



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Faculdade de Engenharia

Transdutores Eletromagnéticos na Recolha da Energia Cinética das Vibrações

Joel Alves Bonifácio

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Eletromecânica

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor António Eduardo Vitória do Espírito Santo

Covilhã, junho de 2018

Agradecimentos

A presente dissertação, marca o fim de mais uma etapa e um objetivo cumprido. Quero agradecer a todos os meus colegas que direta ou indiretamente me ajudaram não só na realização desta dissertação, mas também em todo o percurso académico.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu professor e orientador, Professor Doutor António Eduardo Vitória do Espírito Santo por toda a sua competência, disponibilidade, dedicação e simpatia demonstrada não só como professor, mas como orientador e pessoa.

Quero também agradecer aos meus pais, Joaquim Bonifácio e Maria Isabel, pela forte motivação, oportunidade e esforço que foi feito nestes últimos anos e que contribuíram significativamente para o meu sucesso académico.

Ao meu professor João Pereira, pelo seu tempo e paciência dedicado.

Ao Engenheiro Filipe Costa, pelas horas e horas de dedicação e bons momentos que passamos juntos.

A minha namorada, Cátia Ferrinho por todo o apoio e motivação dado.

Aos meus professores que indiretamente também contribuíram para a realização deste objetivo.

A todos, um muito obrigado!

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto Energy and Water Systems Integration and Management (EdgeWise), apoiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), com a referência ERANETMED/0004/2014, enquadrado na iniciativa ERANETMET dos Estados Membros, Países Associados e Países Parceiros Mediterrâneos (Projeto com o ID eranetmed_nexus-14-044).

Resumo

A presente dissertação tem como objetivo a investigação e aplicação do conceito de *Vibration Energy Harvesting* aplicado à medição dos níveis de água em reservatórios. Recorreu-se à impressão 3D para a implementação do transdutor eletromagnético para efetuar a conversão da energia cinética das vibrações em energia elétrica útil. Foram contruídos dois protótipos de transdutores eletromagnéticos com características diferentes e realizada a sua validação, optando pelo que teve melhor desempenho dos dois. Tendo como base o *kit Energy Harvesting DC2080A* foi desenhada e ajustada a eletrônica de regulação, e o respetivo PCB, para a ligação com o microprocessador e o sensor capacitivo. Com o foco nos reservatórios de água e as condutas, foi contruído um protótipo de um sensor capacitivo com o objetivo de medir os níveis de água contida nos reservatórios, evitando assim o desperdício de água por extravasamento, que é um dos principais problemas que ocorrem nos reservatórios de água. Através da energia produzida pelo transdutor eletromagnético, tendo como origem as vibrações induzidas nas condutas de água que se encontram sob pressão com a passagem da água, todo o sistema de medida é alimentado autonomamente.

Palavras-chave

Recolha de energia, Transdutores Eletromagnéticos, MEMS, VEH, Conversor AC/DC, Sensor capacitivo, Microprocessador

Abstract

This dissertation aims to investigate and explore the concept of Vibration Energy Harvesting applied to the measurement of water levels in reservoirs. A 3D printer was used to fabricate an electromagnetic transducer to convert the kinetic energy of vibrations into useful electric energy. Two prototypes of electromagnetic transducers were built, with different characteristics. From the validation procedure the most efficient was selected. Based on the kit Energy Harvesting DC2080A the regulation electronics was designed and adjusted resulting in an electronic circuit implemented in a PCB. This electronic allows to convert and regulate the energy for the microprocessor and the capacitive sensor. With the focus on water reservoirs and pipelines, a prototype of a capacitive sensor was made with the objective of measuring the levels of water present in the reservoirs, thus avoiding the waste of water through extravasation, which is one of the main problems occurring in water reservoirs. Through the energy that is produced by the electromagnetic transducer and by the induction of vibration in the water pipes that are under pressure with the passage of the water, the whole system is completely autonomous.

Keywords

Energy Harvesting, Electromagnetic Transducers, MEMS, VEH, AC / DC Converter, Capacitive Sensor, Microprocessor

Índice

Abstract	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Nomenclatura	xix
Simbologia grega.....	xxi
Lista de Acrónimos	xxiii
1. Transdutores Eletromagnéticos na Recolha da Energia das Vibrações.....	1
1.1. Princípios de funcionamento.....	1
1.1.1. A recolha de energia.....	1
1.1.2. Dispositivos ressonantes e não ressonantes.....	2
1.1.3. Visão geral das fontes de energia	7
1.1.4. Recolha de energia das vibrações	9
1.2. A recolha de energia das vibrações utilizando dispositivos electromagnéticos	15
1.3. Princípio físico associado à conversão electromagnética de energia.....	16
1.3.1. Subsistema mecânico	16
1.3.2. Subsistema electromagnético	19
1.4. Sistematização de soluções desenvolvidas.....	22
1.4.1. <i>Sistemas ressonantes</i>	22
1.4.2. Sistemas não ressonantes	23
1.4.3. Exemplo generalista de ambiente de aplicação	24
1.4. Motivação, enquadramento do trabalho e estrutura da tese.....	25
1.4.1. Motivação.....	25

1.4.3. Estrutura da dissertação	26
2. Validação experimental do transdutor	27
2.1. Construção do transdutor eletromagnético	27
2.2. Configuração da instalação experimental.....	34
2.3. Obtenção da resposta em frequência	36
2.3.1. Transdutor Eletromagnético N°1.....	36
2.3.2. Transdutor Eletromagnético N°2.....	37
2.4. Determinação da resistência da carga óptima	38
3. Conversão e regulação da energia	41
3.1. Esquema funcional da eletrónica de regulação	41
3.1.1. Introdução ao <i>kit Energy Harvesting Multi-Source with Transducers DC2080A</i>	41
3.1.2. Estudo do circuito LTC 3588-1	42
3.2. Projecto e construção do regulador.....	44
4. Aplicação experimental	47
4.1. Infraestruturas da água.....	47
4.2. Automação em reservatórios de água.....	49
4.3. Ilustração do caso de aplicação.....	51
4.4. MCU e Sensor de nível capacitivo.....	52
4.5. Instalação conjunta do transdutor com a eletrónica de regulação, MCU e sensor capacitivo e avaliação do desempenho	58
5. Conclusão	61
5.1. Identificação dos resultados principais	61
5.2. Evolução e trabalhos futuros	62
Referências Bibliográficas	63

Lista de Figuras

Figura 1 - Vista de lado de um transdutor de recolha de energia com sistema variável de ajuste de comprimentos efetivos.....	4
Figura 2 - Esquemático de um gerador piezoelétrico com frequência de ressonância variável.	5
Figura 3 - Modelo esquemático de um oscilador acoplador.	6
Figura 4 - Gerador aumentado de frequência paramétrica.	7
Figura 5 - Comparação da potencia de saída para diversos materiais utilizados nos transdutores piezoelétricos.	9
Figura 6 - Gerador Piezoelétrico: a) modo 33 e b) modo 31.	10
Figura 7 - Transdutor Piezoelétrico <i>bimorph</i>	10
Figura 8 - Representação esquemática de Energy Harvesting Piezoelétrico.	11
Figura 9 - Transdutor Eletromecânico.	11
Figura 10 - Transdutor electroestático: a) in-plane overlap; b) in-plane gap closing; c) out-of-plane gap closing.	12
Figura 11 - Funcionamento de um transdutor triboelétrico de dois estados. a) carregado electrostaticamente por electrificação de contacto. b) <i>out-of-plane gap closing</i>	14
Figura 12 - Movimento do íman e sentido da corrente.....	16
Figura 13 - a) Sistema mola-massa-amortecedor com um grau de liberdade e b) Diagrama de corpo livre dinâmico associado as oscilações da força da mola F_s e de amortecimento F_d . ..	17
Figura 14 - Sistema mola-massa-amortecedor com dois graus de liberdade e b) Diagrama de corpo livre dinâmico associado as oscilações da força da mola F_S e de amortecimento F_d ...	18
Figura 15 - Modelos populares de transdutores eletromagnéticos, para campos magnéticos constantes, a) bobina retangular com enrolamentos concentrados e b) bobinha circular com enrolamentos espaçados.	21
Figura 16 - Representação do circuito diagrama do transdutor eletromagnético.....	21
Figura 17 - Deformação vertical num carril de comboio.....	22

Figura 18 - Sistema e implementação de recolha de energia em carris de comboio.	23
Figura 19 - Diagrama linear do amortecedor eletromagnético e corte transversal do íman. ..	24
Figura 20 - Monitorização de vulcão por RSSF.	24
Figura 21 - Mica 2.	25
Figura 22 - Impressora 3D BQ Prusa i3 Hephestos.	27
Figura 23 - Planificação e modelo 3D da bobina.	28
Figura 24 - Planificação e modelo 3D da mola planar.	29
Figura 25 - Planificação e modelo 3D, da parte de cima do transdutor eletromagnético.	29
Figura 26 - Planificação e modelo 3D, da parte de inferior do transdutor eletromagnético. ..	30
Figura 27 - Planificação e modelo 3D da peça de apoio do transdutor eletromagnético ao varão.	30
Figura 28 - Transdutor Eletromagnético N°1.	31
Figura 29 - Planificação e modelo 3D da bobina.	32
Figura 30 - Planificação e modelo 3D da mola planar.	32
Figura 31 - Planificação e modelo 3D, da parte de cima do transdutor eletromagnético.	33
Figura 32 - Planificação e modelo 3D, da parte inferior do transdutor eletromagnético.	33
Figura 33 - Planificação e modelo 3D da peça de apoio do transdutor eletromagnético ao varão.	33
Figura 34 - Corte de perfil do transdutor eletromagnético, com a representação da posição do íman em relação à bobina.	34
Figura 35 - Transdutor Eletromagnético N°2.	34
Figura 36 - Peça de ligação entre a coluna de som e o varão.	35
Figura 37 - Transdutores electromagnéticos N°1 (esquerda) e N°2 (direita), aparafusados ao varão.	35
Figura 38 - Esquema do procedimento experimental.	36

Figura 39 - Evolução da potência gerada em função do aumento da resistência de carga, para as frequências de excitação de 17, 24, 27.5, 31 e 35 Hz para o transdutor electromagnético N°1.....	39
Figura 40 - Evolução da potência gerada em função do aumento da resistência de carga, para as frequências de excitação de 17, 19, 20, 21, 23 e 25 Hz para o transdutor electromagnético N°2.....	39
Figura 41 - Esquema geral de regulação e armazenamento de energia do transdutor eletromagnético.	41
Figura 42 - Placa de desenvolvimento DC2080A.....	42
Figura 43 - Diagrama de blocos do circuito integrado LTC3588-1.....	43
Figura 44 - Esquema geral da eletrónica de regulação.	45
Figura 45 - Esquemático da placa de circuito impresso da eletrónica de regulação.	45
Figura 46 - Representação esquemática de um sistema de abastecimento de água para consumo humano.	48
Figura 47 - Reservatório de água com perdas por extravasamento.....	50
Figura 48 - Esquema de aplicação para um sistema <i>Energy Harvesting</i> e um sensor de nível para tratamento a partir de uma origem de água superficial de uma albufeira.....	51
Figura 49 - Diagrama de sequência do código implementado.	53
Figura 50 - Fluxograma do programa implementado para a medição do nível de água.....	53
Figura 51 - Corte de perfil do sensor capacitivo	56
Figura 52 - Protótipo do sensor capacitivo	56
Figura 53 - Esquema de ligação entre o sensor capacitivo e o microprocessador.....	57
Figura 54 - Representação gráfica do carregamento de um condensador.....	57
Figura 55 - Gráfico da relação entre o tempo de carregamento com a altura do nível de água.....	58
Figura 56 - Fluxograma da instalação conjunta do sistema.....	58
Figura 57 - Gráfico do <i>Energy Profiler</i> do código implementado com os modo de energia M2.....	59

Figura 58 - Gráfico do consumo energético sem o tempo entre as contagem de medição.	59
Figura 59 - Gráfico do consumo energético sem a adição dos modos de energia.	60
Figura 60 - Gráfico do consumo energético para o <i>Energy Mode 1</i>	60
Figura 61 - Gráfico do consumo energético para o <i>Energy Mode 3</i>	60

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Densidades de Potência dos métodos de Energy Harvesting.....	2
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens da recolha de energia.	8
Tabela 3 - Vantagens e desvantagens dos VEH.	14
Tabela 4 - Principais especificações da impressora 3D Prusa i3 Hephestos.	27
Tabela 5 - Tabela padrão American Wire Gauge 34.	28
Tabela 6 - Tabela frequência-tensão em circuito aberto do transdutor electromagnético N°1.	36
Tabela 7 - Tabela relação entre a frequência, tensão, corrente, resistência e potência.	37
Tabela 8 - Tabela frequência-tensão em circuito aberto do transdutor electromagnético N°2.	37
Tabela 9 - Tabela relação entre a frequência, tensão, corrente, resistência e potência.	38
Tabela 10 - Comparação de ambos os transdutores N°1 e N°2 entre a tensão, corrente, resistência ótima e potência máxima na frequência de ressonância.	40
Tabela 11 - Instrumentação para medição de nível	50
Tabela 12 - Dimensões físicas do sensor capacitivo	56
Tabela 13 - Tabela relação entre o tempo de medição vs. a percentagem do nível de água..	57
Tabela 14 - Parâmetros da tensão vs média da corrente vs média da potência.....	59
Tabela 15 - Desempenho do transdutor eletromagnético N°1.	61
Tabela 16 - Desempenho do transdutor eletromagnético N°2.	61

Nomenclatura

\vec{F}_R	Força Resultante [N];
\vec{a}	Aceleração [m/s^2];
F_d	Oscilações da força associada ao amortecimento [N];
F_s	Oscilações da força associada à mola [N];
R_0	Raio externo da bobina [m];
R_{T1}	Resistência interna do transdutor eletromagnético nº1 [Ω];
R_{T2}	Resistência interna do transdutor eletromagnético nº2 [Ω];
R_i	Raio interno da bobina [m];
\dot{x}	Primeira derivada da posição da massa em suspensão [m/s];
\ddot{x}	Segunda derivada da posição da massa em suspensão [m/s^2]
\dot{z}	Primeira derivada da posição z, velocidade [m/s];
\ddot{z}	Segunda derivada da posição z, aceleração [m/s^2];
A	Área [m^2];
a	Raio interior do condensador cilíndrico [m];
B	Intensidade do campo magnético [T];
b	Raio exterior do condensador cilíndrico [m];
C	Capacidade do condensador cilíndrico [F];
d	Fator de Amortecimento;
k	Constante de elástica da mola [N/m];
l	Comprimento da bobina [m];
l'	Comprimento para bobines de secção transversal [m];

N	Numero de espiras;
T	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$];
x	Posição da massa em suspensão [m];
y	Posição inferior da mola [mm];
$y(t)$	Excitação Sinusoidal [m];
$z(t)$	Posição Relativa do movimento [m];
m	Massa de um corpo [Kg];

Simbologia

ξ_m	Factor de Amortecimento mecânico;
ω_n	Frequência Angular [rad/s];
ϵ_0	Constante dielétrica do vazio;
$\epsilon_{\acute{a}gua}$	Constante dielétrica da água;
ϵ_{ar}	Constante dielétrica do ar;
ϵ_r	Constante dielétrica do meio;
ϵ	Força eletromotriz induzida [J/C];
Φ	Fluxo Magnetico [Tm^2];

Lista de Acrónimos

ABS	<i>Anti-lock Braking System;</i>
AC	Corrente Alternada;
AdP	Águas de Portugal;
AWG	<i>American Wire Gauge;</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design;</i>
DC	Corrente Contínua;
efm	Força Eletromotriz;
EH	<i>Energy Harvesting;</i>
HVAC	Sistemas de ventilação e de ar condicionado;
IoT	<i>Internet of Things;</i>
MEMS	<i>Micro Electro Mechanical System;</i>
MFC	Macro fibras;
NdFeB	Neodímio;
NMOS	n-channel mosfet;
ONU	Organização das Nações Unidas;
PCB	Placas de circuito impresso;
PDMS	Polidimetilsiloxano;
PETG	Polietileno tereftalado modificado com glicol;
PFIG	<i>Parametric Frequency Increased Generator;</i>
PGOOD	<i>Power Good Comparator;</i>
Ph	Potencial hidrogeniônico;

PLA	Poliácido lactic;
PMMA	Polimetil-metacrilato;
PMOS	p-channel mosfet;
PTFE	Politetrafluoretileno;
PVDF	Fluoreto de polivinilideno;
PZT	Titanato zirconato de chumbo;
RF	Radio Frequência;
RSSF	Rede de sensores sem fios;
STL	<i>Standard Triangle Language;</i>
TEG	Gerador Termoelétrico;
TENG	<i>Triboelectric nanogenerator;</i>
UVLO	<i>Undervoltage lockout;</i>
VEH	<i>Vibration Energy Harvesting;</i>

1. Transdutores Eletromagnéticos na Recolha da Energia das Vibrações

1.1. Princípios de funcionamento

1.1.1. A recolha de energia

O conceito associado ao *Energy Harvesting* ou *Energy Scavenging*, tem vindo a ser desenvolvido e aplicado a um ritmo elevado, despertando o interesse de muitos investigadores, devido principalmente às inúmeras aplicações e vantagens que introduz.

Atualmente, continua-se a estudar o *Energy Harvesting* (EH) academicamente, encontrando os resultados em aplicações militares ou comerciais, devido principalmente ao enorme potencial de ser integrados em equipamentos eletrónicos de baixo consumo.

O *Energy Harvesting* tem como base a recolha de energia não utilizada diretamente no processo, e, por isso, livre para ser recolhida e utilizada. É assim um procedimento através do qual se captura energia de uma fonte disponível no meio ambiente, que noutra situação não iria ser utilizada, e se converte em energia elétrica passível de ser utilizável. Com a evolução da tecnologia, tomando como exemplo os microprocessadores, existe uma maior preocupação em reduzir os consumos energéticos. O EH vem satisfazer algumas das necessidades energéticas sendo uma fonte de energia alternativa e sustentável. No meio ambiente existem, comumente, quatro fontes de energia:

- Energia mecânica (consiste em vibração, choque, deformação de materiais, fluxo do ar ou de água);
- Energia térmica (gradientes de temperatura);
- Energia das radiações (solar, ondas de rádio);
- Energia química (reações químicas e processos bioquímicos).

Estas fontes de energia são caracterizadas por diferentes densidades de potência. Em cada aplicação deve-se saber escolher, observando o local e aplicação envolvida a melhor solução de EH a aplicar.

Na tabela 1, exemplifica-se para alguns meios, a capacidade de geração de energia recorrendo ao *Energy Harvesting*.

Tabela 1 - Densidades de potência dos métodos de *Energy Harvesting* [1].

Métodos de Energy Harvesting	Densidades de Potência
Vibração	116 $\mu W/cm^3$
Piezoelétrico	330 $\mu W/cm^3$
Termoelétrico	40 $\mu W/cm^3$
Solar	15 mW/cm^3

As aplicações de *Energy Harvesting* são diversificadas. No entanto, podemos destacar as seguintes:

- rede de sensores sem fios;
- sistemas autónomos de monitorização remota;
- monitorização estrutural;
- *internet of Things*;
- aplicações Médicas;
- equipamentos moveis.

1.1.2. Dispositivos ressonantes e não ressonantes

A energia cinética das vibrações pode ser transformada em energia elétrica por transdutores eletromagnéticos recorrendo a dois modos de funcionamento diferentes: ressonantes ou não ressonantes. O modo de funcionamento a adotar depende principalmente da frequência de operação. Como exemplos, temos o movimento humano que apresenta uma frequência dominante de 10 Hz, ou as oscilações numa ponte, devido à influencia do vento ou à passagem de veículos, cujas as oscilações podem alcançar os 80Hz. Estas situações ilustram a necessidade de realizar avaliação ponderada de qual será o melhor modo de operação a utilizar: modo ressonante ou não ressonante.

Contudo, convém realçar que a maioria das frequências que se encontram disponíveis no meio ambiente são normalmente inferiores a 200 Hz [2].

Os VEH ressonantes, equivalem a um sistema mola-massa-amortecedor e têm um desempenho ótimo quando trabalham na banda da frequência de ressonância. Normalmente, aparecem associados a sistemas de altas frequências (superiores a 200 Hz) [3], isto requer que a frequência de ressonância do transdutor seja a frequência dominante no ambiente de aplicação para que seja efectivo. Assim que ocorre uma redução no valor da frequência, a energia produzida também diminui. Usualmente, a frequência de ressonância do transdutor é fixa. O que faz com que este seja utilizado apenas para uma aplicação específica.

Quando o transdutor VEH tem o seu funcionamento numa ampla faixa de frequência recorre-se ao modo de operação não ressonantes [4]. Este modo está normalmente associado a baixas frequências (entre 1-40Hz) de funcionamento, com grandes amplitudes de movimento, ou quando as oscilações não são periódicas. Temos como exemplo, o movimento humano ou ondas nos oceanos, em ambas as situações as frequências dominantes são inferiores a 20 Hz [3].

Convém realçar que a maioria das vibrações originadas no ambiente de aplicação são não periódicas.

As estratégias descritas em baixo, consistem em alterar a frequência de ressonância dos VEH, estes métodos consistem em ajustamentos mecânicos e ajustamentos elétricos. Relativamente a métodos mecânicos consiste em alterar propriedades da estrutura, o princípio demonstrado é geralmente aplicado a todos os sistemas mecânicos ressonantes, estes ajustamentos consistem em:

- variar a dimensão;
- alterando a centro de gravidade da massa;
- rigidez da mola;
- deformações na estrutura.

Ao fim da estrutura do transdutor estar elaborada, torna-se difícil variar a sua dimensão, nomeadamente o seu comprimento, largura e espessura. Outra abordagem é tida em consideração, que consiste em alterar a localização inicial onde a estrutura fica alojada, para um outro novo local. Se a frequência de ressonância com a variação do comprimento da estrutura for negativa $\left(-\frac{\Delta}{l}\right)$, em que, l = é o comprimento original, e Δ = é a diferença entre o comprimento original e o comprimento modificado, significa que o transdutor é mais pequeno que o seu comprimento original, assim a frequência de ressonância aumenta. Por sua vez, se a frequência de ressonância com a variação do comprimento da estrutura for positiva $\left(+\frac{\Delta}{l}\right)$, significa que o transdutor tem um comprimento maior que o seu comprimento original, e assim a sua frequência de ressonância diminui.

Na figura 1, temos um exemplo, um gerador eletromagnético, composto por uma bobina e um ímã fixo na extremidade livre de um *cantilever*. O transdutor está aparafusado à base. Um controlo deslizante é avançado ou recuado, ajustando assim o comprimento efetivo (comprimento modificado) do transdutor e por sua vez, a frequência de ressonância.

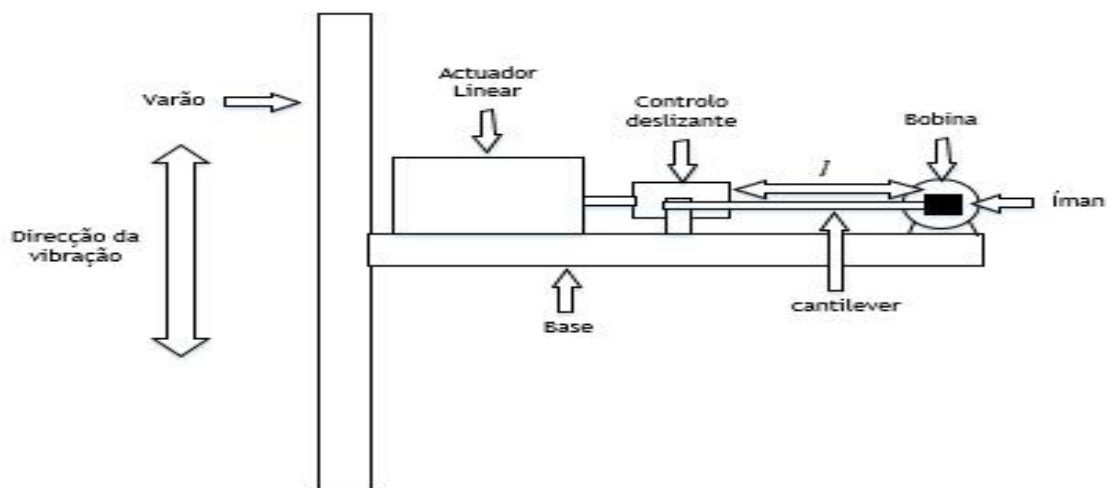


Figura 1 - Vista de lado de um transdutor de recolha de energia com sistema variável de ajuste de comprimentos efetivos.

Noutras situações, para se alterar a frequência de ressonância do transdutor, recorrer-se ao ajuste do centro de gravidade da massa, assim, ao ajustarmos a massa, altera-se o centro de gravidade que influencia diretamente a frequência de ressonância do transdutor.

Outra forma, muito utilizada para se alterar a frequência de ressonância do dispositivo é alterar a rigidez da mola, ou para mais rija ou para mais maleável, variando assim a constante da mola, originando com isso uma nova frequência de ressonância.

Se a estrutura for submetida a uma força, responsável por provocar uma deformação da estrutura, a carga axial aplicada, irá mudar a frequência de ressonância do transdutor.

Os métodos de conversão da energia são variados: métodos electrostáticos, métodos piezoelétricos, métodos térmicos e métodos magnéticos. Esta dissertação diz respeito a transdutores eletromagnéticos, e, por esse motivo, vamos apenas abordar os métodos magnéticos.

Nos métodos magnéticos, o modo como é alterada a frequência de ressonância, consiste em aplicar uma força magnética perpendicular ao transdutor, como mostrado na figura 2, a

frequência de ressonância é alterada variando a distância (d) entre o íman de ajuste e o íman fixo.

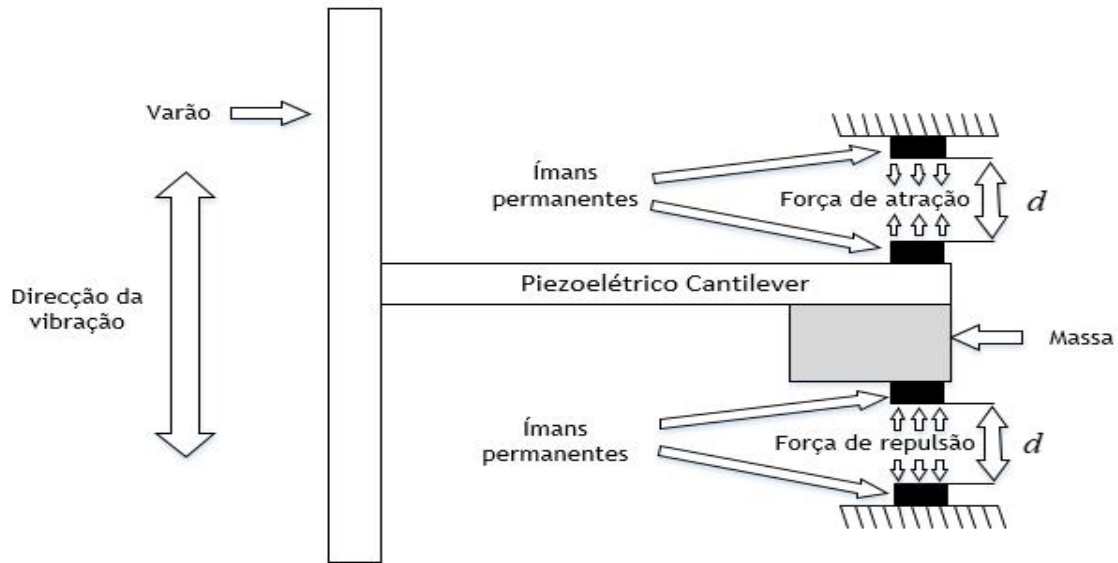


Figura 2 - Esquemático de um gerador piezoelétrico com frequência de ressonância variável.

Nos métodos elétricos, o princípio básico consiste em alterar o acoplamento elétrico e o amortecimento elétrico, ajustando a carga elétrica.

As cargas resistivas reduzem a eficiência da transferência de energia. Por outro lado, as cargas indutivas são difíceis de ser ajustadas. Uma solução passa por introduzir cargas capacitivas como estratégia para um ajustamento elétrico.

Uma outra solução passa, por aumentar a faixa operacional de frequência dos VEH e, assim, ampliar a largura de banda. A forma utilizada para ampliar a largura de banda consiste no uso de uma matriz geradora. Nesta matriz geradora, é introduzido um limitador de amplitude no dispositivo e osciladores acoplados, é utilizada estruturas não lineares e biestáveis [5].

A matriz geradora, é constituída por diversos pequenos geradores, cada um com diferentes dimensões e massas e diferentes frequências de ressonância, a junção destes pequenos geradores vai originar um grande gerador com maior massa inercial e alto grau de amortecimento, assim a banda da frequência operacional do gerador é aumentada. Por outro lado, como desvantagens, verifica-se ser complexa a fabricação destas matrizes geradoras.

O método limitador de amplitude, é um método complicado. Contudo, a largura de banda do VEH pode ser alargada utilizando um limitador de amplitude que limita a amplitude do ressonador. Este método, pode aumentar a largura de banda quando a frequência de excitação é aumentada gradualmente. Por sua vez, quando a frequência de excitação é reduzida a largura de banda mantém-se.

No método dos osciladores acoplados, o gerador é composto por um par de osciladores acoplados. É formado por duas molas (k_1 e k_2), duas massas (m_1 e m_2), e dois amortecedores (A_1 e A_2), associado como se representa na figura 3. A primeira mola é a responsável por ligar a armação inercial e a primeira massa. A segunda mola é responsável por ligar as duas massas. A cada massa está ligada um amortecedor. Este tipo de geradores responde melhor numa maior ampla faixa de frequência. Contudo, em questões de potência máxima de saída, a mesma é mais baixa que os geradores que usem apenas uma massa.

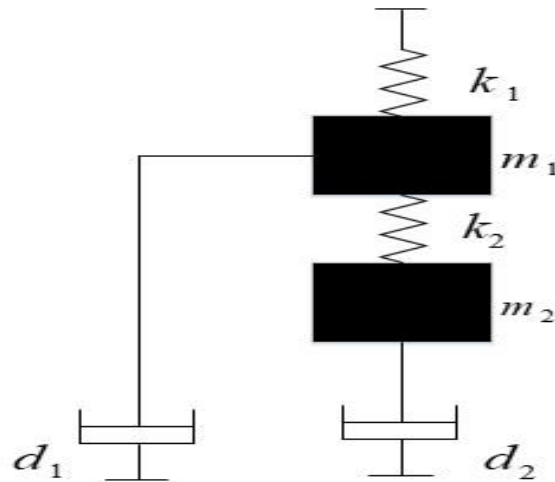


Figura 3 - Modelo esquemático de um oscilador acoplador.

Nos geradores não lineares é utilizado uma mola de endurecimento, que irá influenciar a frequência de ressonância. Vários estudos demonstram que ao ser usado uma mola de endurecimento, os VEH possuem uma largura de banda maior sobre o qual a energia pode ser colhida, isto ocorre como dito anteriormente devido a mudança da frequência de ressonância. A taxa de largura de banda está relacionada com o índice de amortecimento da não linearidade. Idealmente, a quantidade máxima de energia recolhida por um sistema não linear com uma rigidez de endurecimento é a mesma que um sistema linear. Contudo, a potência máxima ocorre numa frequência diferente, isto depende da sua não linearidade. Torna-se importante salientar, que a potencia de saída e a largura da banda dos geradores não lineares depende da direção da aproximação da frequência de vibração com a frequência de ressonância.

Para concluir, nos geradores biestáveis ou mecanismos *snap-through*, estes, utilizam uma rigidez negativa tal que o efeito de aumentar a resposta de deslocamento do ressonador em função do tempo, vai resultar numa velocidade maior para uma determinada excitação de entrada. A energia recolhida por um dispositivo biestável é $\frac{4}{\pi}$ maior que a do dispositivo linear, desde que o dispositivo produza uma onda quadrada de saída para uma entrada sinusoidal. Estes geradores tem uma maior potencia se a frequência de excitação for inferior à frequência de ressonância do gerador.

Tzeno Galchev [6] implementou um gerador eletromagnético com uma estrutura biestável para ser utilizada em baixas frequências e em vibrações não periódicas, a estrutura do mecanismo biestável é usada para iniciar as oscilações mecânicas de alta frequência de um transdutor eletromagnético da figura 4, o transdutor gerou um pico de $288 \mu W$ a 10 Hz e opera numa faixa de frequência de 20 Hz com uma potência média de $5.8 \mu W$ e com uma aceleração de entrada de $9.8 m/s^2$.

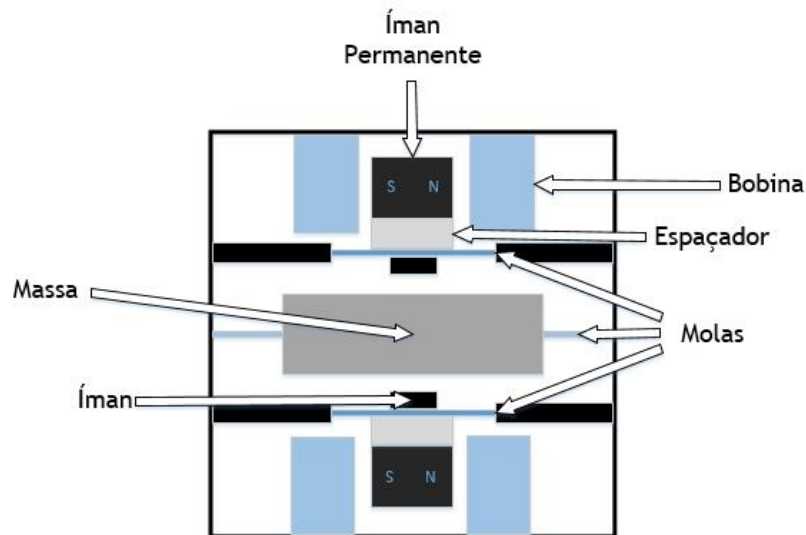


Figura 4 - Gerador aumentado de frequência paramétrica (PFIG).

1.1.3. Visão geral das fontes de energia

Esta secção, analisa as diferentes fontes de energia, disponíveis no meio ambiente. Estas fontes de energia podem ser divididas em dois grandes grupos, nomeadamente, as fontes de energia renováveis e as fontes de energia não renováveis.

As fontes de energia não renováveis, também conhecidas como energia suja, são aquelas que se encontram na natureza, com recursos limitados e que se extinguem com a sua utilização. Esta energia não renovável depende de processos à escala geológica para se formarem, que se desenvolvem na natureza ao longo de milhões de anos (aproximadamente 500 milhões de anos), como exemplos temos: carvão mineral, o petróleo, gás natural e combustíveis nucleares como é o caso do urânio.

Nas fontes de energia renováveis, não é possível estabelecer um fim temporal da sua utilização, isto é, são fontes de energia inesgotáveis obtidas da natureza. Contudo são limitadas em termos da quantidade de energia que é possível extrair num determinado momento. Como exemplos temos: a energia solar, energia eólica, energia hídrica, energia geotérmica, e energias alternativas, como as vibrações, diferenças de temperatura e ondas de rádio frequência (RF).

A recolha de energia apresenta inúmeras vantagens e desvantagens dependendo da fonte de energia que se pretende usar:

- Energia Solar - usa células fotovoltaicas na conversão da energia solar em energia elétrica;
- Energia Térmica - usa termo geradores no processo de conversão;
- *Bio Fuel Cells* - utiliza um bio-reactor que permite obter energia através da oxidação biológica de matéria orgânica;
- Energia mecânica - recorre a diferentes mecanismos de conversão, que incluem vibração, electrostático, eletromagnético, piezoelétrico, vento, fluxo de um líquido, pressão do sangue, respiração, corpo humano, cinética.

A tabela 2 apresenta uma comparação entre vários tipos de recolha de energia em termo de vantagens e desvantagens do processo.

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens da recolha de energia.

	Vantagens	Desvantagens
Energia Solar	Simple, barato e eficiente	Fonte de energia Imprevisível, requer proteções contra sobrecargas
Energia Térmica	Sem partes moveis, longa esperança de vida, encontra enorme potencial de utilização no corpo humano	Baixas densidades de energia, maior investimento, uso limitado devido ao gradiente de temperatura exigido
<i>Bio Fuel Cells</i>	Fonte de combustível constante	Sensível a ambientes externos, não se encontra disponível comercialmente, ocorrem limitações da vida útil dos componentes biológicos

Energia Mecânica	Maior produção de energia, previsível	Limitações da vida útil de algumas peças, potencia limitada
------------------	---------------------------------------	---

1.1.4. Recolha de energia das vibrações

Esta dissertação foca-se essencialmente na energia cinética associada às vibrações mecânicas que se caracterizam por estar disponíveis num corpo em movimento. Neste caso, usufrui-se das vibrações que o corpo produz no decorrer da sua operação normal, e que se podem encontrar nos mais diversos meios, como por exemplo: num carro ou em equipamentos industriais. Esta fonte de energia usualmente recorre a transdutores que realizem a conversão da energia mecânica em energia elétrica [1].

Os transdutores piezoelétricos, foram descobertos por Pierre e Jacques em 1880, recorrem às forças mecânicas para que ocorra deformação dos materiais cristalinos (cerâmicas, polímeros), para darem origem a um potencial elétrico [7]. Este fenómeno ocorre porque existe uma separação espontânea de cargas em certas estruturas cristalinas. Atualmente, a cerâmica policristalina é mais utilizada para a construção de transdutores piezoelétricos, contudo outros materiais como o titanato zirconato de chumbo (PZT), fluoreto de polivinilideno (PVDF) ou macro fibras (MFC) também são muito utilizados.

Através da figura 5, e para as mesmas dimensões dos transdutores, o material PZT-5A é aquele que apresenta a maior potência de saída.

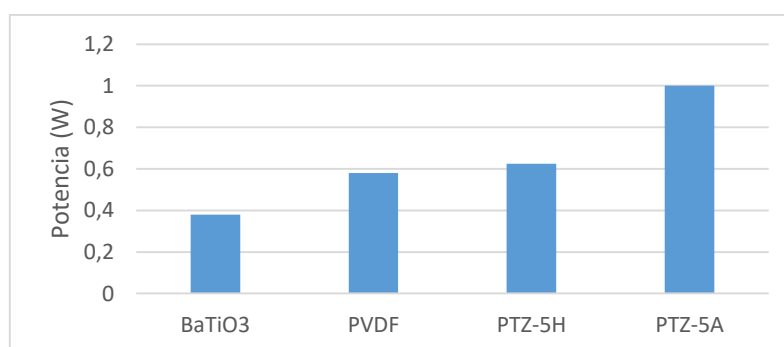


Figura 5 - Comparação da potencia de saída para diversos materiais utilizados nos transdutores piezoelétricos.

Tipicamente os geradores piezoelétricos trabalham de duas maneiras, no modo 33 ou no modo 31, como representado na figura 6. No modo 33, a força aplicada possui a mesma direção da vibração. No modo 31, uma força lateral é aplicada na direção perpendicular à

vibração. Geralmente, o mais utilizado é o acoplamento do modo 31 devido ao seu baixo coeficiente de acoplamento. Geometricamente, os transdutores piezoelétricos *cantilever* ou *double-clamped* são do modo 31, devido as tensões (forças) laterais na superfície do feixe que são facilmente acopladas aos materiais piezoelétricos que estão depositados no feixe.

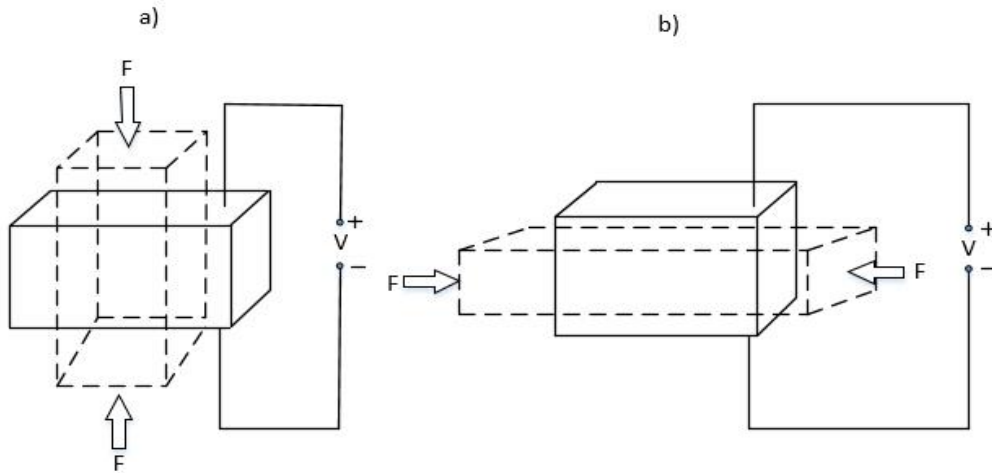


Figura 6 - Gerador Piezoelétrico: a) modo 33 e b) modo 31.

A geometria mais comum dos transdutores piezoelétricos é em *cantilever*, pode ser na forma *unimorph*, em que apenas existe uma única camada piezoelétrica no topo do feixe ou sob a forma *bimorph* em que existe uma camada em cima e em baixo do feixe. Os transdutores piezoelétricos são caracterizados por tensões alternadas elevadas e baixas correntes e pela sua baixa frequência de ressonância [7].

Na figura 7 temos um transdutor piezoelétrico *bimorph cantilever*, pode-se observar as duas camadas piezoelétricas (uma em cima e outra em baixo) e uma massa acoplada no final do transdutor.

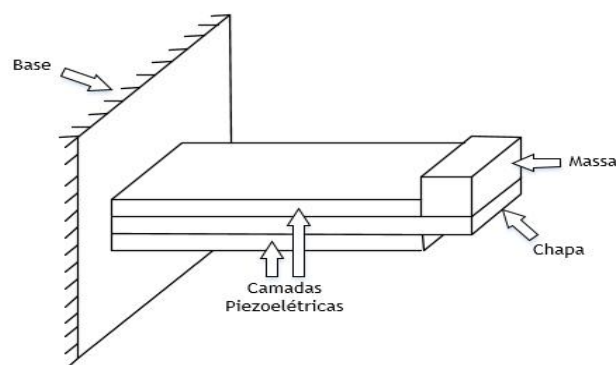


Figura 7 - Transdutor Piezoelétrico *bimorph*.

A figura 8, apresenta um sistema de Energy Harvesting simplificado, composto pelo elemento piezoelétrico.

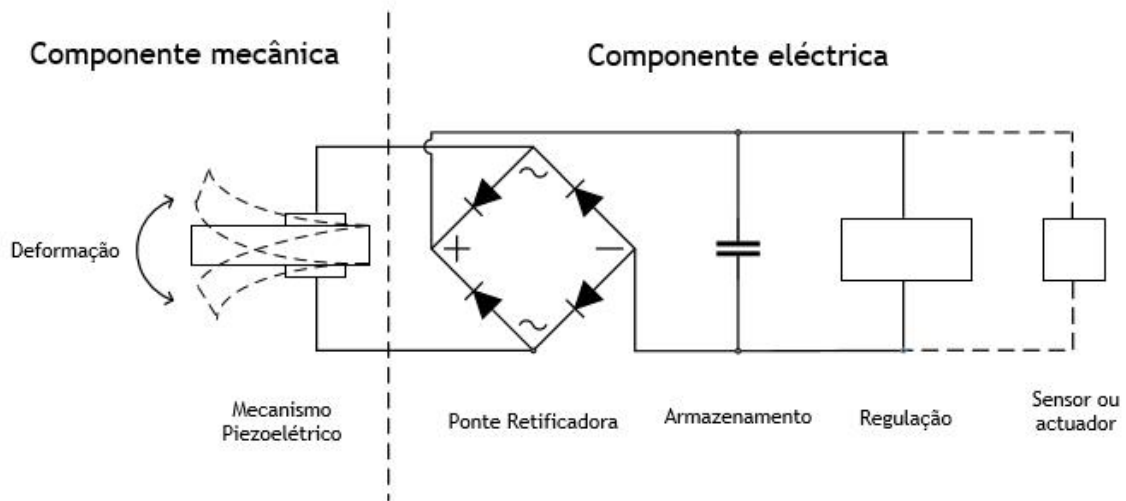


Figura 8 - Representação esquemática de *Energy Harvesting* Piezoelétrico.

Temos um sistema típico de *Energy Harvesting* Piezoelétrico, possui uma fonte de energia externa (transdutor piezoelétrico), responsável por converter a energia mecânica em energia elétrica, uma ponte retificadora, que irá converter o sinal proveniente do transdutor piezoelétrico de AC para DC, bateria/condensadores para armazenamento de energia, regulador de tensão, para converter a tensão na tensão de funcionamento do sensor ou atuador e por fim a aplicação de um sensor ou atuador dependendo para que foi projetado o sistema EH.

Os transdutores eletromagnéticos, são compostos por um ímã que oscila dentro de uma bobine, podem ser construídos para operarem em diferentes gamas de frequências, amplitudes e potências. Na figura 9 representa-se um exemplo de um transdutor eletromecânico.

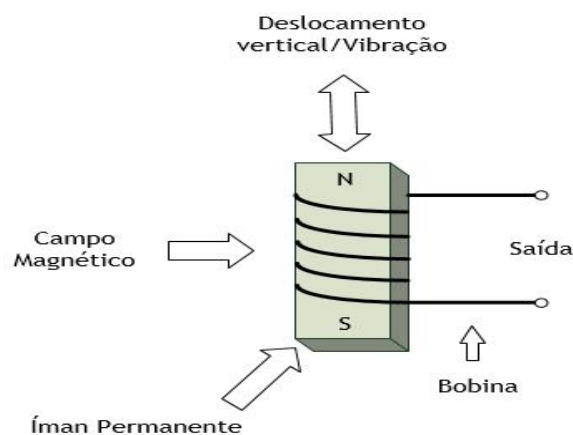


Figura 9 - Transdutor Eletromecânico.

Os transdutores electroestáticos, têm como base de funcionamento a variação da capacidade do condensador. A capacidade varia entre valores máximos e mínimos. Por outro lado, se a tensão no condensador for forçada, a carga vai se mover do condensador e a capacitância diminui. O movimento relativo (vibrações mecânicas) entre duas placas separadas por um material dielétrico, tais como ar, vácuo ou outro, permite converter a energia associada ao movimento em energia elétrica [8].

Os transdutores electroestáticos podem ser divididos em três categorias, como representado na figura 10, *in-plane overlap* (10a), *in-plane gap closing* (10b) e *out-of-plane gap closing* (10c).

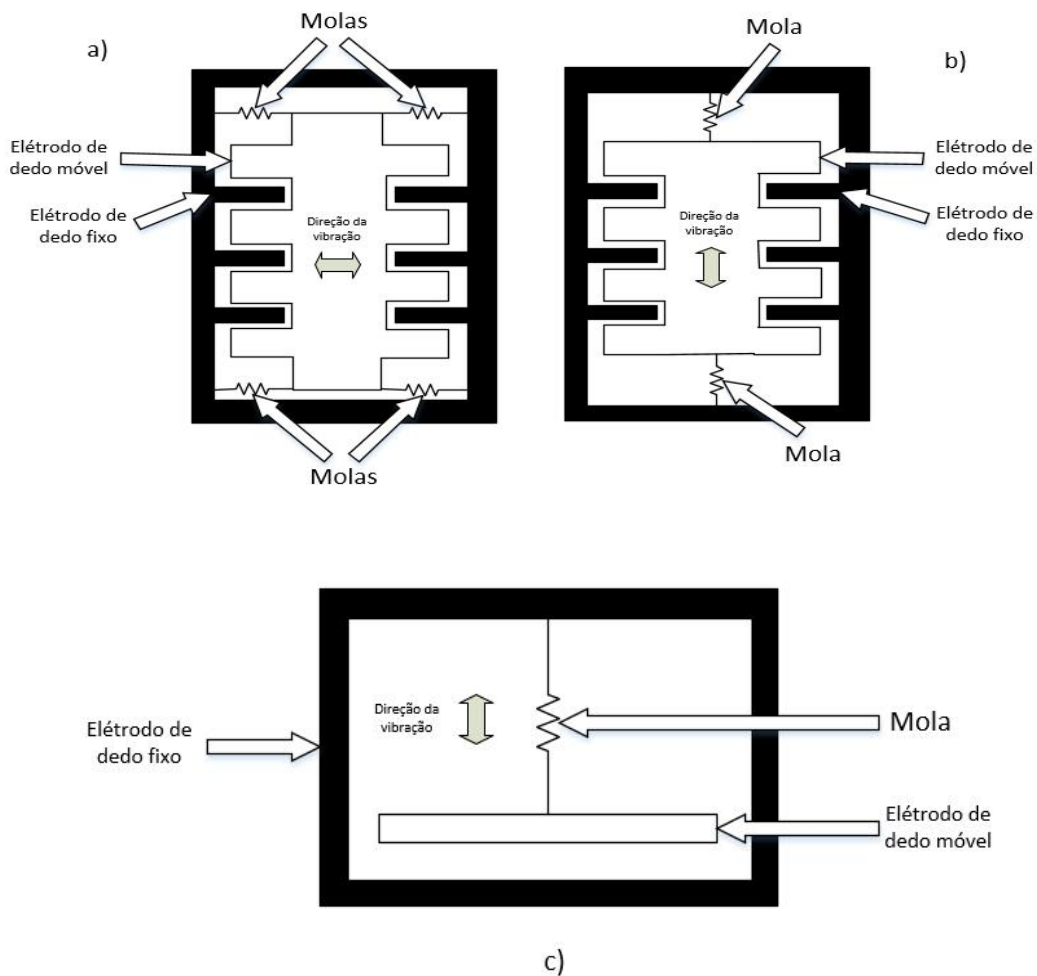


Figura 10 - Transdutor electroestático: a) in-plane overlap; b) in-plane gap closing; c) out-of-plane gap closing.

Os três métodos podem funcionar com limitação de carga ou com ciclos de tensão limitada. Usualmente, os transdutores electroestáticos funcionam em ciclos de tensão limitada.

Os transdutores triboelétricos ou *Triboelectric nanogenerator* (TENG), são considerados um subconjunto EH do caso eletrostático. O seu princípio de funcionamento é baseado no efeito triboelétrico.

Esta forma de eletrificação de contacto observa-se em determinados materiais através do contacto com um material diferente [9]. Este processo produz cargas elétricas quando dois materiais diferentes estão em contacto e são de seguida separados. Durante esse contacto, cada material desenvolve uma carga de polaridade oposta. Esta eletrificação ocorre praticamente com qualquer combinação de materiais. É também chamado de eletricidade estática.

Praticamente qualquer combinação de materiais pode ser utilizada para eletrificação de contacto, basta a combinação de dois materiais diferentes, como metais (condutor), semicondutores e isoladores (materiais não iónicos) [10]. Os materiais mais comuns para a construção destes transdutores são os: Polidimetilsiloxano (PDMS), Polietileno tereftalado modificado com glicol (PETG), Polimetil-metacrilato (PMMA), Politetrafluoretileno (PTFE), ao serem postos lado a lado como por exemplo com o alumínio, cobre, nylon ou prata, é onde ocorrem as melhores combinações com os melhores resultados.

Nos polímeros iónicos, mostrou-se que a carga é realizada pela transferência de iões, quando uma superfície secundária e carregada de forma oposta contacta com a superfície primária, os iões são transferidos para a superfície secundária e assim ocorre transferência de carga ou eletrificação de contacto. Por outro lado, nos polímeros não iónicos, estes polímeros não possuem iões na sua superfície, contudo e mesmo assim ainda carregam carga. Como não existe iões para se transferir quando existe contacto, conclui-se que outro mecanismo de transferência ocorre. Este mecanismo é o caso do *x-ray photoelectron spectroscopy* (XPS) é muito utilizado em superfícies em materiais isolantes, devido a sua capacidade em transferir moléculas para a outra superfície oposta. Estas moléculas são transferidas naturalmente e carregam uma carga, esta transferência de material é muito localizada na superfície do material, com isto resulta grupos de cargas positivas e de cargas negativas nas superfícies de ambos os materiais, tem como nome "*surface charge mosaic*" [11].

Na figura 11, temos um exemplo de funcionamento de um transdutor triboelétrico de dois estados.

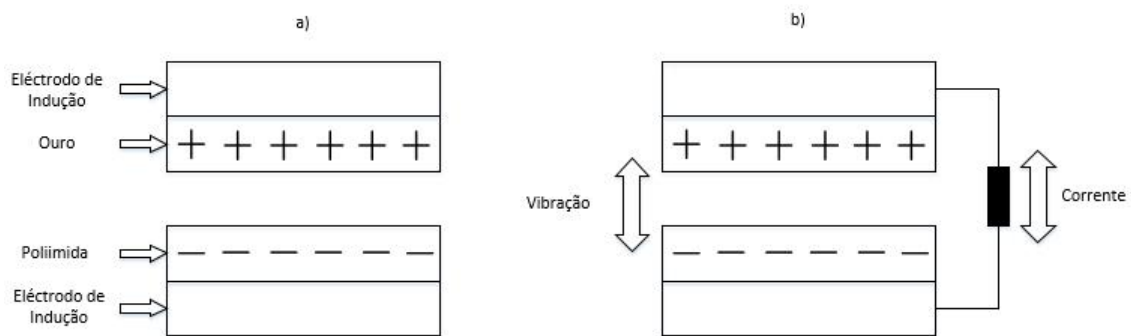


Figura 11 - Funcionamento de um transdutor triboelétrico de dois estados. a) carregado electrostaticamente por eletrificação de contacto. b) out-of-plane gap closing.

Os TENG, encontram aplicabilidade no movimento humano, rotação de uma roda, eventos onde ocorra choque, flexão/deformação de materiais, vento e correntes de água. Os TENG também estão a ser combinados com outros sistemas de EH permitindo assim uma maior recolha de energia.

Para concluir este capítulo, na tabela 3 são inumeradas algumas vantagens e desvantagens dos VEH referenciados em cima.

Tabela 3 - Vantagens e desvantagens dos VEH.

	Transdutores Eletromagnético	Transdutores Piezoelétricos	Transdutores Eletrostáticos	Transdutores triboelétricos
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> -Correntes de saída elevadas; -Longa duração; -Bom em baixas frequências (5-100 Hz) 	<ul style="list-style-type: none"> -Tensões de saída elevadas; -Não necessita de uma fonte de excitação externa; -Implementação fácil, estruturas simples; 	<ul style="list-style-type: none"> - Tensões de saída elevadas; -Redução no tamanho aumenta a capacitância; -Construção de baixo custo; 	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil de fabricar; -Pouco dispendiosos; -Alta eficiência;
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> -Tensões de saída reduzidas; 	<ul style="list-style-type: none"> -Material dispendioso; 	<ul style="list-style-type: none"> -Baixas capacitâncias; 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de várias

	-Baixa eficiência em frequências baixas; -Difícil de desenvolver dispositivos MEMS;	-Material sofre fadiga;	-Baixas densidades de energia; -Precisa de um circuito externo para a tensão de polarização.	matérias diferentes; -Pouca durabilidade;
--	--	-------------------------	---	--

1.2. A recolha de energia das vibrações utilizando dispositivos eletromagnéticos

O desenvolvimento do primeiro transdutor eletromagnético foi realizado por Williams e Yates [12] em 1995, desde então que a teoria foi modificada e descrita de varias maneiras. Porém as descobertas básicas mantiveram-se. Mas foi no ano 2000 que se começou a desenvolver devido ao crescimento dos dispositivos *Micro Electro Mechanical System (MEMS)*.

A potência que um transdutor eletromagnético consegue produzir depende de vários fatores. Nomeadamente, do acoplamento eletromagnético, tamanho, propriedades do material que foi utilizado, configurações geométricas do íman e da bobina, todos estes desempenham um papel fundamental para um maior desempenho.

O transdutor eletromagnético é composto por um íman e por uma bobina (condutor elétrico), quando esta bobina rodeia o campo magnético e existe uma variação desse mesmo campo magnético irá ser originada uma tensão elétrica. Por sua vez, quanto mais rapidamente se variar o campo magnético, ou aumentar o número de espiras da bobina, maior será a tensão gerada. Isto é, quando ocorre um movimento (uma vibração) tanto no íman como na bobina, o que tem como consequência a (variação do campo magnético), uma tensão elétrica será produzida. Na figura 12 pode ser observada a relação entre o movimento do íman e o sentido da corrente.

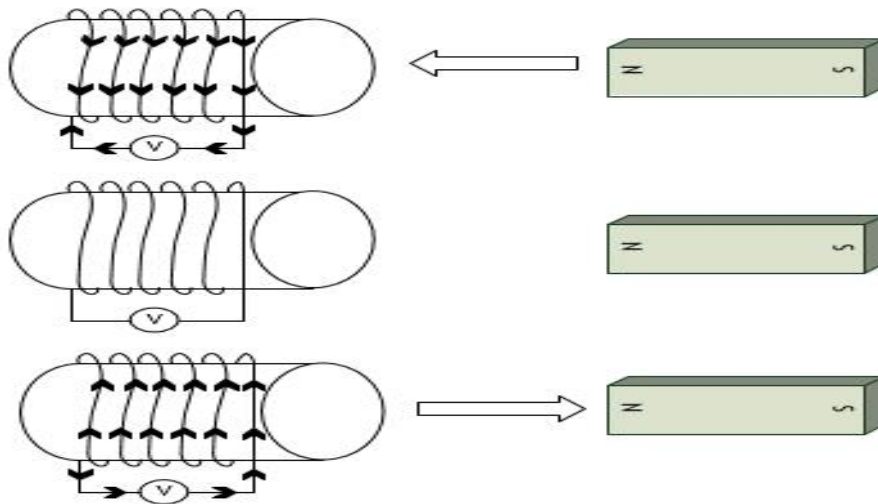


Figura 12 - Movimento do íman e sentido da corrente.

O íman é constituído por um polo norte e um polo sul, quando o polo norte vai entrando e varrendo um dos lados da bobina, o polo sul que vem mesmo atrás, vai varrendo o outro lado da bobina, a isto é chamado de impulso. Quando os polos são invertidos, isto é, o polo sul varre primeiro e depois o polo norte, nesta situação é quando ocorre um segundo impulso, mas desta vez de trás para a frente. Cada vez que existe um movimento completo do íman (um impulso para a frente e depois um impulso para trás), vai haver sinais elétricos que são, positivos-negativos-positivos-negativos, logo a corrente produzida pelo transdutor eletromagnético é em corrente AC.

1.3. Princípio físico associado à conversão eletromagnética de energia

1.3.1. Subsistema mecânico

A recolha de energia através da vibração recorre à energia cinética [13]. Os transdutores eletromagnéticos operam semelhantes a um sistema mola-massa-amortecedor com um grau de liberdade. Na figura 13, observa-se esse mesmo sistema, que consiste em uma massa m , uma constante de elasticidade da mola k , e um amortecedor com o fator de amortecimento d [14].

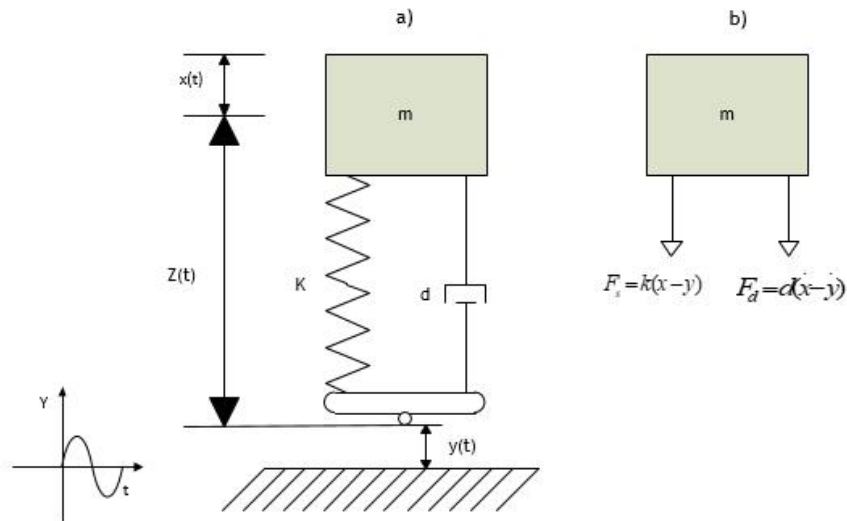


Figura 13 - a) Sistema mola-massa-amortecedor com um grau de liberdade e b) Diagrama de corpo livre dinâmico associado às oscilações da força da mola F_s e de amortecimento F_d .

Recorrendo à segunda lei de newton, a equação que relaciona o seu movimento é:

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

Para sistemas mola-massa-amortecedor com dois graus de liberdade, e recorrendo novamente a segunda lei de newton, equação que relaciona o seu movimento é:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) = 0 \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + k_2 (x_2 - x_1) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

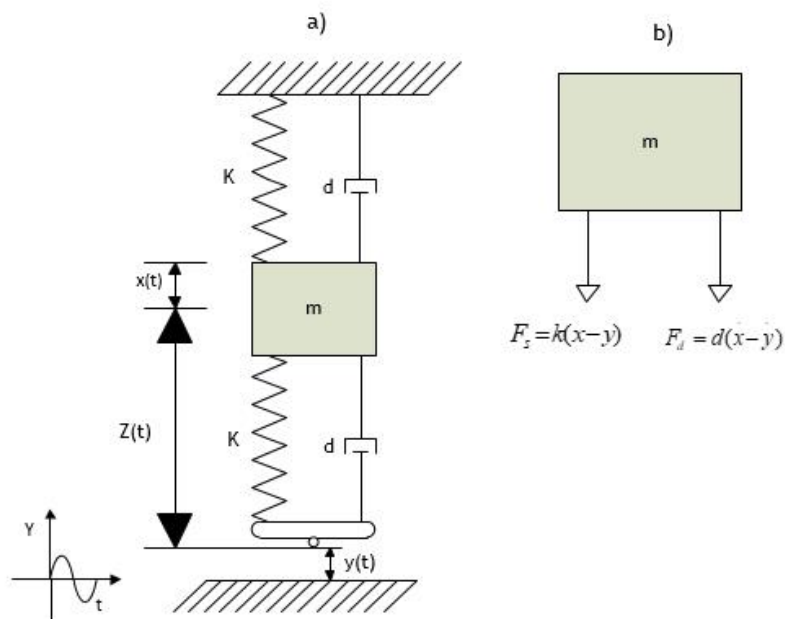


Figura 14 - Sistema mola-massa-amortecedor com dois graus de liberdade e b) Diagrama de corpo livre dinâmico associado as oscilações da força da mola F_s e de amortecimento F_d .

Na figura 13, a posição da massa em suspensão está definida como x , e a variação da posição inferior da mola está definida como y , assim, e recorrendo as coordenadas relativas temos:

$$z = x - y \quad (3)$$

Recorrendo à 1ª derivada temos,

$$\dot{z} = \dot{x} - \dot{y} \quad (4)$$

Recorrendo à 2ª derivada temos,

$$\ddot{z} = \ddot{x} - \ddot{y} \Leftrightarrow \ddot{x} = \ddot{z} + \ddot{y} \quad (5)$$

Da equação 2, também se pode representar como:

$$m\ddot{x} = -k(z) - d(\dot{z}) \Leftrightarrow -kz - d\dot{z} = m\ddot{z} + m\ddot{y} \Leftrightarrow -m\ddot{y} = m\ddot{z} + kz + d\dot{z} \quad (6)$$

Quando o sistema é sujeito à ação de uma vibração, a massa e a mola parte da sua posição de repouso. Assim a variável z , tomam valores diferentes de 0.

A excitação sinusoidal $y(t)$, é expressa por:

$$y(t) = Y \times \text{sen}(\omega t), \quad (7)$$

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

O modelo caracteriza-se pela equação diferencial (7), e para uma análise dinâmica de sistemas lineares, recorre-se à transformada de Laplace para converter a modelização realizada no domínio do tempo para o domínio da frequência.

$$m \frac{d^2[z(t)]}{dt^2} + d \frac{d[z(t)]}{dt} + k[z(t)] = -m \frac{d^2[y(t)]}{dt^2} \quad (8)$$

Usando a transformada de Laplace, temos:

$$ms^2z(s) + dsz(s) + kz(s) = -ms^2y(s) \Leftrightarrow z(s)(ms^2 + ds + k) = -ms^2y(s) \Leftrightarrow \frac{z(s)}{y(s)} \quad (9)$$

$$= \frac{-ms^2}{ms^2 + ds + k}$$

O funcionamento de sistemas mola-massa, tem assim a seguinte função de transferência $H(s)$ que representa o seu funcionamento.

$$H(s) = \frac{z(s)}{y(s)} = \frac{-ms^2}{ms^2 + ds + k} \quad (10)$$

Substituído, $s = j\omega$, temos:

$$H(\omega) = \frac{-mj^2\omega^2}{mj^2\omega^2 + dj\omega + k} \quad (11)$$

Considerando a frequência de ressonância como:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \Leftrightarrow \omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad (12)$$

Considerando o fator de amortecimento como:

$$\xi_m = \frac{d}{2m\omega_n} \Leftrightarrow d = 2\xi_m m\omega_n \quad (13)$$

A equação 10, toma a seguinte forma:

$$H(\omega) = \frac{-mj^2 \times \omega_n^2}{mj^2 + 2\xi_n \times m\omega_n j\omega_n + \omega_n^2 \times m} \Leftrightarrow H(\omega) = \frac{-j^2}{j^2 + 2\xi_n j + 1} \quad (14)$$

1.3.2. Subsistema eletromagnético

Para que ocorra a conversão de energia, é necessário que exista um movimento relativo entre um condutor elétrico e um campo magnético. O condutor elétrico é enrolado dando assim origem a uma bobina (cada enrolamento é designado de espira), quando ocorre movimento relativo entre bobina e campo magnético, irá originar um fluxo de corrente na bobina.

O desempenho dos transdutores eletromagnéticos depende do seu acoplamento eletromagnético. As causas como o tamanho, propriedades do material, configurações

geométricas do íman, configurações geométricas da bobine, circuitos de regulação têm um fator determinante na potência de saída dos transdutores eletromagnéticos.

Os transdutores eletromagnéticos são baseados na lei de Farady, em 1831, Michael Faraday mostrou que quando um condutor elétrico é exposto a uma variação do campo magnético, origina uma diferença de potencial induzida nos terminais do condutor (bobina) [15], o fluxo magnético é definido por:

$$\phi = \iint_A B dA \quad (15)$$

A tensão induzida ou força eletromotriz (fem) é dada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \quad (16)$$

Substituído o fluxo magnético da equação (14), a equação da força eletromotriz toma a seguinte formula:

$$\varepsilon = -\left(\frac{dA}{dt}B + \frac{dB}{dt}A\right) \quad (17)$$

Nos transdutores eletromagnéticos e analisando a equação (16), é indiferente, mudar o campo magnético tendo como base uma área constante, ou mudar a área e ter como base um campo magnético constante. Esta particularidade, oferece uma ampla gama de possíveis implementações do acoplamento eletromagnético. Duas disposições básicas de acoplamento eletromagnético estão representadas na figura 15.

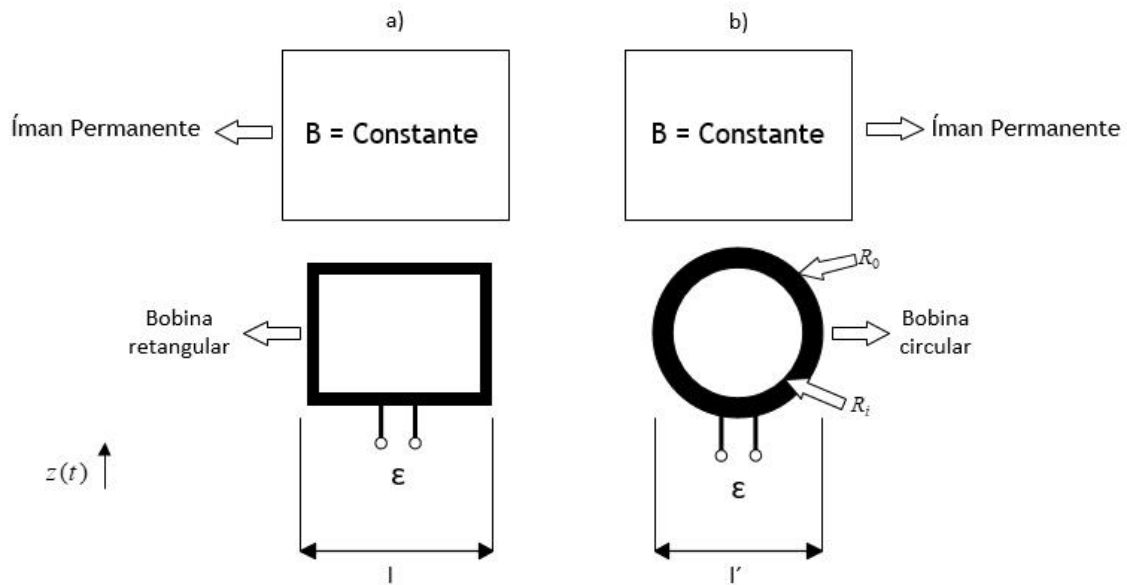


Figura 15 - Modelos populares de transdutores eletromagnéticos, para campos magnéticos constantes, a) bobina retangular com enrolamentos concentrados e b) bobinha circular com enrolamentos espaçados.

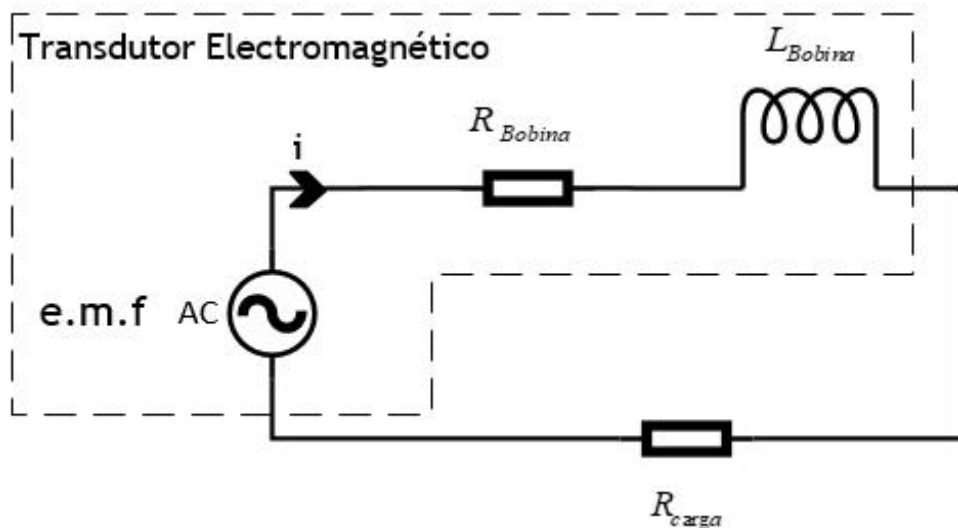


Figura 16 - Representação do circuito diagrama do transdutor eletromagnético.

Para bobinas com secção retangular e com N enrolamentos e de comprimento l , a tensão efm tem a seguinte formula:

$$\varepsilon = -NBl\dot{z} \quad (18)$$

Para bobinas com a secção transversal circular, o comprimento l tem que ser substituído pelo comprimento l' que pode ser máximo quando $(R_0 + R_i)$, contudo é apenas válido para

pequenas amplitudes em $z(t)$ ou pequenas alterações do comprimento l' , a equação (15) pode ser estendida ficando assim:

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dz} \times \frac{dz}{dt} = k_t \times \dot{z} \quad (19)$$

Em que o k_t é o fator de transdução. Analiticamente o fator de transdução é constante e é igual ao gradiente do fluxo magnético.

1.4. Sistematização de soluções desenvolvidas

Atualmente já existem inúmeras soluções que através da recolha da energia ambiente é usado para as mais diversas aplicações. Ao longo dos últimos anos este mercado tem crescido rapidamente, tem havido um esforço e mesmo técnicas inovadoras para explorar o *Energy Harvesting*.

1.4.1. Sistemas ressonantes

Energy Harvesting a partir de carris de comboios

O transporte ferroviário desempenha um papel crucial na economia e na qualidade de vida, e no cotidiano. Em Portugal existe em serviço uma rede ferroviária com cerca de 2793.9 quilómetros, em 2010 circularam pela rede portuguesa cerca de 733.000 comboios.

Uma boa parte dos carris ferroviários encontra-se em áreas remotas, ou regiões subterrâneas onde a infraestruturas elétricas são reduzidas ou não existe de todo. Perante estas situações, torna-se bastante difícil utilizar equipamentos como luzes, sinais de aviso, redes de sensores sem fios, monitorização de pontes [16] ou posicionamento do comboio. Encontramos deste modo uma limitação imposta pela a falta de uma fonte de energia. Em alternativa, é normal recorrer ao uso de baterias, com custos manutenção acrescidos.

Quando um comboio atravessa um carril, o carril sofre uma deformação vertical devido a carga que o comboio exerce sobre o carril, como demonstrado na figura 17. Recorrendo a esta deformação no carril é possível implementar um sistema regenerativo de recolha de energia.



Figura 17 - Deformação vertical num carril de comboio.

O sistema de recolha de energia demonstrado na figura 18 é composto por um conversor mecânico, um gerador eletromagnético e uma roda de inércia. Quando o comboio passa sobre o carril, o sistema de engrenagens de transmissão sujeito à mesma ação de deformação do carril, faz com que as vibrações causadas e o movimento para baixo e para cima vai acionem o gerador produzindo energia que é posteriormente armazenada na roda de inercia.

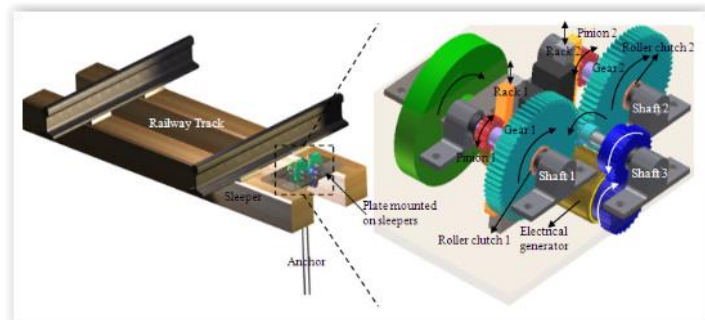


Figura 18 - Sistema e implementação de recolha de energia em carris de comboio [17].

1.4.2. Sistemas não ressonantes

Energy Harvesting através da suspensão de um veículo

O motor de combustão é um dos principais componentes de um veículo. Para além da eficiência do motor, aspecto fundamental no funcionamento do veículo, este também representa uma importante parcela das perdas totais de energia. As perdas por dissipação de energia cinética estão associadas à vibração e ao movimento do veículo. Nos últimos anos, a indústria automóvel tem trabalho arduamente para diminuir este tipo de perdas. Para isso tem desenvolvido e inovado, regra geral em sistemas de travagem e de suspensão, como o *Anti-lock Braking System* (ABS) ou suspensão activa.

O amortecedor é responsável pelo controlo das oscilações da roda, reduzindo assim as vibrações do veículo perante as irregularidades da estrada [18]. Proporciona assim conforto, estabilidade e segurança ao veículo. O amortecedor regenerativo representado na figura 19 está configurado como gerador.

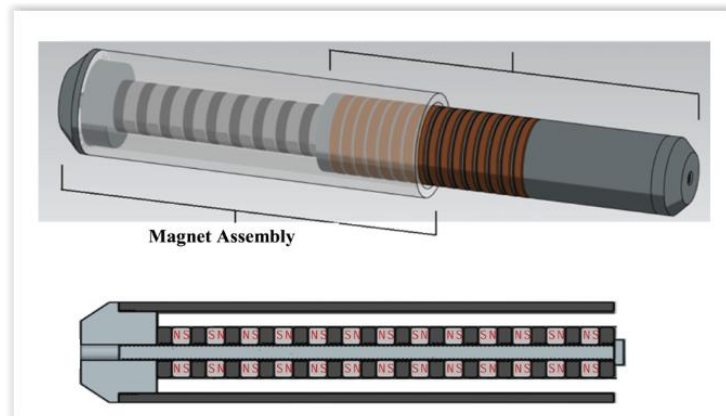


Figura 19 - Diagrama linear do amortecedor eletromagnético e corte transversal do íman [19].

O amortecedor consiste principalmente numa montagem de ímãs e numa montagem de bobinas. O mecanismo converte assim a energia cinética da vibração da suspensão em energia elétrica útil.

1.4.3. Exemplo generalista de ambiente de aplicação

VEH em aplicação de redes sensores sem fios

Num futuro próximo, a implementação de uma rede de sensores sem fios (RSSF) requer que a mesma seja auto-sustentável, do ponto de vista energético. Torna-se assim viável a sua implementação em locais inacessíveis, sem grandes custos, ou evitando a utilização de cabos elétricos [20]. Tradicionalmente, na implementação destes sensores sem fios recorre-se ao uso de baterias, porém, para elevadas quantidades de nodos sensores, a tarefa de substituir as baterias torna-se dispendiosa e pouco viável [21]. A recolha de energia, vem resolver essa lacuna, alimentando os RSSF sem necessidade de recorrer ao uso de baterias. Para tornar este desejo viável, a energia cinética associada às vibrações ou ao movimento é utilizada como fonte de energia. Por exemplo a monitorização de um vulcão utilizando uma RSSF é ilustrada na figura 20.

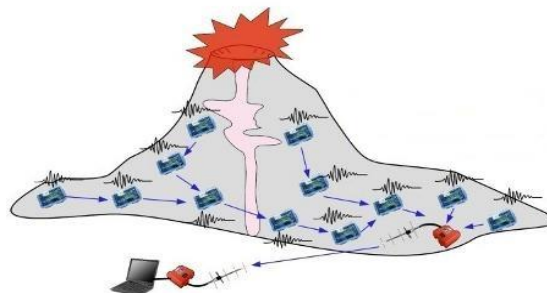


Figura 20 - Monitorização de vulcão por RSSF.

1.4. Motivação, enquadramento do trabalho e estrutura da tese

1.4.1. Motivação

As redes de sensores sem fios (RSSF) sofreram grandes avanços tecnológicos na década de 90. Estas são compostas por um conjunto de pequenos sensores, que comunicam entre si, evitando as ligações através de cabos. São utilizadas nas mais diversas áreas, como por exemplo, saúde, prevenção de fogos, meteorologia, catástrofes naturais, segurança, áreas militares. As RSSF permitem acompanhar/monitorizar, estudar um determinado fenómeno ou acontecimento. Na figura 21 temos um exemplo de um nó sensor comercial.

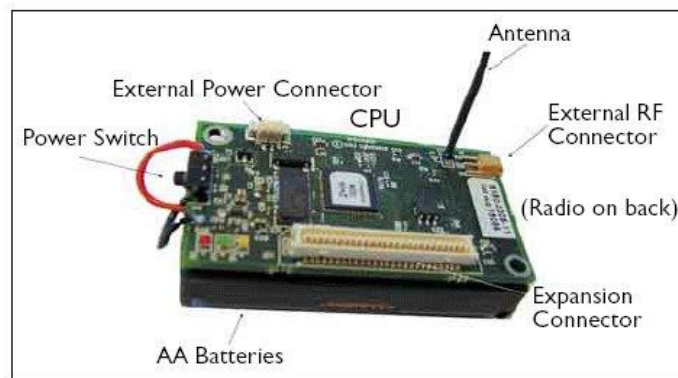


Figura 21 - Mica2.

Produzido pela *Crossbow Technology*, utiliza o sistema operativo *TinyOS*. Consegue transmitir utilizando multicanais nas frequências 310,433, 868/916 MHz. É alimentado por 2 baterias AA, e em modo de adormecimento possui uma autonomia aproximada de 1 ano. Possui, entre outros, sensores de luminosidade, temperatura, pressão barométrica, acelerómetro/sísmica, acústico e magnético.

Um dos aspetos limitativos e negativos das RSSF relaciona-se com a sua alimentação.

Numa RSSF que tenha capacidade para recolher energia do ambiente, incorporando uma das tecnologias descritas anteriormente, esta questão pode ser resolvida, permitindo assim que a RSSF seja alimentada evitando baterias.

O foco desta dissertação cai na vertente da recolha da energia cinética associada a vibrações. Posterior conversão em energia elétrica por intermédio de um transdutor eletromagnético. Estes dispositivos eletromecânicos conseguem converter a energia cinética em energia útil, sendo posteriormente retificada e regulada para que se possa utilizar numa RSSF. Conseguimos, assim, eliminar o uso das baterias, baixando os custos de manutenção e aumentando a autonomia e a fiabilidade do sistema.

1.4.2. Enquadramento do trabalho

Como é do senso comum, hoje em dia a água potável é um bem de consumo muito precioso e cada vez mais escasso. Existem muitas zonas do mundo onde ainda não existe acesso a água potável para o consumo humano. De acordo com a ONU (Organização das Nações Unidas), dentro de 25 anos, um terço da população a nível mundial irá enfrentar problemas relativamente ao abastecimento de água potável.

Um dos principais problemas advém das perdas de água. As fugas acarretam grandes prejuízos para as empresas de distribuição de água, sejam custos socio-ambientais ou custos económicos e financeiros.

O sistema de *Energy Harvesting desenvolvido ao longo* desta dissertação tem como objectivo vir a ser aplicado numa RSSF para gestão e monitorização de água potável em condutas para abastecimento público. Assim é possível, por exemplo, monitorizar a pressão da água, temperaturas, níveis em locais de armazenamento, evitando perdas e melhorando a eficiência do abastecimento.

1.4.3. Estrutura da dissertação

A dissertação é composta por seis capítulos, capítulo 1 - Transdutores eletromagnéticos na recolha de energia das vibrações, capítulo 2 - Validação Experimental do Transdutor, capítulo 3 - Conversão e Regulação de Energia, capítulo 4 - Aplicação Experimental, capítulo 5 - Conclusão. No final são disponibilizadas as Referências Bibliográficas utilizadas na elaboração desta dissertação. No capítulo 1, o conceito associado ao *Energy Harvesting* é introduzido e diferentes princípios de funcionamento, que possibilitam a sua concretização, são descritos através de exemplos de dispositivos que realizam a VEH. O capítulo 1 apresenta ainda um enquadramento e motivação, associada para a realização deste trabalho. O capítulo 2, refere-se à construção e configuração do transdutor eletromagnético, e instalação para validação experimental. Permitindo-se descrever o desempenho e a determinação da resistência de carga ótima. No capítulo 3, é analisado o funcionamento da eletrónica de regulação, necessária para disponibilizar um valor de tensão que respeite os padrões de qualidade a observar para que possa ser utilizada pela restante eletrónica que compõe o nodo sensor. Este capítulo descreve o projeto e a construção do regulador, e posterior validação experimental. Um exemplo de aplicação é abordado no capítulo 4, onde a um nodo sensor composto pelas diferentes componentes desenvolvidas é instalado para que possa ser validado. Finalmente no capítulo 5, é realizada uma análise detalhada dos resultados obtidos e se são fornecidos possíveis trabalhos futuros.

2. Validação experimental do transdutor

2.1. Construção do transdutor eletromagnético

A construção dos transdutores eletromagnéticos utilizado nesta dissertação, é descrita neste capítulo. Este dispositivo resulta do estudo e aplicação de outra dissertação à qual se faz referencia em [22]. Foram construídos dois transdutores eletromagnéticos utilizando o *Solidworks*, um *software* CAD (*Computer-Aided Design*) que se fundamenta em computação paramétrica, e permite criar formas tridimensionais, a partir de formas geométricas básicas. O projeto das diferentes componentes foi transformado para formato STL (*Standard Triangle Language*), para serem lidos e fatiados recorrendo ao programa Cura. O programa Cura, foi criado por David Braam, que mais tarde foi contratado pela empresa Ultimaker, a qual disponibiliza atualmente o software, consegue-se assim converter o ficheiro STL para *gcode*, que é o formato que a maioria das impressoras 3D conseguem ler.

A impressora 3D utilizada foi a BQ Prusa i3 Hephestos, como mostrado na figura 22.

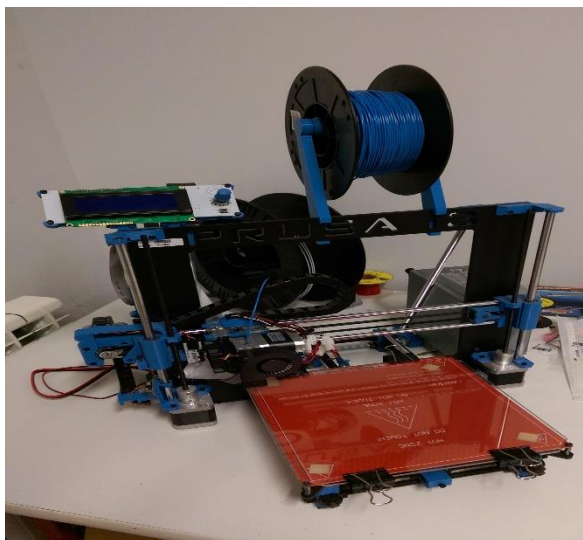


Figura 22 - Impressora 3D BQ Prusa i3 Hephestos.

Na tabela 4 tem as principais características da impressora 3D.

Tabela 4 - Principais especificações da impressora 3D Prusa i3 Hephestos.

Velocidade de impressão	Máxima: até 80-100 mm/s* Recomendada: 40-60 mm/s * Sujeito a materiais, perfis e software utilizados.
Volume de impressão	Volume de impressão: (x)215 x (y)210 x (z)180 mm.
Materiais suportados	Poliácido láctico (PLA), Madeira, Bronze, Cobre e Filaflex.
Mecânica extrusor	Boquilha de 0,4 mm para filamento com 1,75 mm de diâmetro.
Eletrônica	Placa controladora própria BQ Zum Mega 3D.

No primeiro transdutor eletromagnético (transdutor eletromagnético N°1) o íman, é de Neodímio (NdFeB), com 8mm de diâmetro e 4 mm de espessura.

O condutor utilizado para o enrolamento da bobina é fio de cobre, *American Wire Gauge* (AWG) 34. A tabela 5 apresenta as seguintes características do AWG 34 [23].

Tabela 5 - Tabela padrão American Wire Gauge (AWG) 34.

Numero AWG	Diâmetro do condutor (mm)	Ohms por Km (T = 20°C)	Corrente máxima (A)	Numero de espiras por cm	Kg por km	Frequência Máxima (KHz)
34	0.16002	855.752	0.0560	56	0.18	690

A bobina possui 500 espiras e apresenta uma resistência de $R_{T1} = 30.5 \Omega$.

O transdutor eletromagnético é constituído na sua totalidade por 5 peças, todas as 5 peças foram impressas na impressora 3D e como material foi utilizado o PLA com 20% de preenchimento e com uma espessura de parede de 1.2mm.

Na figura 23, temos a planificação da bobina e o modelo 3D.

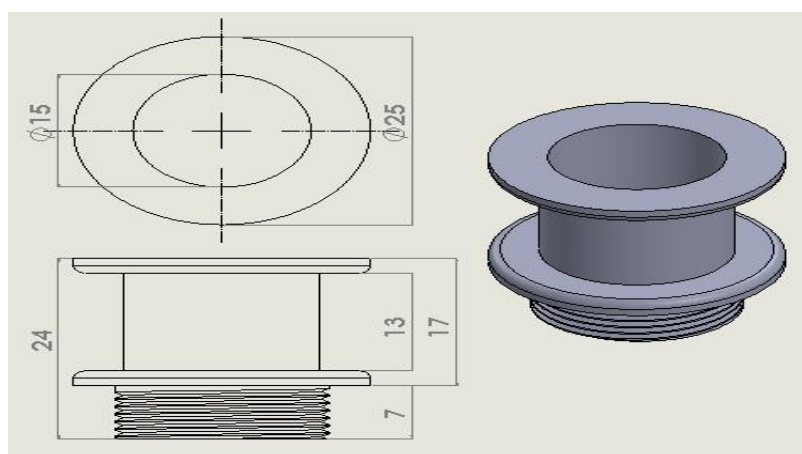


Figura 23 - Planificação e modelo 3D da bobina.

A mola planar com a respetiva planificação e formato em 3D é representada na figura 24.

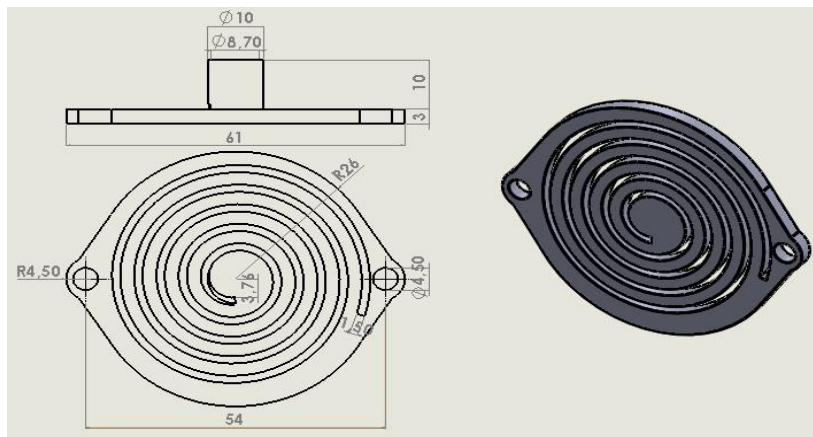


Figura 24 - Planificação e modelo 3D da mola planar.

A figura 25, mais uma vez, tem a planificação e o modelo 3D, esta é a parte superior do transdutor eletromagnético, e é onde vai ficar instalada a mola planar da figura 24, recorrendo a dois parafusos M3.

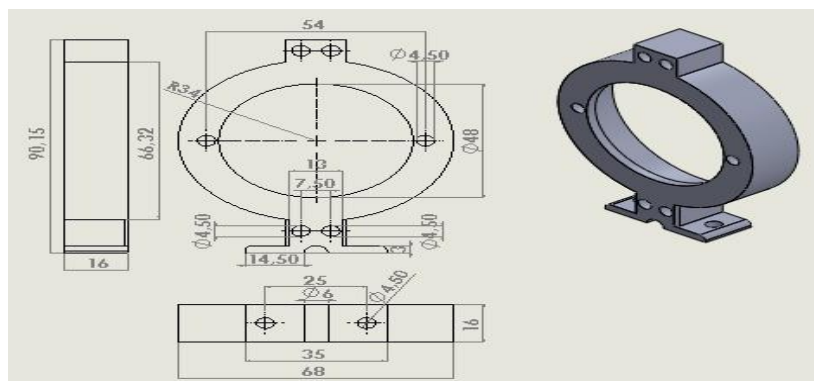


Figura 25 - Planificação e modelo 3D, da parte de cima do transdutor eletromagnético.

A figura 26 representa, a parte inferior do transdutor eletromagnético, onde irá enroscar a bobine da figura 23, temos também a planificação e o modelo 3D.

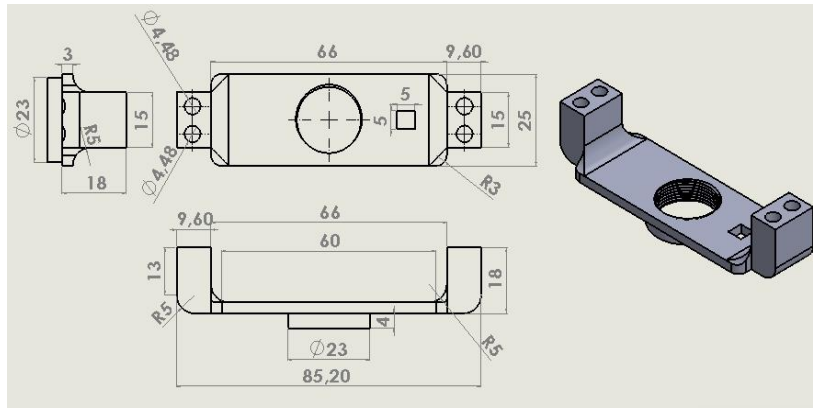


Figura 26 - Planificação e modelo 3D, da parte de inferior do transdutor eletromagnético.

Para concluir, a descrição da constituição do transdutor eletromagnético, na figura 27, temos a peça que permite apertar o transdutor eletromagnético ao varão que transmite as vibrações mecânicas tal como vai ser referenciado no subcapítulo 2.2.

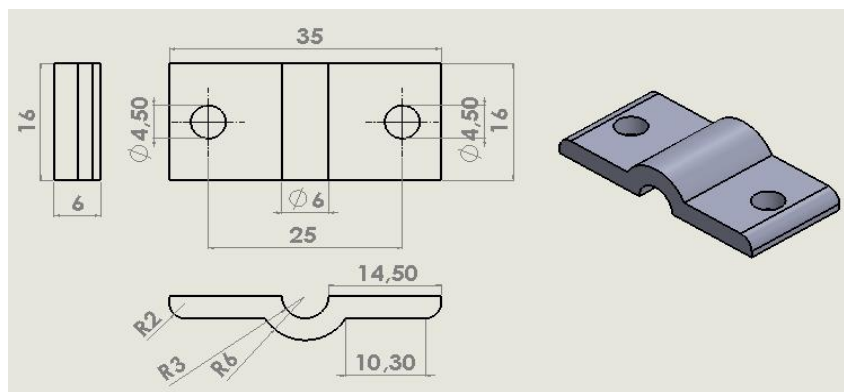


Figura 27 - Planificação e modelo 3D da peça de apoio do transdutor eletromagnético ao varão.

A figura 28, mostra todos os constituintes do transdutor eletromagnético e a sua montagem final.

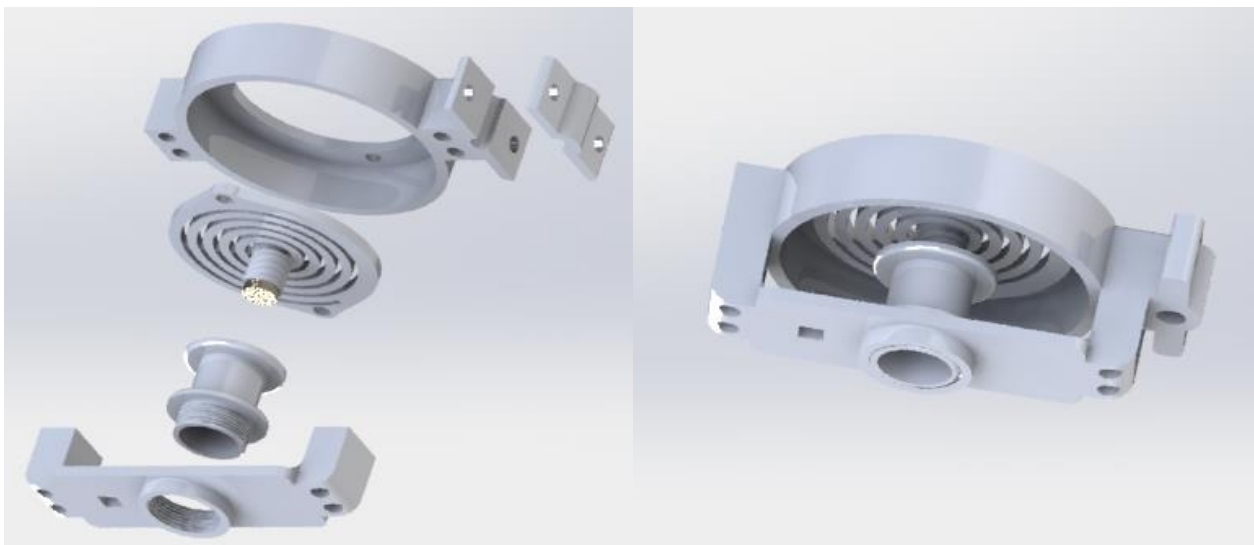


Figura 28 - Transdutor Eletromagnético N°1.

Devido ao facto do primeiro transdutor eletromagnético não conseguir atingir a tensão mínima de 4.5V, (tensão mínima necessária a entrada e funcionamento da eletrónica de conversão e regulação da energia incluída no *kit Energy Harvesting DC2080* descrito no capítulo 3) foi refeito um novo transdutor eletromagnético (transdutor eletromagnético N°2).

Foi adicionado um novo íman, também de Neodímio com as seguintes características, 8 mm de diâmetro e 15 mm de espessura. Foram adicionadas à bobina, recorrendo ao mesmo condutor AWG 34, mais espiras possuindo no total 3560 espiras com uma resistência de $R_{T2} = 270 \Omega$. Foi também adicionado uma nova mola planar, em baixo do transdutor eletromagnético como demonstrado nas figuras seguintes em baixo.

O novo transdutor eletromagnético é composto por 6 partes. Mais uma vez, o material utilizado foi o PLA com 20% de preenchimento e com uma espessura de parede de 1.2mm.

Na figura 29, temos a planificação e modelo 3D da bobina.

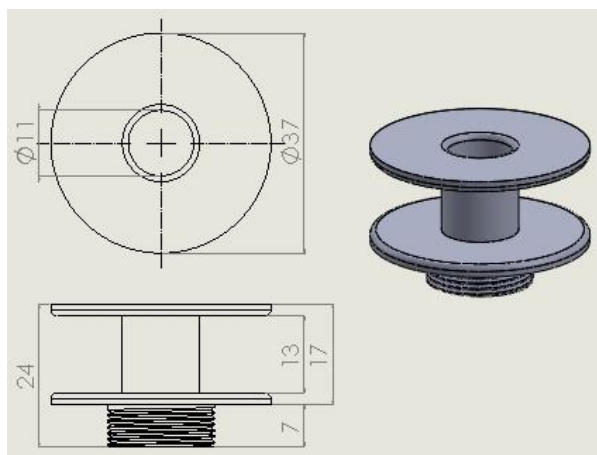


Figura 29 - Planificação e modelo 3D da bobina.

A figura 30, apresenta a mola planar com a respetiva planificação e formato 3D. Foram utilizadas duas molas planares iguais, uma para a parte superior do transdutor eletromagnético e a outra para a parte inferior.

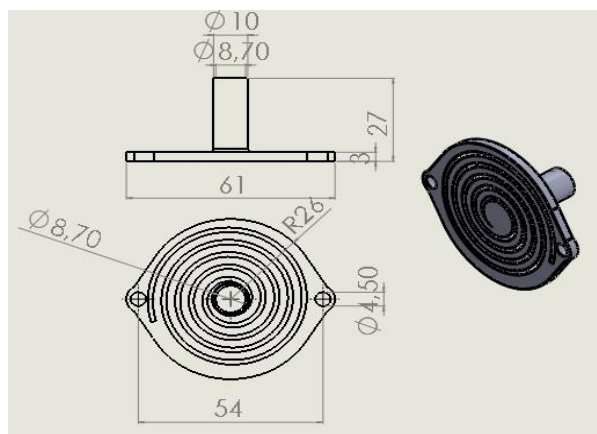


Figura 30 - Planificação e modelo 3D da mola planar.

A figura 31, representa a planificação e o modelo 3D da parte de superior do transdutor eletromagnético, onde vai ficar instalada a primeira mola planar da figura 30, recorrendo a dois parafusos M3.

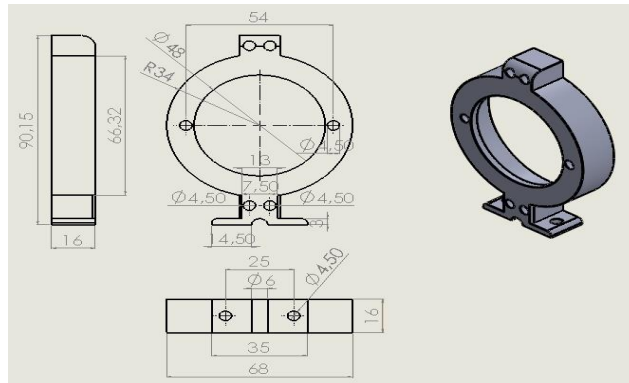


Figura 31 - Planificação e modelo 3D, da parte de cima do transdutor eletromagnético.

Na figura 32 é representada a parte inferior do transdutor eletromagnético, onde irá enroscar a bobina da figura 29 e aparafusar a outra mola planar da figura 30, temos também a planificação e o modelo 3D.

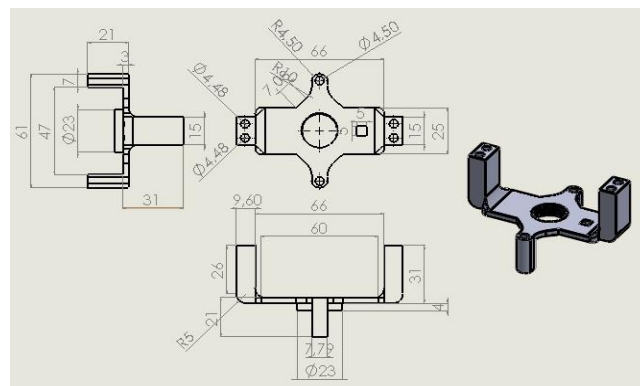


Figura 32 - Planificação e modelo 3D, da parte inferior do transdutor eletromagnético.

Para concluir a descrição do transdutor eletromagnético N°2, temos representada na figura 33, a peça que irá permitir que o transdutor eletromagnético seja apertado ao varão que transmite as vibrações mecânicas tal como referenciado no subcapítulo 2.2.

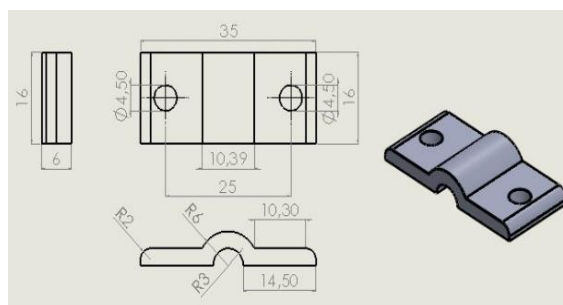


Figura 33 - Planificação e modelo 3D da peça de apoio do transdutor eletromagnético ao varão.

Outro melhoramento feito com relevância que se faz referência está representado na figura 34, temos um corte de perfil do transdutor eletromagnético, onde é possível observar o íman (representado a cor mais escura) e a sua posição em relação a bobina.

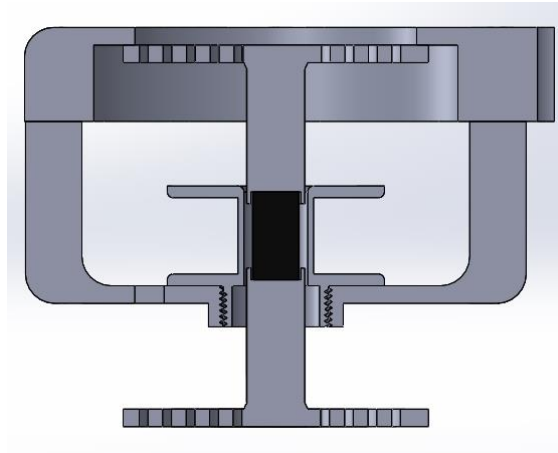


Figura 34 - Corte de perfil do transdutor eletromagnético, com a representação da posição do íman em relação à bobina.

A figura 35 ilustra todos os componentes constituintes do transdutor eletromagnético e a sua montagem final.

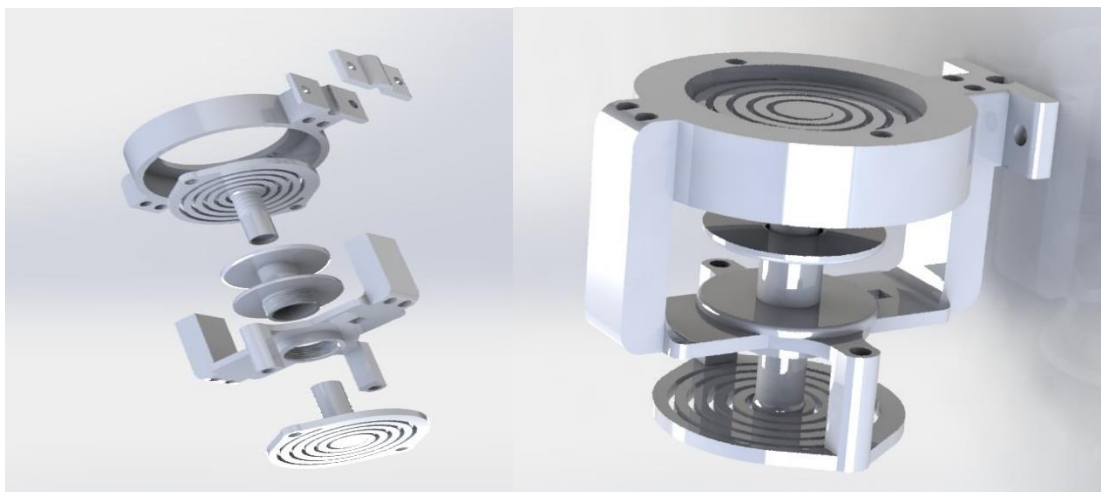


Figura 35 - Transdutor Eletromagnético N°2.

2.2. Configuração da instalação experimental

Para uma análise do desempenho do transdutor eletromagnético, recorreremos a uma entrada sinusoidal produzida por um gerador de sinais. O sinal é monitorizado por um osciloscópio e amplificado por um amplificador de potência. A saída é aplicada a uma coluna de som (*subwoofer*) que aciona um varão produzindo as vibrações.

O utilizador define uma frequência de vibração e uma amplitude do movimento. Através dessa vibração será possível realizar a análise do desempenho do transdutor eletromagnético.

Para se poder ligar o transdutor eletromagnético à coluna de som, foi feita uma nova peça no *Solidworks* e imprimida em 3D. Esta peça (a preto) é colada à membrana da coluna de som como representado na figura 36.



Figura 36 - Peça de ligação entre a coluna de som e o varão.

Foi também feita uma rosca no varão que por sua vez irá enroscar na peça previamente colada à coluna de som através de uma porca embutida na peça. Ao varão será aparafusado o transdutor eletromagnético como mostrado na figura 37. Assim, cada vez que houver excitação da coluna de som, irá provocar uma vibração na(s) mola(s) planar(es).

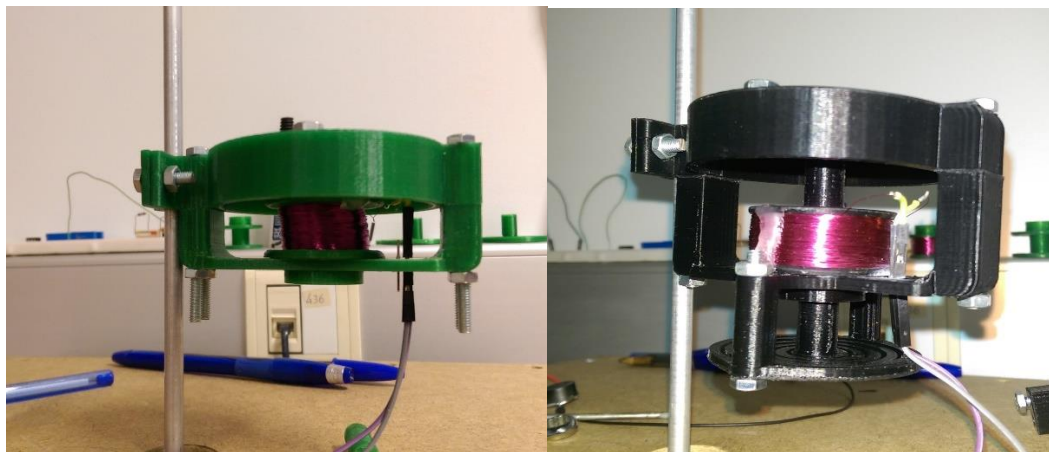


Figura 37 - Transdutores eletromagnéticos N°1 (esquerda) e N°2 (direita), aparafusados ao varão.

Na figura 38, temos o esquema do sistema de testes montado, que inclui o gerador de sinais, o osciloscópio, o amplificador de sinal e coluna de som que se encontra dentro de uma caixa fechada em madeira, varão e o transdutor eletromagnético.

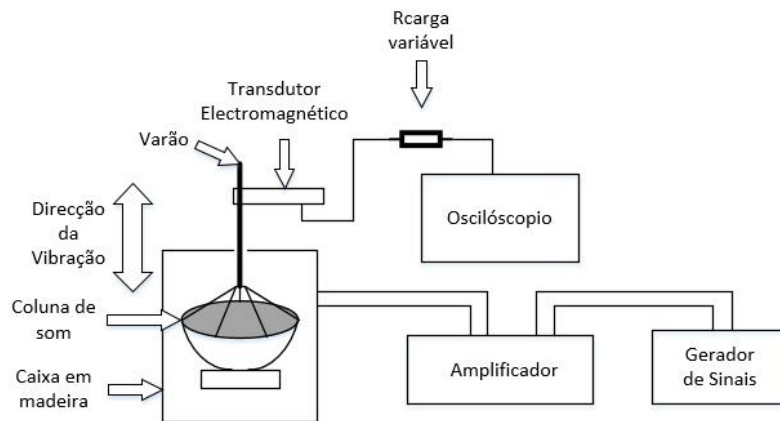


Figura 38 - Esquema do procedimento experimental.

2.3. Obtenção da resposta em frequência

Para uma avaliação mais profunda dos transdutores eletromagnéticos, foram realizados vários ensaios em ambos os transdutores eletromagnéticos permitindo assim uma análise do seu desempenho individualmente. Como descrito no capítulo 2.2, para a análise dos transdutores eletromagnéticos iremos ter um osciloscópio, que nos permitirá observar as formas de onda da tensão e da corrente. Um amplificador ligado à coluna de som, e um gerador de sinais, onde se define uma frequência e amplitude para cada ensaio que se vai realizar originando uma aceleração na coluna de som.

Os dois parâmetros que são definidos pelo utilizador e válidos para ambos os transdutores eletromagnéticos são, a frequência de excitação à entrada do transdutor e a resistência de carga à saída do transdutor.

2.3.1. Transdutor Eletromagnético N°1

Numa primeira fase, foram feitos 5 ensaios para diferentes frequências de excitação em circuito aberto, foi possível assim descobrir qual é a frequência de ressonância do transdutor eletromagnético em circuito aberto.

Tabela 6 - Tabela frequência-tensão em circuito aberto do transdutor eletromagnético N°1.

Frequência de excitação (Hz)	Tensão de saída (V)
17	0.071
25	0.293
27.5	0.345
<u>31</u>	<u>0.450</u>
35	0.270

Analisando a tabela 6, e nos 5 ensaios realizados, vemos que a tensão máxima atingida foi de 0.450 V, as outras tensões são sempre inferiores. Concluímos assim, que a frequência de 31 Hz é a frequência de ressonância do transdutor eletromagnético N°1.

Numa segunda fase da experiência, vamos usar as mesmas frequências apresentadas na tabela 6, contudo ao circuito vamos adicionar uma carga resistiva variável, permitindo assim obter os valores da tensão, corrente, resistência e potência. Em cada frequência, e ao variar a resistência vamos encontrar a carga ótima e a potência máxima.

Tabela 7 - Tabela relação entre a frequência, tensão, corrente, resistência e potência.

Frequência de excitação (Hz)	Tensão (V)	Corrente (μA)	Resistência (Ohms)	Potência (mW)
17	0.055	7	7929	0,000477
25	0.091	30.5	2984	0,00277
27.5	0.151	59.4	2542	0,00896
<u>31</u>	<u>0.177</u>	<u>80.5</u>	<u>2205</u>	<u>0,0143</u>
35	0.112	44.1	2542	0,00494

2.3.2. Transdutor Eletromagnético N°2

No que diz respeito ao transdutor eletromagnético N°2, o procedimento geral foi o mesmo aplicado ao transdutor N°1, apenas diferindo nos parâmetros da frequência e da resistência variável. Novamente, foram feitos 6 ensaios para 6 frequências diferentes em circuito aberto, descobrindo assim qual é a frequência de ressonância do transdutor eletromagnético N°2 em circuito aberto.

Tabela 8 - Tabela frequência-tensão em circuito aberto do transdutor eletromagnético N°2.

Frequência de excitação (Hz)	Tensão de saída (V)
17	6.5
19	12.8
20	13.3
<u>21</u>	<u>14.0</u>
23	5.5
25	4.0

Avaliando a tabela 8, a tensão máxima atingida foi de 14V a 21 Hz, todos os restantes valores de tensão são inferiores. Assim conclui-se que a frequência de ressonância do transdutor N°2 é de 21 Hz em circuito aberto.

Na segunda fase, foram novamente utilizados os valores de frequência da tabela 8, usando uma carga resistiva variável, que nos permite obter os valores de tensão, corrente, resistência e potência. Ao variar a resistência vamos encontrar a carga ótima e a potência máxima para cada frequência.

Tabela 9 - Tabela relação entre a frequência, tensão, corrente, resistência e potência.

Frequência de excitação (Hz)	Tensão (V)	Corrente (μ A)	Resistência (Ohms)	Potência (mW)
17	2.7	399.7	6980.2	1.115
<u>19</u>	<u>6.4</u>	<u>7740</u>	<u>826.8</u>	<u>49.536</u>
20	5.8	8215	706.0	47.647
21	4.8	6882	697.4	33.033
23	3.2	486.7	6574.8	1.557
25	2.2	341.2	6447.8	0.750

2.4. Determinação da resistência da carga ótima

Como referido no subcapítulo 2.3, ao variarmos a resistência vamos encontrar a sua carga ótima e a potência máxima para as diferentes frequências testadas.

Na figura 39, e na figura 40, temos representados os gráficos Corrente vs Tensão vs Potência vs Resistência, dos transdutores eletromagnéticos N°1 e N°2, onde é possível visualizar a carga ótima e a potência máxima, para as diversas frequências testadas.

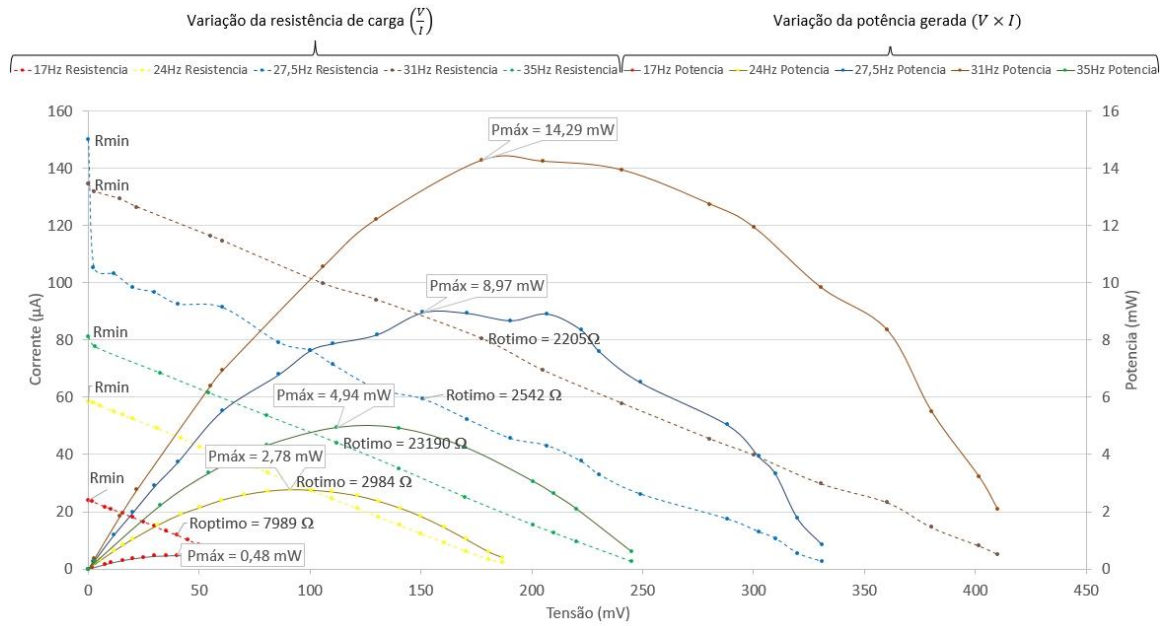


Figura 39 - Evolução da potência gerada em função do aumento da resistência de carga, para as frequências de excitação de 17, 24, 27.5, 31 e 35 Hz para o transdutor eletromagnético N°1.

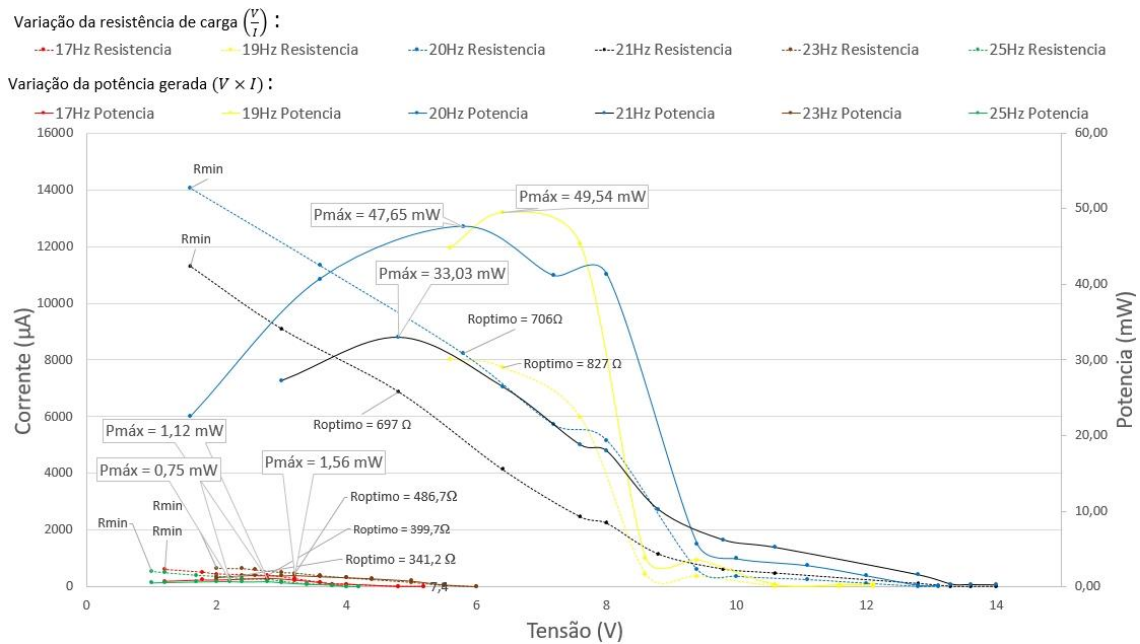


Figura 40 - Evolução da potência gerada em função do aumento da resistência de carga, para as frequências de excitação de 17, 19, 20, 21, 23 e 25 Hz para o transdutor eletromagnético N°2.

Na tabela 10 é mostrada e comparada a resistência ótima, e potência máxima dos transdutores eletromagnéticos N°1 e N°2 à frequência de ressonância.

Tabela 10 - Comparação de ambos os transdutores N°1 e N°2 entre a tensão, corrente, resistência ótima e potência máxima na frequência de ressonância.

Frequência de excitação (Hz)	Tensão (V)	Corrente (μA)	Resistência Ótima (Ohms)	Potência Máxima (mW)
Transdutor Eletromagnético N°1				
31	0.177	80.5	2205	0,014
Transdutor Eletromagnético N°2				
19	6.4	7740	826.8	49.536

3. Conversão e regulação da energia

3.1. Esquema funcional da eletrónica de regulação

Neste capítulo, o objetivo é a produção de um circuito eletrónico de regulação, para ser aplicado ao transdutor eletromagnético, que seja capaz de transformar a energia produzida pelo transdutor, em energia útil de modo eficiente, para que possa ser aproveitada por um dispositivo electrónico de baixo consumo, por exemplo numa RSSF. Na figura 41, temos um esquema geral do funcionamento de regulação de energia para um transdutor eletromagnético.

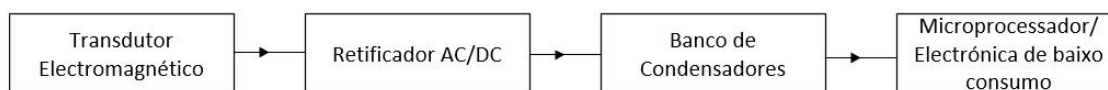


Figura 41 - Esquema geral de regulação e armazenamento de energia do transdutor eletromagnético.

Como descrito anteriormente o sinal proveniente do transdutor eletromagnético, possui uma forma alternada, e recorre-se a um retificador para que possa converter o sinal de AC para DC. A utilização de um banco de condensadores permite armazenar essa energia já previamente convertida e deixando-a sempre pronta a ser utilizada para a alimentação de um microprocessador ou eletrónica de baixo consumo.

Para a realização de testes, e até chegarmos ao esquema funcional final vamos recorrer ao *Energy Harvesting Multi-Source Demo Board with Transducers DC2080A* descrito no subcapítulo 3.1.1.

3.1.1. Introdução ao *kit Energy Harvesting Multi-Source Demo Board with Transducers DC2080A*

O kit DC2080A referente a este subcapítulo, é disponibilizado pela empresa *Linear Technology*, o kit de desenvolvimento é destinado a projetos em que envolvam EH, suporta vários tipos de transdutores, nomeadamente o eletromagnético, piezoelétrico, solar, fontes térmicas ou qualquer fonte de alta impedância em AC ou DC, como representado na figura 42

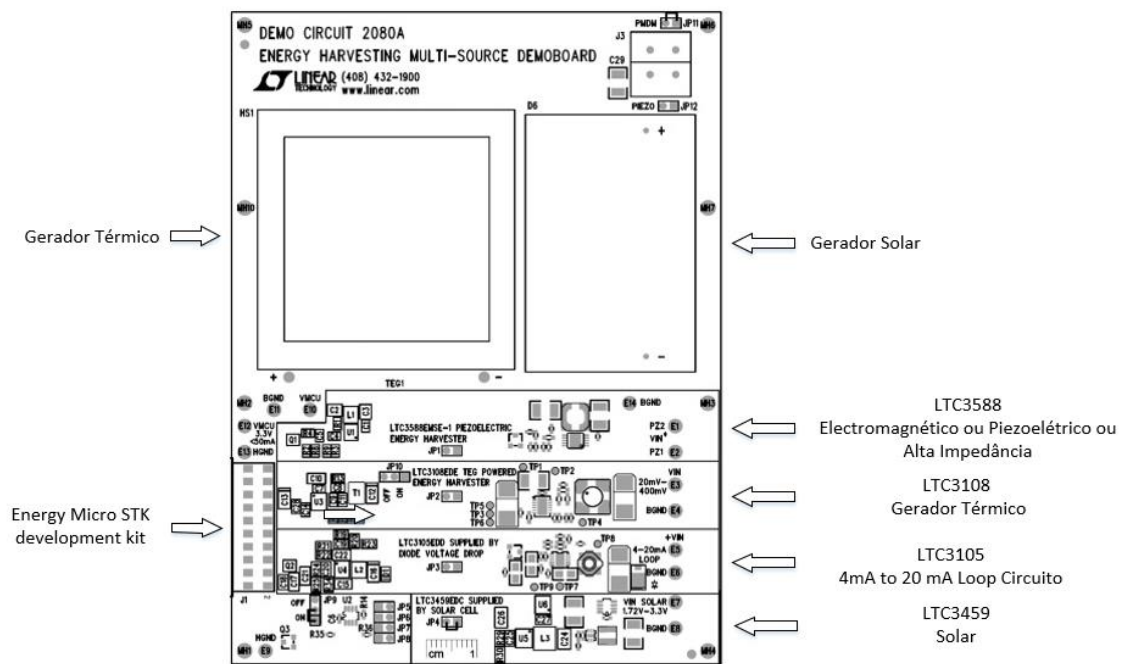


Figura 42 - Placa de desenvolvimento DC2080A.

A placa possui 4 circuitos independentes, é possível escolher o método de EH que pretendemos analisar.

- LTC3588-1: Geradores eletromagnéticos, geradores piezoelétricos ou fontes de alta impedância;
- LTC31808: Geradores térmicos;
- LTC3105: Queda de tensão no diodo, 4-20 mA *loop*;
- LTC3459: Gerador solar.

O kit de desenvolvimento foi construído para permitir ligar e alimentar um *kit Energy Micro STK*. Possui já dois geradores EH instalados no kit: um gerador solar e outro gerador termoelétrico (TEG). A placa contém vários *jumpers*, que permite facilitar a configuração da placa para funcionamento de um determinado gerador que se pretenda estudar.

3.1.2. Estudo do circuito LTC 3588-1

O circuito LTC3588-1 é usado principalmente em ambientes de recolha de energia através da vibração, neste caso particular em transdutores eletromagnéticos, como os que se desenvolvem e estudam neste trabalho, e irá ser utilizado na construção da eletrónica de regulação. Contudo, existem outras aplicações onde se utiliza o LTC3588-1, como o caso de transdutores piezoelétricos, sensores wireless temperatura, humidade para ventilação e ar condicionado (HVAC), sensores de pressão dos pneus, substituição de baterias para sensores industriais, interruptores de luz remota, entre outros.

Na figura 43 é feita a representação do diagrama de blocos do LTC3588-1. Aqui é possível visualizar os blocos internos do circuito e as suas saídas.

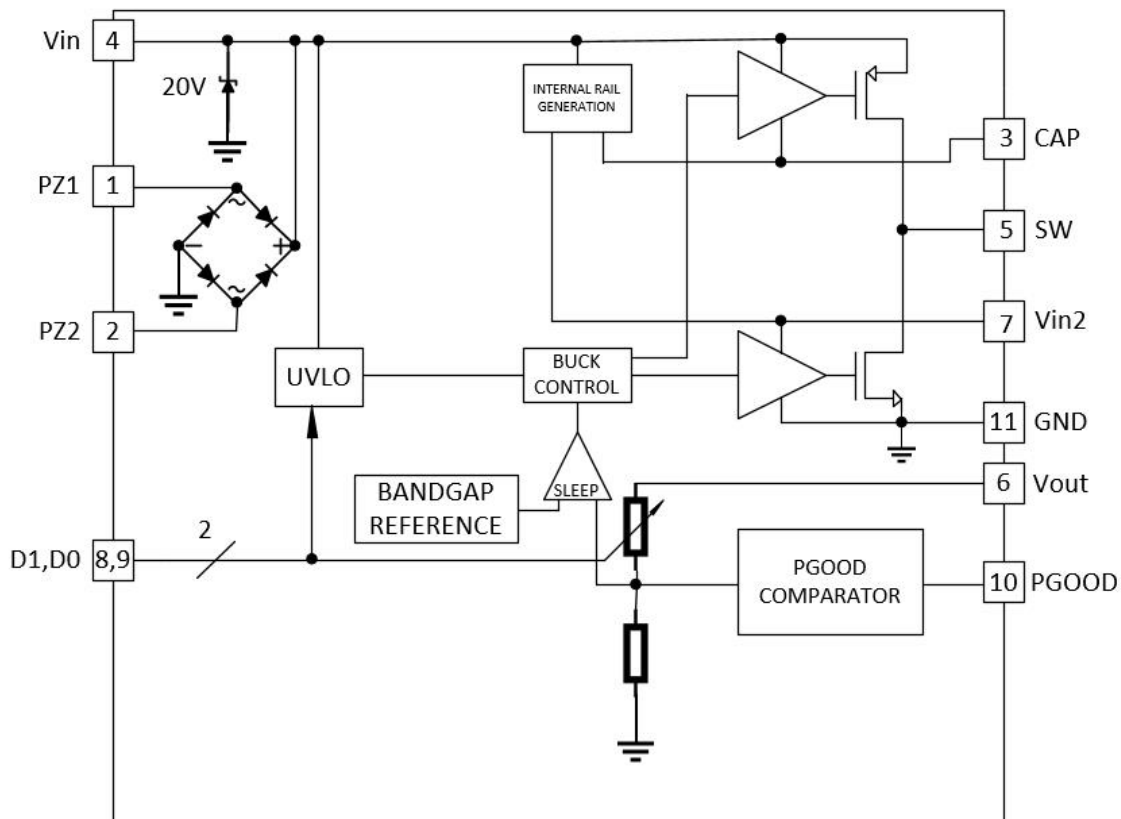


Figura 43 - Diagrama de blocos do circuito integrado LTC3588-1.

Antes de se poder explicar o seu funcionamento devemos realçar a função individual de cada um dos pins.

- **PZ1 (Pin 1)** - é a entrada onde se liga o transdutor eletromagnético ou uma fonte AC;
- **PZ2 (Pin 2)** - é a segunda entrada onde se conecta o transdutor eletromagnético ou uma fonte AC;
- **CAP (Pin 3)** - *internal rail* de referencia do V_{in} funciona como *gate* para conduzir para *buck PMOS Switch*;
- V_{in} (Pin 4) - tensão de entrada retificada, com valor máximo de 20V;
- **SW (Pin 5)** - *pin* interruptor para *buck Switching Regulator*;
- V_{out} (Pin 6) - *sense pin*, é usado para monitorar a tensão de saída e ajustar através do *feedback* interno;
- V_{IN2} (Pin 7) - *Internal low voltage rail*, funciona como *gate* que vai conduzir para o *buck NMOS*, também serve como logica alta para as tensões de saída dos bits D0 e D1;
- **D1 (Pin 8)** - Tensão de saída do bit selecionado, se pretender mos ter D1 selecionado com valor alto ligar a V_{IN2} ou valor baixo ligar GND;

- **D0 (Pin 9)** - Tensão de saída do bit selecionado, se pretender mos o D0 selecionado com valor alto ligar a V_{IN2} ou valor baixo ligar GND;
- **PGOOD (Pin 10)** - *Power good output*, tem logica alta assim que o V_{OUT} está a cima de 92% do valor alvo(definido);
- **GND (Pin 11)** - Terra.

O LTC3588-1 possui internamente uma ponte retificadora de onda completa onde o transdutor irá ligar, os pins PZ1 e PZ2. A entrada em tensão alternada proveniente do transdutor começa por ser retificada. A saída retificada é armazenada no condensador no pin V_{in} e pode ser usada como energia de reserva para o *buck converter*. Quando a tensão em V_{in} aumenta a cima do valor *Undervoltage lockout (UVLO)*, o *buck converter* encontra-se habilitado e a energia é transferida do condensador de entrada para o condensador de saída. O *buck converter* recorre a um controlador de histerese para poder controlar a tensão de saída através do *feedback* do V_{out} *sense pin*. O *buck converter* carrega um condensador de saída através de uma bobina para um valor ligeiramente superior, subindo a corrente no indutor até 260 mA através do interruptor PMOS, e depois baixa até 0 mA através do interruptor NMOS. O *Power Good Comparator* (PGOOD) informa o microprocessador da capacidade de produção do circuito de regulação de energia. A saída, PGOOD fica no estado alto sempre que o V_{out} seja igual ou superior a 92% da tensão regulada desejada. Os pins de entrada D0/D1 são comutados na regulação, se o V_{out} é programado para uma determinada tensão e o PGOOD começa a cair abaixo do valor do antigo valor de V_{out} o PGOOD vai transitar para um valor logico baixo, até uma nova regulação seja alcançada novamente. Para concluir, no sistema de armazenamento de energia, este pode recorrer aos condensadores de entrada ou os condensadores de saída, o excesso de energia é armazenado no condensador de entrada e como consequência a sua tensão aumenta. Quando uma carga é aplicada na saída, o *buck converter* pode transferir energia eficientemente em alta tensão para a saída regulada. Quando o armazenamento de energia na entrada é em alta tensão, a corrente de carga é limitada para que o *buck converter* possa fornecer energia.

3.2. Projecto e construção do regulador

Como já foi descrito no capítulo 3.1, o projecto e a construção do regulador tem como base o *kit de Energy Harvesting DC2080A* e segue o modo e a configuração para o transdutor piezoelétrico, contudo é aplicado o transdutor eletromagnético descrito no subcapítulo 2.1. O circuito foi organizado por 4 grupos, a entrada do transdutor, os reguladores (LTCs), o armazenamento, nomeadamente o banco de condensadores e a saída para a aplicação do microprocessador EFM32ZG222F32 como representado na figura 44.



Figura 44 - Esquema geral da eletrônica de regulação.

A figura 45, faz referência ao esquemático de regulação que foi implementado e onde é possível identificar 4 grupos associados.

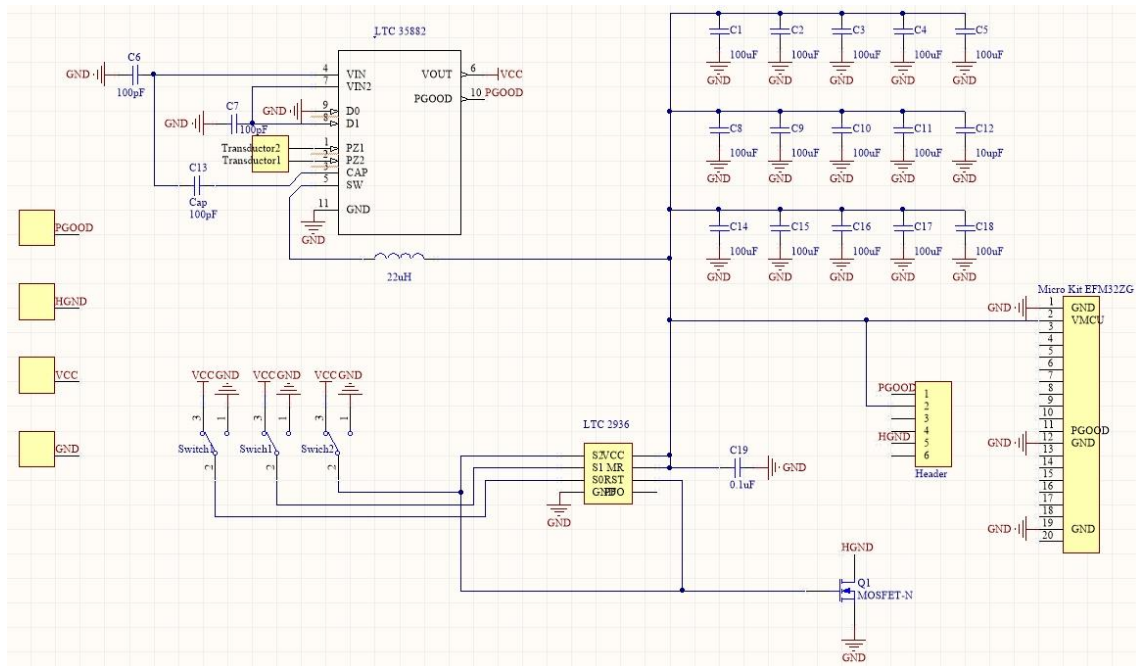


Figura 45 - Esquemático da placa de circuito impresso da eletrônica de regulação.

4. Aplicação experimental

4.1. Infraestruturas da água

A água atualmente é considerada um bem vital de elevada importância para todos os seres vivos. Desempenha um papel fundamental na sociedade e é considerada um bem escasso do planeta. Trata-se por isso de uma temática de extrema importância e que merece a consideração de todos os nós. Sem a água não existiria vida no planeta.

A gestão da água é definida como uma atividade que procede de um planeamento, desenvolvimento, e é distribuído e gerenciado para se tirar o melhor partido dos recursos hídricos, e implica um impacto em diversas áreas, como na vida humana, na produção, consumo de água, tratamento da água e tratamento de esgotos, irrigação, purificação e até mesmo em produção de energia. O sector da água opera de forma complexa entre recursos de água, e socioeconómicos e meios ambientais. A procura é enorme, desde o público, privado, empresas globais e locais.

Cerca de 70% da superfície terrestre é coberta de água, desde mares, rios e oceanos que possui cerca de 97% da água que se encontra na terra. Existe menos de 3% do volume dessa água que é considerada de água doce. Cerca de 77%, é sob a forma de gelo que se encontra no polo norte ou no polo sul. O restante, é água que se encontra subterrânea, e estima-se que apenas 0.6% da água que se encontra à superfície terrestre seja água em condições para as necessidades do ser humano (em 2017, segundo um estudo realizado pela ONU a população global é de 7.6 mil milhões de habitantes).

As primeiras comunidades humanas preferiam zonas onde a água era abundante, zonas como rios, lagos ou zonas ecótonos onde existia muita biodiversidade. Contudo, o consumo de água sem o devido tratamento acarreta inúmeras doenças que podem levar à morte do ser humano. Antigamente e na altura das primeiras comunidades o controlo da qualidade da água era feito de forma empírica onde se observava apenas a sua aparência. Em 1855 John Snow fez uma investigação epidemiológica em que concluiu que existia uma relação entre a água que era consumida e que estava contaminada com o surto de cólera que afetava nessa altura Londres. Em 1863 Louis Paster fez uma descoberta da existência de microrganismos na água e Robert Cock contribuiu para os avanços nos métodos de deteção de da presença de microrganismos, estes contribuíram significativamente para o estudo e associação do consumo de água para a saúde do ser humano. Porém, é no século XX que, após vários surtos epidémicos como a cólera e febre tifoide, se começou a ter mais cuidados no que diz respeito ao tratamento da água assim com a sua distribuição.

Pareceu por isso a necessidade de se criar infraestruturas para o abastecimento, tratamento e distribuição de água, como representado na figura 46.

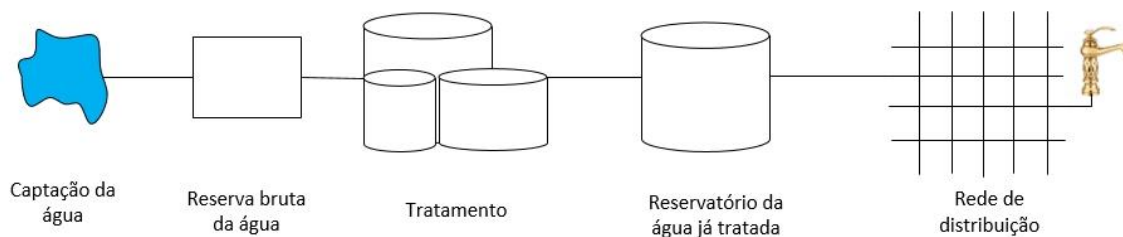


Figura 46 - Representação esquemática de um sistema de abastecimento de água para consumo humano.

Para cada infraestrutura da figura 46 está envolvida uma entidade gestora como referido em baixo. Os sistemas de tratamento de água e distribuição para o consumo humano e a sua implementação está sempre dependente de vários fatores, como a qualidade da água, volume, caudal, até mesmo onde se deseja que chegue ao consumidor final.

Em questões de reservatórios da água e volumes, existem 3 tipos, os reservatórios pequenos com volumes inferiores a $500m^3$, reservatórios médios com volumes que variam entre os $500m^3$ e os $5000m^3$, e os grandes reservatórios com volumes de água superior a $5000m^3$. Após a água estar armazenada nos reservatórios existem 3 saídas possíveis, pelo fundo, pela saída da turbina ou pelo topo, quando ocorrem eventos extremos ou através da evaporação. Existem vários tipos de quotas de nível de água, nomeadamente:

- nível operacional mínimo, é o nível mínimo necessário para o funcionamento adequado do reservatório;
- volume morto, é um volume de água presente no reservatório que está inativo ou indisponível, está abaixo do nível operacional mínimo;
- nível operacional máximo, este é o nível máximo permitido para operação correta sem perda de água;
- volume operacional, é a variação de volume disponível para a operação do reservatório, isto é, quando as demandas de água são atendidas. A solução proposta nesta dissertação será implementada para esta situação.

Em Portugal continental o abastecimento de água para o consumo humano tem origem em 3 variantes distintas, aquíferos (14%), albufeiras (66%) e rios (20%).

As entidades gestoras dos serviços para o abastecimento de água para o consumo humano, que são as entidades que destinam os seus serviços a captação, armazenamento, tratamento, elevação, adubação e distribuição de águas, quer superfícies quer subterrâneas para fins domésticos ou industriais para meio rural ou urbano são:

- Camaras municipais;

- Empresas municipais ou intermunicipais;
- Concessões municipais e intermunicipais;
- Concessões multimunicipais (Águas de Portugal (AdP)).

Devido à enorme complexidade que acarreta todo o processo dos recursos hídricos torna-se relevante e fundamental tornar o sistema mais autónomo, capaz de aumentar a sua eficiência, reduzindo perdas de água e custos.

Uma solução passa por recorrer à *Internet of Things* (IoT). Este conceito permite a possibilidade de integrar qualquer sistema, seja ele um sensor, um dispositivo, etc., com identidade própria, e se comunicar automaticamente entre eles ou com um computador fazendo uso de protocolos de comunicação padrão. Os benefícios introduzidos pela IoT consiste em melhorar a vida útil dos equipamentos, reduções de energia que influencia diretamente a autonomia, reduções de perdas de água, etc. Permite também uma interação geral de um processo, descobrir mais facilmente os seus erros ou falhas, sejam eles de natureza humana ou não. No que diz respeito à tomadas de decisões, e como se tem acesso a dados em tempo real é possível também tomar decisões mais acertadamente.

4.2. Automação em reservatórios de água

Existe um desperdício enorme de água, principalmente porque as pessoas não estão cientes disso, mas também por motivos técnicos, como infraestruturas obsoletas ou inadequada, falta de manutenção, deficiências ou problemas no sistema de monitorização, vazamentos na rede ou extravasamento em reservatórios, estes são os principais fatores que fazem com que a água seja desperdiçada e não chegue ao consumidor final.

Os reservatórios são grandes depósitos normalmente feitos de cimento, onde grandes quantidades de água são armazenadas, essa água pode ser usada para:

- regulação de taxas de fluxos;
- ajuste de pressões no fornecimento/distribuição;
- controle de recursos hídricos de emergência.

Existem 3 tipos de reservatórios, os enterrados, semienterrados ou elevados. A maioria das infraestruturas são elevadas, e possuem boias eletromecânicas para a ativação e controle do nível de água em que é muito comum ocorrer extravasamento devido ao mau funcionamento/falta de precisão das boias que controlam os níveis. Na figura 47, mostra um reservatório com perdas de água por extravasamento.

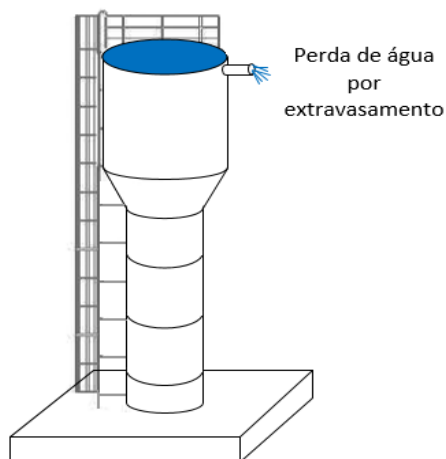


Figura 47 - Reservatório de água com perdas por extravasamento.

Já existe algum trabalho referente ao processo de medição dos níveis de água nos reservatórios e a sua instrumentação utilizada, como mostra a tabela 11.

No cerne da questão, quando a instrumentação é aplicada, o gestor não possui os dados de informações dos níveis dos reservatórios em tempo real, sempre depende de terceiros, isto origina perdas de água por extravasamento.

Tabela 11 - Instrumentação para medição de nível

Tipos de instrumentação
Boia
Ultra Sônico
Capacitivo
Eletromecânico

4.3. Ilustração do caso de aplicação

Para ilustrar um possível exemplo de aplicação sobre o tema desta dissertação temos na figura 48 um exemplo de um tratamento genérico para uma captação superficial de água numa albufeira.

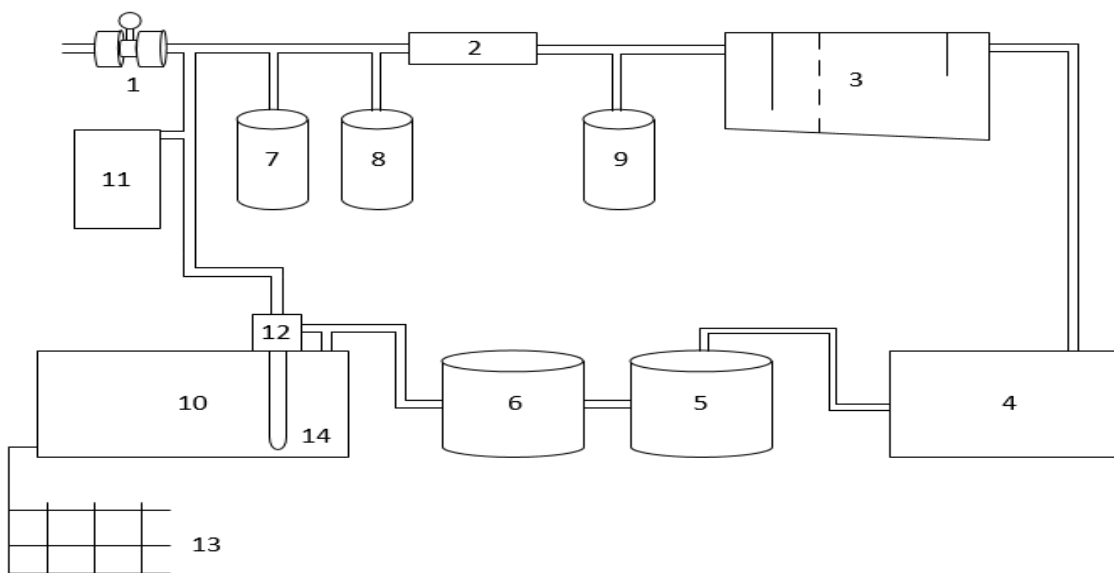


Figura 48 - Esquema de aplicação para um sistema *Energy Harvesting* e um sensor de nível para tratamento a partir de uma origem de água superficial de uma albufeira.

Legenda:

1. Caudalímetro eletromagnético (medição do caudal de entrada);
2. Misturador estático (Fase de mistura);
3. Decantador (sedimentação, no fundo do reservatório);
4. Cisterna de água decantada;
5. Filtro de areia;
6. Filtro de carvão ativo;
7. Posto de dosagem de carbonato de sódio denso (Correção de valores de pH);
8. Posto de dosagem de coagulante (Coagulação);
9. Posto de dosagem de floculante (Floculação);
10. Cisterna de água tratada (onde vai ser aplicado o sensor de nível de nível de água);
11. Gerador de dióxido de cloro;
12. Sistema *Energy Harvesting*;
13. Rede para abastecimento e distribuição de água já tratada;
14. Sensor de nível de água.

O processo do tratamento e distribuição da água começa nas tubagens do caudalímetro eletromagnético e acaba na rede de distribuição de água tratada, todo este processo é complexo, aqui vamos nos focar no armazenamento de água do reservatório 10 da figura 48. Observando a figura este reservatório é responsável pelo armazenamento de água já tratada, e para evitar perdas de água e haver um controlo preciso é necessário saber o nível de água que se encontra dentro do reservatório. É nesse reservatório que vai ser instalado o sensor de nível capacitivo (14) descrito no subcapítulo 4.4. Em termos energéticos, o sistema *Energy Harvesting* (12) irá ser acoplado na tubagem que se encontrar mais perto do reservatório, onde com a passagem de água sob pressão vai ser induzida uma vibração que irá ser convertida pelo transdutor eletromagnético, este por sua vez irá alimentar todo o restante sistema, desde a eletrónica de conversão até ao sensor capacitivo.

4.4. MCU e Sensor de nível capacitivo

O microprocessador utilizado é o EFM32ZG222F32 da Silicon Labs, (*Zero Grecko Series*) tem como principais características:

- 32-bit ARM Cortex-M0+ processador até 24Mhz;
- 32Kb flash e 4kb de memória RAM;
- Periféricos energeticamente eficientes e autónomos;
- Modos de energia ultrabaixa;
- Tempo de acordar rápido, apenas 2 μ s.

O seu baixo consumo energético:

- 48 μ A; 3 V - *Sleep Mode*;
- 114 μ A; 3 V - *Run Mode*.

O microprocessador é programado recorrendo ao software Simplicity Studio também disponibilizado pela Silicon Labs e recorre á linguagem de programação C/C++ para a implementação do código onde irá medir e processar as medições do sensor capacitivo.

A figura 49, representa o diagrama de sequência de código desenvolvido para efetuar as medições do sensor.

Na figura 50 está representado o fluxograma do código que foi implementado em C/C++, para o microprocessador efetuar a medição do nível de água contida no reservatório.

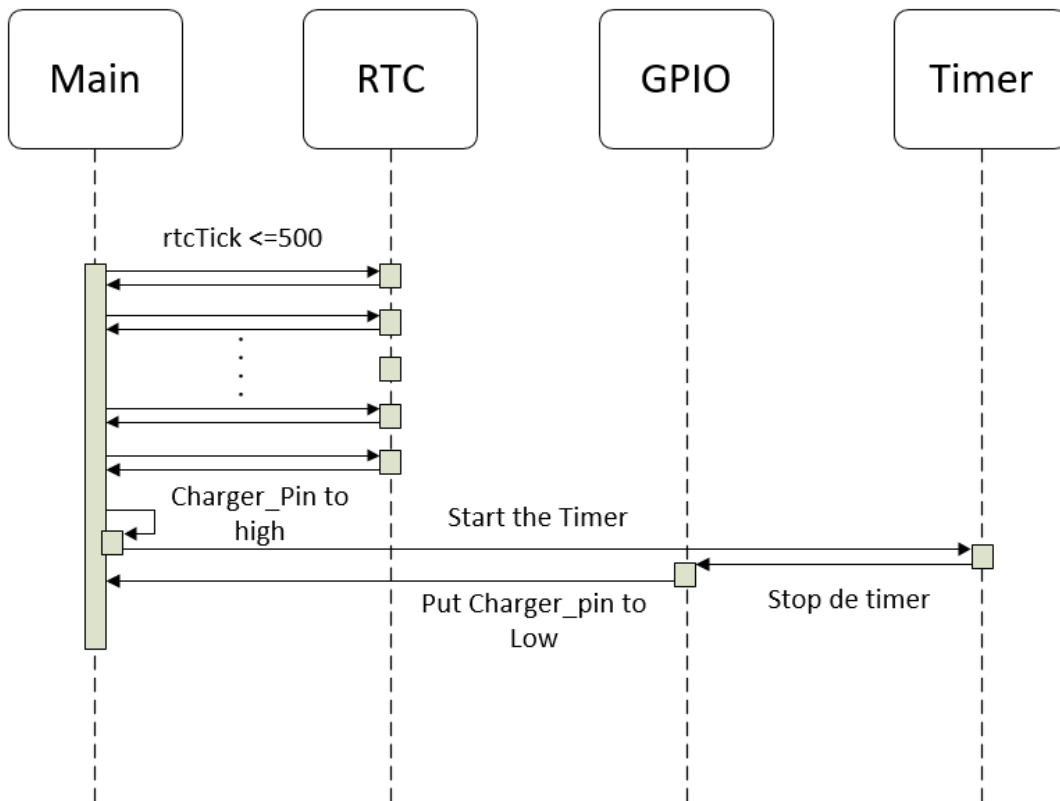


Figura 49 - Diagrama de seqüência do código implementado.

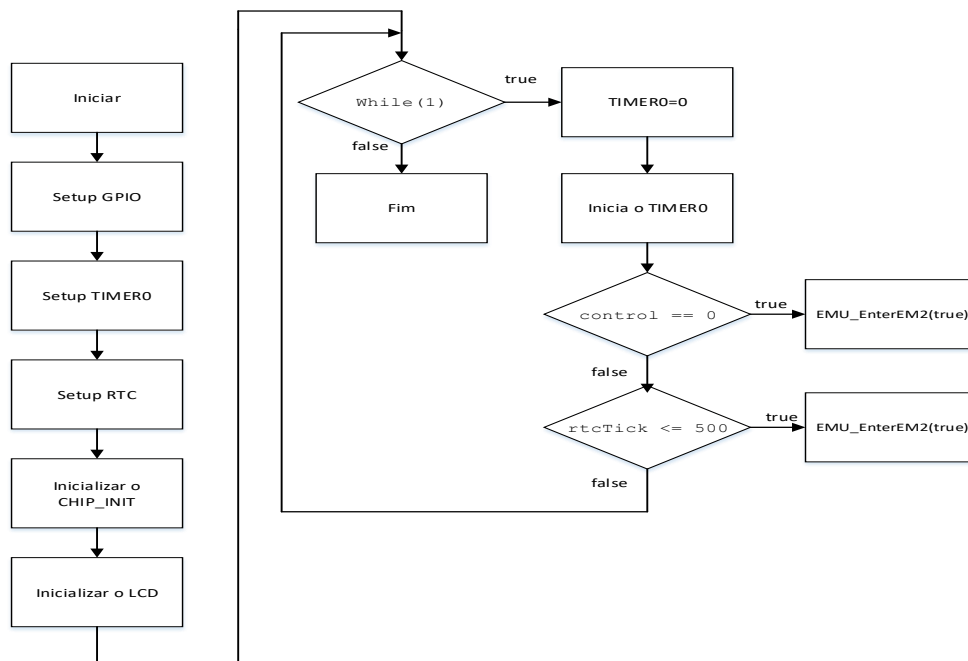


Figura 50 - Fluxograma do programa implementado para a medição do nível de água.

Primeiramente é iniciado todo o *setup* das configurações da placa, desde as bibliotecas utilizadas, definição dos pins e das variáveis.

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "em_device.h"
#include "em_adc.h"
#include "em_chip.h"
#include "em_cmu.h"
#include "em_emu.h"
#include "em_gpio.h"
#include "em_rtc.h"
#include "display.h"
#include "retargettextdisplay.h"
#include "bspconfig.h"

//***** PINS *****/
#define INT_PORT gpioPortD // PORTD
#define INT_PIN 4 // PD4
#define CHARGER_PORT gpioPortA // PORTA
#define CHARGER_PIN 0 // PA0

//*****//
static volatile uint32_t rtcTick;
static void GpioSetup(void);
int temp;
int control;
```

A *main function* é a função principal onde todo o código irá estar sempre a correr infinitamente até que ocorra alguma ordem contrária. Aqui podemos encontrar a inicialização do *chip*, a inicialização do *display*, a inicialização do *GPIO* e a activação das interrupções.

```
/* Chip errata */
CHIP_Init();

/* Initialize the display module. */
DISPLAY_Init();

/* Retarget stdio to the display. */
RETARGET_TextDisplayInit();

/* Initialize GPIO */
GpioSetup();

/* Enable interrupt */
NVIC_EnableIRQ(RTC_IRQn);
RTC_IntEnable(RTC_IEN_COMP0);
```

A função *while(1)* é um *loop*. Toda a vez que essa condição seja testada e for verdadeira ela vai iniciar esse *loop*. Se a variável *control* for igual a 0, o *real time clock* igual a 0, o *pin* vai passar do estado baixo para o estado alto, vai configurar o *timer* e de seguida vai iniciar a contagem do carregamento do condensador.

```
control = 0;
GPIO_PinOutSet(CHARGER_PORT, CHARGER_PIN); // PIN state HIGH
```

```
TIMER0->CNT = 0; // set timer to zero
TIMER0->CMD = 0x1; // start the TIMER0
rtcTick = 0;
```

Quando a condição *control* for igual a 0, isto é, seja verdadeira vai entrar no modo de energia EM2, caso seja falsa volta para a função *while(1)*.

```
while (control == 0)
{
    EMU_EnterEM2(true); //Enter in EM2
}
```

Para concluir, quando a condição *rtcTick* for menor ou igual que 500, vai entrar no modo de energia EM2, caso seja falsa volta novamente para a função *while(1)*.

```
while (rtcTick <= 500) //Time between measurements
{
    EMU_EnterEM2(true); //Enter in EM2
}
```

O sensor capacitivo tem como principio de funcionamento um condensador cilíndrico, é fácil de implementar e tem uma grande sensibilidade. O material dielétrico varia por influencia do meio, nesta situação, ou é pela água, ou pelo ar, conforme o nível de água que está dentro do reservatório. Analiticamente, a capacidade de um condensador cilíndrico é dada pela seguinte expressão:

$$C = \frac{2\pi k \epsilon_r \epsilon_0 l}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad 20$$

Onde:

- a - Raio interior;
- b - Raio exterior;
- ϵ_r - Constante dielétrica do meio (ar ou a água);
- ϵ_0 - Constante dielétrica do vazio (aproximadamente igual à unidade);
- l - Comprimento.

A constante dielétrica do ar (ϵ_{ar}) é aproximadamente igual à unidade. A constante dielétrica da água ($\epsilon_{\text{água}}$) varia com a temperatura. Baixa com o aumento da temperatura (80@ para 20°C).

A construção do protótipo do sensor capacitivo teve como base o principio anterior descrito. Foram usados dois tubos de alumínio (aumentam a durabilidade do sensor), um oco outro maciço. O tubo maciço foi isolado recorrendo a uma manga termo-retratil e foi inserido um dentro do outro. Na figura 51, temos um corte de perfil do sensor capacitivo.

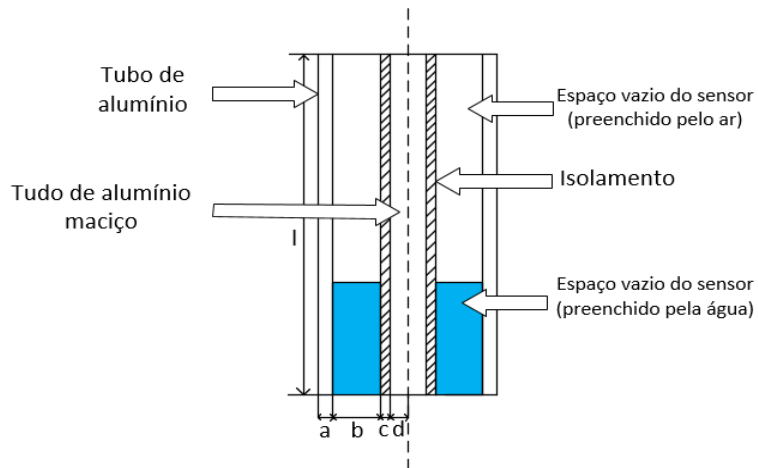


Figura 51 - Corte de perfil do sensor capacitivo

As dimensões físicas estão descritas na tabela 12.

Tabela 12 - Dimensões físicas do sensor capacitivo

l (mm)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)
30	1	1.375	0.625	2

Na figura 52, temos o protótipo do sensor capacitivo.



Figura 52 - Protótipo do sensor capacitivo

A figura 53, representa o esquema de ligação entre o sensor capacitivo e o microprocessador. O *Input* está ligado ao pin PD4 e o *Output* está ligado ao pin PA0.

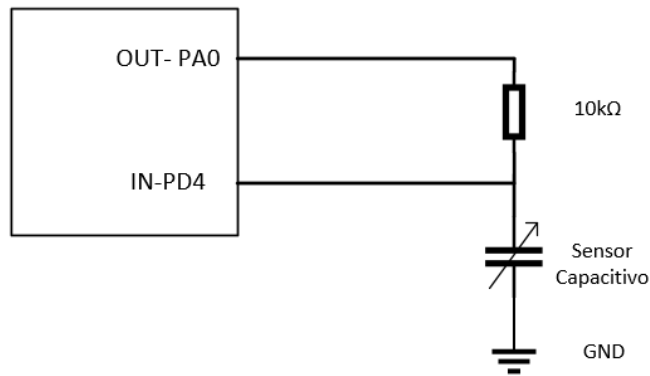


Figura 53 - Esquema de ligação entre o sensor capacitivo e o microprocessador.

O microprocessador vai efetuar uma leitura do sensor, e como o sensor se comporta como um condensador vamos medir o tempo de carregamento do condensador e achar uma relação entre esse tempo, e a altura do nível da água contida no reservatório. Como representado na figura 54, podemos observar um típico gráfico de carregamento de um condensador, o tempo de subida representa o carregamento do condensador e é esse tempo de subida que vai ser medido pelo microprocessador.

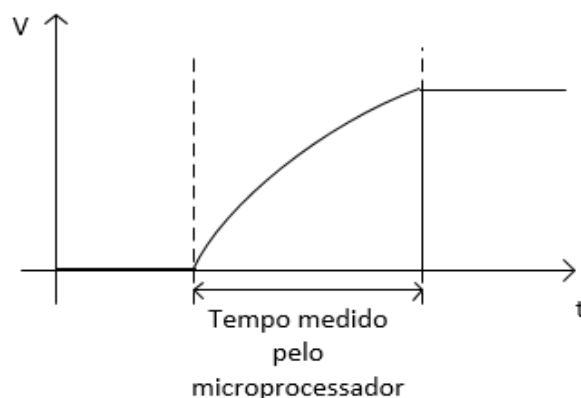


Figura 54 - Representação gráfica do carregamento de um condensador.

Conforme o tempo de contagem varia ou para maior ou para menor, dependendo da quantidade de água que se encontra presente no reservatório, iremos obter a relação do nível de água.

Na tabela 13, temos um exemplo prático da relação entre o tempo medido e a altura do nível de água do reservatório.

Tabela 13 - Tabela relação entre o tempo de medição vs. a percentagem do nível de água.

Tempo de carregamento do sensor [μs]	Porcentagem do nível de água [%]
10.167	0
11.489	10
12.398	20
13.143	30
14.125	40
15.021	50
15.917	60
16.813	70
17.708	80
18.604	90
19.500	100

Na figura 55 apresenta o gráfico da relação entre o tempo e a altura do nível de água, onde se pode verificar a sua linearidade.

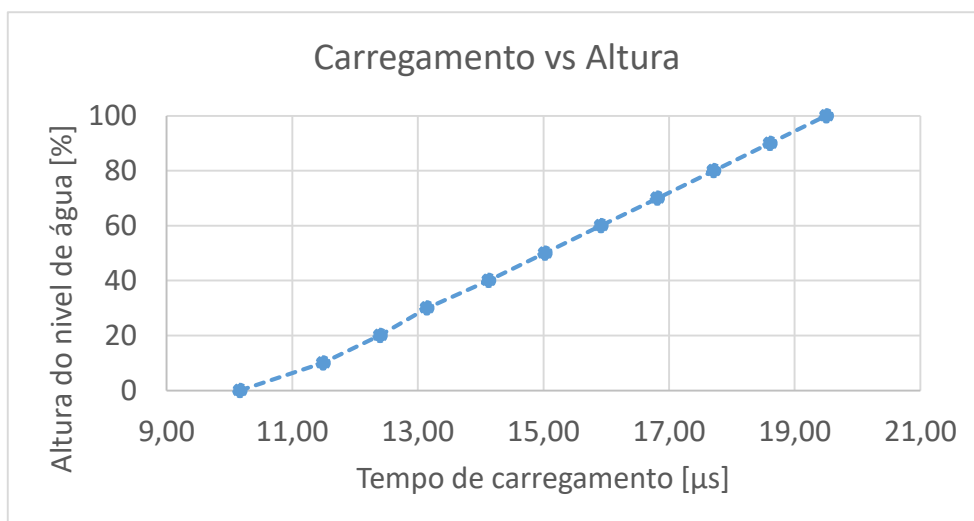


Figura 55 - Gráfico da relação entre o tempo de carregamento com a altura do nível de água.

4.5. Instalação conjunta do transdutor com a eletrônica de regulação, MCU e sensor capacitivo e avaliação do desempenho

A figura 56 representa o fluxograma da instalação conjunta do transdutor eletromagnético, eletrônica de regulação, microprocessador e sensor capacitivo.

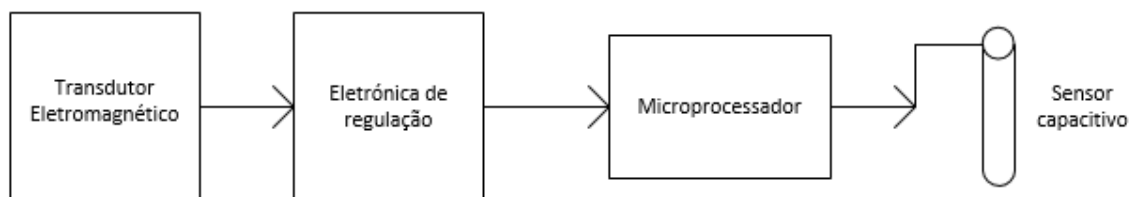


Figura 56 - Fluxograma da instalação conjunta do sistema.

Na figura 57 temos o *Energy Profiler* do código descrito no subcapítulo 4.4 onde se pode visualizar o seu consumo energetico. A linha a cor branca representa a corrente onde os picos do gráfico representam o estado do microprocessador quando acordado e a efectuar uma medição do nível da água, de seguida volta a adormecer e fica adormecido por 7 segundo até a uma nova medição. Aumentado o tempo entre medições ainda é possível melhorar o seu consumo energético. A linha a cor de laranja representa a tensão, e a linha a cor amarela representa a média do consumo

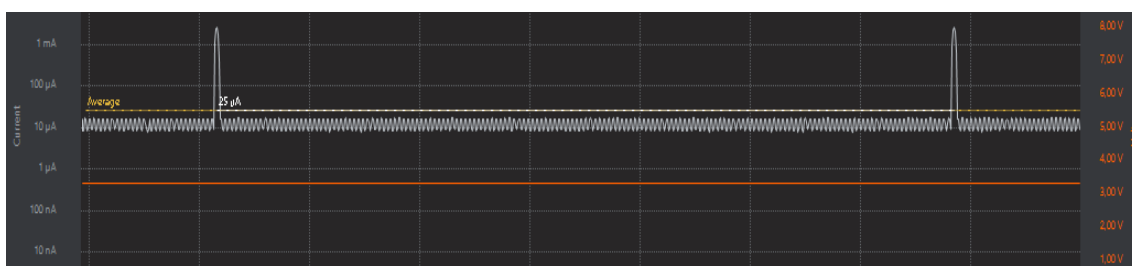


Figura 57 - Gráfico do *Energy Profiler* do código implementado com os modo de energia M2.

A função “*printf*” é a função que consome mais energia do código, e está activa para se poder visualizar o valor da contagem no LCD do microcontrolador. Se a desativarmos iremos ainda ter um menor consumo energético.

Na tabela 14 temos os parâmetros da tensão vs média da corrente vs média da potência.

Tabela 14 - Parâmetros da tensão vs média da corrente vs média da potência.

Tensão (V)	Média da corrente (µA)	Media da Potência (µW)
3.31V	26.07	86.17

O tempo entre medições torna-se fundamental em questões de consumo do microprocessador. Para o mesmo código e retirando o tempo entre as medições, isto é, o microprocessador fica constantemente a efectuar medições umas a seguir as outras, podemos visualizar na figura 58 que o seu consumo aumenta drasticamente, para valores de corrente média de 2.41 mA e com uma potência média de 7.90 mW.



Figura 58 - Gráfico do consumo energético sem o tempo entre as contagem de medição.

Convém realçar a enorme importância da utilização dos modos de energia na programação do microprocessador. Na figura 59 temos o exemplo de um código onde não foi utilizado qualquer modo de energia, e o seu consumo é praticamente constante com média de corrente de 2 mA e com uma potência média de 6.54 mW.

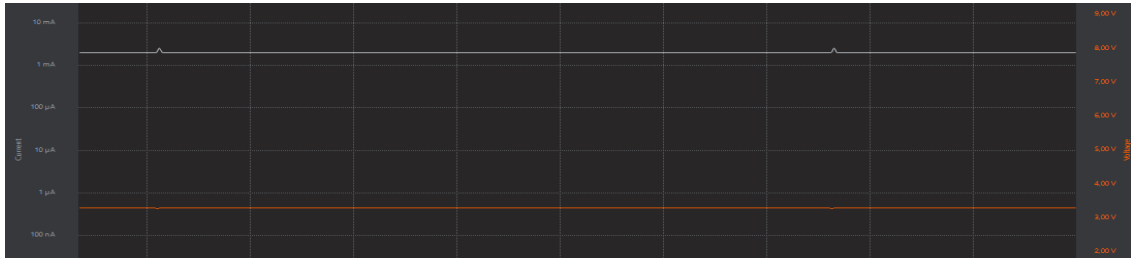


Figura 59 - Gráfico do consumo energético sem a adição dos modos de energia.

Para concluir, na figura 60, temos o código implementado, apenas diferenciamos o modo de energia a ser otimizado, assim para o *Energy Mode 1* temos uma corrente média de 1.09 mA e uma potência média de 3.57 mW.

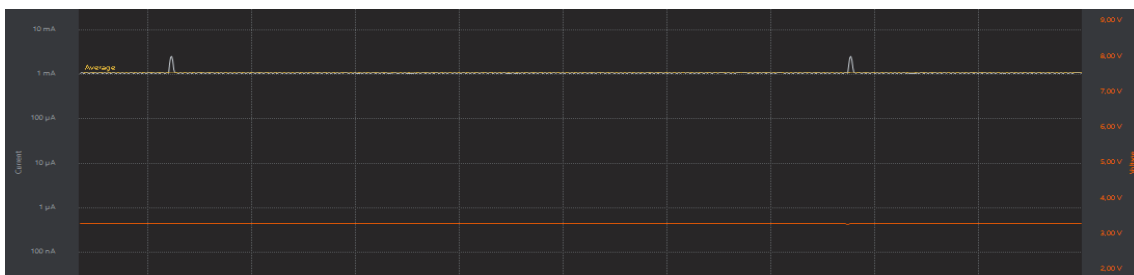


Figura 60 - Gráfico do consumo energético para o *Energy Mode 1*.

Para a mesma situação anterior, mas utilizando o modo *Energy Mode 3*, temos uma corrente média de 26.88 µA e uma potência média de 88.87 µW. Como demonstrado na figura 61.

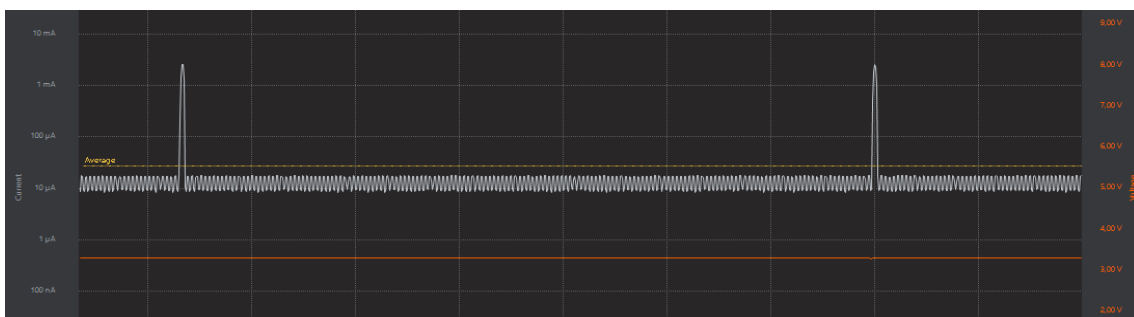


Figura 61 - Gráfico do consumo energético para o *Energy Mode 3*.

5. Conclusão

5.1. Identificação dos resultados principais

Em conclusão, e ao longo desta dissertação foi abordado o tema *Vibration Energy Harvesting*. Foram criados dois transdutores eletromagnéticos, o PCB da eletrónica de regulação, a programação do microprocessador para ser aplicado ao sensor de nível capacitivo que será responsável pela medição do nível de água presente nos reservatórios evitando assim perdas por extravasamento.

Foram implementados dois transdutores eletromagnéticos com características diferentes como descrito no capítulo 2.1 e realizada a sua validação individual. O transdutor eletromagnético N°1 obteve no seu melhor desempenho a 31 Hz, a sua frequência de ressonância. Os valores estão ilustrados na tabela 15.

Tabela 15 - Desempenho do transdutor eletromagnético N°1.

Transdutor Eletromagnético N°1	0.177 V	80.5 μA	2205 Ω	0,014 mW
---	---------	--------------	---------------	----------

No transdutor eletromagnético N°2, a sua frequência de ressonância é de 19 Hz e obteve os seguintes valores representados na tabela 16.

Tabela 16 - Desempenho do transdutor eletromagnético N°2.

Transdutor Eletromagnético N°2	6.4 V	7740 μA	826.8 Ω	49.536 mW
---	-------	--------------	----------------	-----------

Em respeito ao microprocessador é importante salientar a escolha do microprocessador, e a verificação dos seus consumos e modos de energia, existem muitos microprocessadores que eventualmente satisfação a necessidade de se efectuar medições do nível de água, contudo acabam por ter altos consumos energéticos, o que os torna uma solução invalida para serem aplicados em sistemas VEH.

Ainda a respeito do microprocessador utilizado nesta dissertação, e como conclusão convém realçar que é de extrema importância uma programação energeticamente eficiente do microprocessador, só assim é possível que ocorra um rigoroso controlo da energia evitando o desperdício energético. Esta comparação encontra-se exemplificada no subcapítulo 4.6. Nesta situação prática e otimizando o código para o *Energy Mode 2*, obtivemos o melhor resultado

dos 3 modos de energia usados, com uma corrente média de $26.07 \mu A$ e uma potência média de $86.17 \mu W$.

Para o sensor capacitivo referenciado no subcapítulo 4.4, onde é possível visualizar na tabela nº13 e na figura 53, a sua linearidade e a relação entre o tempo de carregamento do sensor com o nível de água presente no reservatório. O seu tempo mínimo de carregamento é de $10.167 \mu s$, e o nível de água presente no reservatório é equivalente a 0% (totalmente vazio). Por sua vez, para um tempo máximo de carregamento $19.500 \mu s$ temos o nível de água no reservatório de 100% (completamente cheio).

Em conclusão e para o transdutor nº1 este não iria satisfazer as necessidades energéticas perante a situação específica do microprocessador e do sensor capacitivo. A energia produzida pelo transdutor nº1 é inferior à energia que o microprocessador necessita. Já em relação ao transdutor nº2, a energia que o transdutor produz em função à energia que o microprocessador mais o sensor capacitivo consome torna o sistema energeticamente eficiente.

Também se permite concluir que para pequenas aplicações, nomeadamente e a título de exemplo, na vertente do IoT os VEH é uma solução a aplicar.

5.2. Evolução e trabalhos futuros

A evolução que mais se recomenda diz respeito ao transdutor eletromagnético. Como já foi referido as molas planares tem uma determinada frequência de ressonância, esta frequência de ressonância pode ser calculada passando por uma modelação matemática, de maneira a que se possa produzir uma mola em que sua frequência de ressonância seja a dominante no ambiente de aplicação.

Uma outra sugestão, para o sistema de recolha de energia seria a produção e implementação de um sistema não ressonante, aplicando ajustamentos mecânicos e ajustamentos elétricos de maneira que se pudesse aplicar em situações onde não existe linearidade de frequência.

Nesta dissertação todo o sistema foi aplicado para uma determinada função, nomeadamente efetuar medições autónomas do nível de água para um reservatório, contudo e para um trabalho futuro seria interessante aplicar o mesmo método de recolha de energia, mas por exemplo em maquinarias ou outras infraestruturas das redes de água aplicando outro tipo de sensores, fazendo uma relação entre a energia produzida com a energia consumida por esses sensores. Por exemplo no controlo de pressões, caudal, potencial hidrogeniónico (Ph) temperatura etc, automatizando assim o procedimento de gestão do recurso da água.

Referências Bibliográficas

- [1] A. Harb, "Energy harvesting: State-of-the-art," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2641-2654, 2011.
- [2] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, "A Study of Low Level Vibrations As a Power Source for Wireless Sensor Nodes," *Comput. Commun.*, vol. 26, no. 11, pp. 1131-1144, 2003.
- [3] Y. Wang, Q. Zhang, L. Zhao, and E. S. Kim, "Non-Resonant Electromagnetic Broad-Band Vibration-Energy Harvester Based on Self-Assembled Ferrofluid Liquid Bearing," *J. Microelectromechanical Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 809-819, 2017.
- [4] B. Yang and C. Lee, "Non-resonant electromagnetic wideband energy harvesting mechanism for low frequency vibrations," *Microsyst. Technol.*, vol. 16, no. 6, pp. 961-966, 2010.
- [5] T. J. K. S. B. Editors, *Energy Harvesting Systems*. 2011.
- [6] T. Galchev, H. Kim, and K. Najafi, "A Parametric Frequency Increased Power Generator for Scavenging Low Frequency Ambient Vibrations," *Procedia Chem.*, vol. 1, no. 1, pp. 1439-1442, 2009.
- [7] A. Khaligh, P. Zeng, and C. Zheng, "Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies #x2014;State of the Art," *Ind. Electron. IEEE Trans.*, vol. 57, no. 3, pp. 850-860, 2010.
- [8] S. Boisseau, G. Despesse, and B. Ahmed, "Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting," *Small-Scale Energy Harvest.*, pp. 1-39, 2012.
- [9] R. Panat, J. Wang, and E. Parks, "Effects of triboelectrostatic charging between polymer surfaces in manufacturing and test of integrated circuit packages," *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, vol. 4, no. 5, pp. 943-946, 2014.
- [10] A. F. Diaz and R. M. Felix-Navarro, "A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: The influence of chemical structure and properties," *J. Electrostat.*, vol. 62, no. 4, pp. 277-290, 2004.
- [11] A. L. Berry, "The Application of a Triboelectric Energy Harvester in the Packaged Product Vibration Environment," 2016.

- [12] C. B. Williams and R. B. Yates, "Small Scale Actuators Analysis of a micro-electric generator for microsystems," *Science* (80-), vol. 52, pp. 8-11, 1996.
- [13] D. R. Tobergte and S. Curtis, "Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion," *Clim. Chang. 2013 - Phys. Sci. Basis*, vol. 53, no. 9, pp. 1-30, 2010.
- [14] D. Spreemann and Y. Manoli, *Electromagnetic Vibration Energy Harvesting Devices*. 2012.
- [15] D. J. I. Priya, Shashank, *Energy Harvesting Technologies*. 2008.
- [16] K. Chebrolu, B. Raman, and N. Mishra, "Brimon: a sensor network system for railway bridge monitoring," *Proc. 6th Int. Conf. Mob. Syst. Appl. Serv.*, pp. 2-14, 2008.
- [17] J. J. Wang, G. P. Penamalli, and L. Zuo, "Electromagnetic energy harvesting from train induced railway track vibrations," *Proc. 2012 8th IEEE/ASME Int. Conf. Mechatron. Embed. Syst. Appl. MESA 2012*, vol. 11787, pp. 29-34, 2012.
- [18] Z. Li, L. Zuo, G. Luhrs, L. Lin, and Y. X. Qin, "Electromagnetic energy-harvesting shock absorbers: Design, modeling, and road tests," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 62, no. 3, pp. 1065-1074, 2013.
- [19] L. Zuo, B. Scully, J. Shestani, and Y. Zhou, "Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions," *Smart Mater. Struct.*, vol. 19, no. 4, p. 045003, 2010.
- [20] V. R. Challa, M. G. Prasad, and F. T. Fisher, "Towards an autonomous self-tuning vibration energy harvesting device for wireless sensor network applications," *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, no. 2, p. 025004, 2011.
- [21] S. P. Beeby *et al.*, "A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting," *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 17, no. 7, pp. 1257-1265, 2007.
- [22] P. Emanuel, "Energy Harvest : Recolha de Energia em Vibrações," p. 90, 2015.
- [23] P. S. Errede, "American Wire Gauge (AWG) & Metric Gauge Wire Sizes AWG Wire Sizes (see table below) 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.

