Compression in the Presence of a Strong Magnetic Field,” *Sensors. Under Revis.*, pp. 1-11, 2012.
- [13] Cedrat, *Translating Motion Tutorial*. Cedex, 1999.
- [14] Cedrat, *User’ guide*. Cedex, 1999.
- [15] Cedrat, *Tutorials:Magnetostatics, electrostatics and thermal (steady and transient state)*. Cedex, 1999.

- [16] “Adaptação de Impedâncias .” [Online]. Available: <http://www.profelectro.info/Uploads/luisj/Adaptacaolmpedancias.swf>. [Accessed: 25-Sep-2015].
- [17] “Grades of Neodymium.” [Online]. Available: http://www.ndfeb-info.com/neodymium_grades.aspx. [Accessed: 25-Sep-2015].
- [18] “Calculate magnetic flux density with formula - supermagnete.pt.” [Online]. Available: <https://www.supermagnete.pt/faq/How-do-you-calculate-the-magnetic-flux-density>. [Accessed: 25-Sep-2015].
- [19] P. S. Errede, “American Wire Gauge (AWG) & Metric Gauge Wire Sizes AWG Wire Sizes AWG : In the American Wire Gauge (AWG), diameters can be calculated by applying the -1 , -2 , -3 , which makes more sense mathematically than ‘ double nought .’ Thi,” pp. 1-3, 2015.
- [20] “Prusa i3 Hephestos/pt - RepRapWiki.” [Online]. Available: http://reprap.org/wiki/Prusa_i3_Hephestos/pt. [Accessed: 25-Sep-2015].
- [21] Cymbet, “CBC-EVAL-09 CBC-EVAL-09 EnerChip EP Universal EH Eval Kit,” pp. 1-14, 2011.
- [22] Texas Instruments, “eZ430-F2013 Development Tool User ’ s Guide,” no. June, 2010.