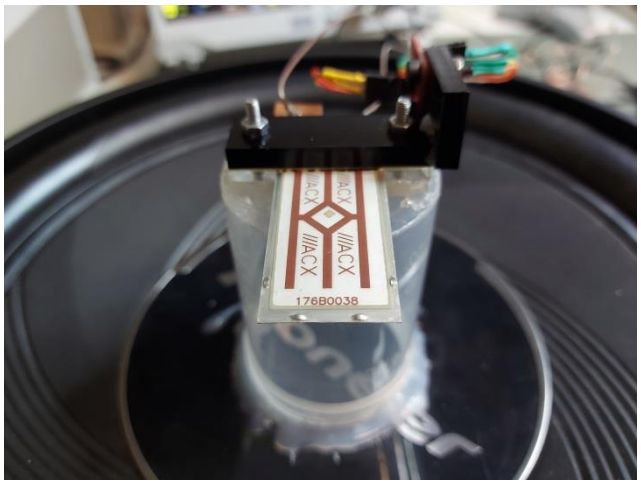


Integração de dispositivos piezoelétricos de colheita de energia num *skateboard*

Rúben Miguel Alves Pedroso
Mestrado em Física
Departamento de Físca e Astronomia
2020/2021

Orientador
André Miguel Trindade Pereira, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Coorientador
David Seixas Esteves, Investigador, CeNTI

U.PORTO

FACULDADE DE CIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DO PORTO

Todas as correções determinadas pelo júri, e só essas, foram efetuadas.

O Presidente do Júri,

Porto, _____/_____/_____

Agradecimentos

Antes de começarmos a explorar o tema desta tese de mestrado, queria agradecer a todas as pessoas que me ajudaram a compo-la durante este último ano.

Em primeiro lugar, gostava de expressar a minha maior gratidão ao Professor Doutor André Pereira. A sua atenção, acompanhamento e experiência foram essenciais para me auxiliar na procura de uma oferta de estágio e para a realização do mesmo. O Professor acompanhou o meu percurso académico desde o primeiro ano letivo e sempre foi um bom orientador e conselheiro em assuntos académicos e de preparação para a vida pós-graduação.

Em segundo lugar, agradeço ao meu co-orientador David Esteves. Um exemplar investigador da equipa de *Smart Materials* do CeNTI e que sempre dedicou parte do seu tempo e disponibilidade para me auxiliar na realização do estágio. Tendo sido o David, quem me ajudou mais a integrar no ambiente profissional da empresa. Seria impossível a realização deste estágio sem as suas intuições, orientações e experiências relacionadas com o tema da Piezoeletricidade.

Adicionalmente, gostava de mostrar a minha gratidão à Doutora Joana Fonseca e ao resto da equipa do CeNTI. A Doutora Joana também esteve presente durante todo o processo do estágio e foi uma grande fonte de suporte nos processo de requisição de materiais para a realização do trabalho e uma ótima orientadora nas situações mais difíceis.

Por fim, nunca poderia esquecer o suporte e presença que tive de família e amigos. Estou grato aos meus pais por me conseguirem fornecer forças e energia para continuar todos os dias a enfrentar os obstáculos e a conquistar os meus sonhos. Agradeço aos meus amigos por me ajudarem a ter momentos de descontração e de alegria que serviram para quebrar a rotina diária.

Resumo

Na nossa atualidade, o desenvolvimento de sistemas tecnológicos inteligentes em escalas reduzidas é uma das grandes razões para o interesse cientifico na descoberta de novas formas de colheita energética. Uma vez que a necessidade energética destes sistemas torna-se relativamente reduzida, estes podem se tornar auto suficientes através da integração de dispositivos coletores que realizam a conversão de energias de fontes diversas em energia elétrica. O efeito piezoelétrico é algo característico de muitas cerâmicas e de certos polímeros, e este é responsável pela conversão de energia mecânica em energia elétrica. O PZT-5H é uma cerâmica que está presente em grande parte dos dispositivos piezoelétricos do mercado. Este material numa configuração cantiléver tem a capacidade de gerar tensões elétricas a partir de vibrações mecânicas transversais geradas na sua base e por isso apresenta grande potencial como coletor de energias mecânicas.

Este estágio teve como objetivo estudar a possibilidade de integração de coletores piezoelétricos num *skateboard*. Tendo sido realizada a simulação numérica do funcionamento de cantiléveres comerciais de PZT-5H, a confirmação dos resultados obtidos numa montagem experimental de caracterização e por fim a integração destes num *skateboard*.

Inicialmente foram realizadas simulações numéricas em *COMSOL Multiphysics*, um *software* de análise de elementos finitos, com o intuito de demonstrar o comportamento de cantiléveres piezoelétricos numa configuração de coletor de energia. Obteve-se as frequências de ressonância para os dispositivos, todas inferiores a 200 Hz e com potências elétricas máximas no intervalo de ordens das centésimas até às unidades de miliwatt (mW). O caso de maior potência gerada foi 2.21 mW para o dispositivo PPA-1001 com uma massa de prova de 3g e uma frequência de ressonância de 52.2Hz.

Para a realização da caracterização dos dispositivos comerciais, foi desenvolvido uma montagem recorrendo a uma coluna *subwoofer*, na qual era permitido controlar as frequências das oscilações geradas e as acelerações das vibrações através de um acelerómetro programado em Arduino IDE. Os resultados obtidos indicavam potências elétricas geradas pelos dispositivos 6 vezes superiores aos obtidos em simulação. Com o caso de maior po-

tência de 5.39 mW para o PPA-1001 com massa de prova de 2.23g e uma frequência de ressonância 53.5Hz.

Por último, construiu-se como prova de conceito, um demonstrador em acrílico que foi fixa ao *skateboard* e integraram-se três cantiléveres no sistema. Foi estudada a tensão de saída dos mesmos enquanto o skateboard se deslocava numa superfície de alcatrão inclinado. As tensões saída dos coletores eram bastante inferiores às obtidas na simulação e no trabalho experimental para acelerações entre 1g e 2g. Tendo-se concluído que a energia produzida pelo sistema seria muito inferior ao previsto, pelo que uma possível solução para esse problema passaria por uma alteração das estruturas dos coletores de modo a podermos realizar a colheita de outras formas de energia mecânica.

Abstract

Nowadays, the development of smart technological systems in reduced scales is one of the most important reasons for the scientific interest in the discovery of new ways of energy harvesting. Since the energy consumption of these systems is relatively low, they can become self-sufficient with the integration of harvesters that can convert energy from different sources into electrical energy. The piezoelectric effect is a characteristic of most ceramics and some polymers, and it is responsible for the transduction of mechanical energy to electrical energy. PZT-5H is a ceramic that has a piezoelectric nature and it is part of most piezoelectric devices in the market. If inserted in a cantilever configuration it has the capacity to generate electrical voltages from transversal mechanical vibrations and that's why it has a great potential as a mechanical energy harvester.

This internship had the integration of piezoelectric harvesters in a skateboard as its main objective. For that reason it was simulated the functioning of commercial PZT-5H cantilevers, then the confirmation of those results with an experimental setup and in the end the integration of those devices on the skateboard.

Initially numerical simulations were performed in COMSOL Multiphysics, a finite element analysis software, with the aim to demonstrate the behavior of piezoelectric cantilevers in an energy harvester configuration. It was calculated the resonant frequencies of the devices, and they were all bellow 200Hz. The output electrical powers of the devices were in the orders of hundredths to ones of milliwatts (mW). The best case was the generation of 2.21mW by the PPA-1001 with a tip mass of 3g and a resonance frequency of 52.2 Hz.

For the characterization of the commercial devices, it was developed a setup using a subwoofer, where we could control the frequency of the generated oscillations and the accelerations of the vibrations with an accelerometer programmed using Arduino IDE. The experimental results indicate the generation of power 6 times superior to the simulation results for all the devices. The best case was a generated power of 5.39 mW by the PPA-1001 with a tip mass of 2.23g and a resonance frequency of 53.5Hz.

Finally, it was built an acrylic structure to mount three devices and it was affixed to

the skateboard. It was measured the output voltage of the harvesters while the skateboard was moving on a tilted tar surface. The measured output voltages of the harvesters were inferior compared to the ones obtained in the simulation and in the experimental work for accelerations in the interval of 1g to 2g. For this reason, we concluded that the generated energy by this system was inferior to what we foreseen, consequently arriving to the idea that the possible solution for this problem would be to change the harvesters' structure so that we could harvest other types of mechanical energy.

Palavras-chave

Recolha de energia; captura de energia; materiais inteligentes; piezoeletricidade; cantiléver; cantiléver unimorfo; PZT; vibrações mecânicas; oscilações; ressonância; simulação numérica

Conteúdo

1 Introdução **15**

1.1 Os materiais inteligentes 15

1.2 A captura de energia 16

1.3 O efeito piezoelétrico 17

1.3.1 A teoria da Piezoeletricidade 18

1.3.2 Os materiais piezoelétricos contemporâneos 20

1.3.3 A classificação das cerâmicas PZT 24

1.4 Sistemas de recolha de energia avançados 25

1.4.1 Modelo teórico do Coletor Cantiléver Unimorfo 26

1.5 O CeNTI e os objetivos do Estágio 30

2 Simulação numérica dos dispositivos comerciais **31**

2.1 *Software* de simulação: *COMSOL Multiphysics* 31

2.2 Geometria dos dispositivos e parâmetros usados em simulação 32

2.3 Os estudos realizados 36

2.3.1 Determinação das frequências de ressonância do cantiléver 36

2.3.2 Determinação da potência elétrica máxima e da resistência de carga ótima 36

2.3.3 A dependência da resposta com a aceleração aplicada 37

2.3.4 Estudo integrado com massa de prova 38

2.4 Síntese dos resultados 39

3 Trabalho experimental **42**

3.1 Caracterização dos dispositivos comerciais 42

3.1.1 A montagem experimental 42

3.1.2 Procedimento experimental 45

3.1.2.1 Determinação das frequências de ressonância 46

3.1.2.2 Determinação da potência máxima e resistência de carga ótima 48
3.1.2.3 Determinação da dependência com a aceleração 49
3.1.2.4 Determinação da dependência com a massa de prova 51
3.1.2.5 Estudo do amortecimento dos dispositivos 53
3.1.2.6 Deteção do efeito de amortecimento por massa nos dispositivos 55
3.1.2.7 Provas de conceito dos dispositivos 56
3.2 Desenvolvimento do sistema *skateboard-harvester* 60
3.2.1 Estrutura do sistema e procedimento utilizado 60
3.2.2 Testes e resultados 61
3.2.2.1 Caracterização do sistema *skateboard-harvester* 61
3.2.2.2 Resultados do sistema *skateboard-harvester* 64

4 Conclusões e Trabalho Futuro **69**
4.1 Conclusões 69
4.2 Trabalho Futuro 72

A Montagem do sistema ótico **76**

B Código do acelerómetro Arduino **80**

Lista de Figuras

1.1 Aplicações piezoelétricas em processos eletroquímicos.[1] 18
1.2 Esquema cronológico de acontecimentos. 19
1.3 Esquema representativo da sequência cronológica dos tipos de cerâmicas piezoelétricas descobertas.[2] 21
1.4 Estrutura do PZT [3] 22
1.5 Diagrama de fases $PbZrO_3 - PbTiO_3$[4] 22
1.6 Polarização Espontânea de cada fase [3] 23
1.7 XRD do desenvolvimento das perovskitas de PZT [5] 24
1.8 Esquemas simples de diferentes tipos de dispositivos 27
1.9 Esquema representativo em blocos do cantiléver.[6] 30

2.1 Cantiléveres Unimorfos PZT-5H da Midé. (a) PPA-1001. (b) PPA-1021. Os valores numéricos encontram-se em mm.[7] 33
2.2 Geometria usada na simulação do PPA-1001. (a) Estrutura sem massa de prova. (b) Estrutura com massa de prova. 34
2.3 Geometria usada na simulação do PPA-1021. (a) Estrutura sem massa de prova. (b) Estrutura com massa de prova. 35
2.4 Resultados da dependência da tensão e potência de saída com a frequência da força aplicada. a) A tensão de saída para o PPA-1001 e PPA-1021. b) As potências elétricas e mecânicas para o PPA-1001 e PPA-1021. 36
2.5 Resultados da dependência da tensão e potência de saída com a resistência de carga do circuito. a) A tensão de saída para o PPA-1001 e PPA-1021. b) As potências elétricas do PPA-1001 e PPA-1021. 37
2.6 Resultados da dependência da tensão e potência de saída com a aceleração aplicada ao dispositivo. a) A tensão de saída para o PPA-1001 e PPA-1021. b) As potências elétricas e mecânicas do PPA-1001 e PPA-1021. 38

2.7 A dependência da frequência de ressonância dos dispositivos com a massa de prova. 39
2.8 Variação da frequência de ressonância com a introdução de massas de prova (aceleração de 1 g). a) Comparação das frequências de ressonância para o PPA-1001. Foi introduzida uma massa de prova de 3 g. Comparação das frequências de ressonância para o PPA-1021. Foi introduzida uma massa de prova de 0.80 g. 39
2.9 Variação da potência elétrica máxima e da resistência de carga ótima com a introdução de massa de prova (aceleração de 1 g). a) Comparação da potência elétrica máxima para o PPA-1001. Foi introduzida uma massa de prova de 3 g. b) Comparação da potência elétrica máxima para o PPA-1021. Foi introduzida uma massa de prova de 0.80 g. 40
2.10 Comparação da dependência da potência elétrica com a aceleração aplicada entre os dispositivos sem massa de prova e com massa de prova. 40

3.1 Fotografia da base de fixação dos dispositivos. 43
3.2 Montagem experimental inicial. Coluna ligada ao gerador de sinal sinusoidal utilizado. Osciloscópio responsável pela medição do sinal de saída dos dispositivos. 43
3.3 a) Sistema de medição de aceleração Arduino. b) Acelerómetro utilizado. . . 45
3.4 A Montagem utilizada. 45
3.5 Resultados da calibração do gerador de vibrações. 46
3.6 Dispositivos utilizados: (a) PPA-1001 e (b) PPA-1021. 46
3.7 Resultados experimentais da determinação das ressonâncias para os diferentes dispositivos. 47
3.8 Resistências variáveis usadas no circuito. 48
3.9 Resultados experimentais da determinação das potências máximas e resistências de carga ótimas para os diferentes dispositivos. 49
3.10 Resultados da dependência da tensão RMS com a aceleração. 50
3.11 Resultados da dependência da potência máxima com a aceleração. 51
3.12 Exemplos de massas em acrílico desenhadas a laser para serem utilizadas no processo experimental. 52
3.13 Resultados experimentais da dependência da frequência de ressonância com a massa de prova para os dois dispositivos. 52

3.14 Exemplo de uma resposta do cantiléver com amortecimento, na figura temos o caso do PPA-1021. 53
3.15 Determinação dos parâmetros dos resultados experimentais do estudo do amortecimento dos dispositivos. 54
3.16 Resposta em tensão RMS com a adição de massas de prova para o dispositivo PPA-1001. 55
3.17 Resposta em tensão RMS com a adição de massas de prova para o dispositivo PPA-1021. 56
3.18 Visualização do efeito de amortecimento por adição de uma massa de 0.40g no dispositivo PPA-1021. 57
3.19 (a) Construção de um circuito retificador. (b) Esquema do circuito retificador utilizado. 57
3.20 Alimentação de uma fita LED de 5V. 58
3.21 Alimentação de uma antena Bluetooth. 58
3.22 Exemplo de um carregamento de um condensador. Carregamento com o PPA-1021. 59
3.23 (a) Circuitos montados com circuito integrado retificador, divisores de tensão e díodos Zener. (b) Esquema representativo de cada circuito. 61
3.24 (a) Fixação da estrutura em acrílico, e ligação dos dispositivos aos respetivos circuitos. O sistema *skateboard-harvester* nas figuras (b) e (c). 62
3.25 Montagem do estudo de caracterização com vibrações controladas pelo gerador de vibrações. 63
3.26 Resultados do primeiro estudo da dependência da frequência com a velocidade do *skateboard*. 64
3.27 Resultados obtidos com o acelerómetro Arduino. 65
3.28 Estudo do sistema *skateboard-harvester* com o gerador de vibrações numa frequência de 115.5Hz e aceleração de 1g. 66
3.29 Estudo do sistema *skateboard-harvester* com o gerador de vibrações numa frequência de 163.5Hz e aceleração de 1g. 67
3.30 Estudo do sistema *skateboard-harvester* com o gerador de vibrações numa frequência de 53.5Hz e aceleração de 1g 68
3.31 Resultados do estudo do sistema *skateboard-harvester* num piso inclinado de alcatrão. 68

A.1 Esquema de um interferómetro de auto-mistura. 76

A.2 Tipo de sinal esperado obter do interferómetro (b) para uma deslocação sinusoidal do alvo (a).[8] 77
A.3 Díodo laser utilizado na montagem. 78
A.4 Esquema do circuito amplificador. 79
A.5 Montagem do sistema ótico. 79

B.1 Código do terminal de medição da amplitude da aceleração detetada pelo acelerómetro. 80
B.2 Terminal utilizado para medir as acelerações do gerador de vibrações. 81
B.3 Código utilizado para a medição de acelerações e saídas de tensão dos coletores piezoelétricos fixos no *skateboard*. 82

Lista de Tabelas

1.1 Valores das propriedades elétricas e piezoelétricas das diferentes classes de cerâmicas PZT [9, 10] 25

2.1 Dimensões e materiais usados na estrutura do PPA-1001 simulado 32
2.2 Dimensões e materiais usados na estrutura do PPA-1021 simulado 33
2.3 Parâmetros mecânicos dos materiais utilizados na simulação 33
2.4 Valores teóricos obtidos nas simulações em *COMSOL Multiphysics*.*Valor obtido para uma resistência muito alta. 41

3.1 Valores das frequências de ressonância dos dispositivos. Está registada a incerteza de medição da frequência e o erro em percentagem comparado com o valor da simulação. 47
3.2 Valores das potências máximas ($P_{máx}$) e resistências de carga ótima ($R_{ótima}$) dos dispositivos. Valores do desvio da resistência de carga relativamente ao valor simulado (R_{opt}) e da razão entre potência experimental e potência obtida em simulação (P_e). 49
3.3 Resultados do ajuste linear para os gráficos da figura 3.10. 50
3.4 Resultados do ajuste não-linear para os gráficos da figura 3.11. 51
3.5 Parâmetros do ajuste não-linear dos gráficos da figura 3.13 com respetivas incertezas relativas (Δ). Comparação dos parâmetros e dados fornecidos pela ficha de informação dos dispositivos [7]. Os valores m_{ef} e k_{ef} são os valores fornecidos. 53
3.6 Parâmetros do ajuste não-linear dos gráficos da figura 3.15. 54
3.7 Comparação dos fatores de qualidade obtidos e os fornecidos pela ficha informativa [7]. Os valores de Q_f correspondem aos fornecidos. 55
3.8 Resultados obtidos do teste de carregamento de condensador. Na tabela estão os valores da carga acumulada (Q), a tensão máxima atingida (U), o tempo de carga (T) e a potência média de carregamento. 58

3.9 Amplitudes de aceleração (A) e valores de tensão média de saída dos dispositivos com as respetivas incertezas relativas (Δ). Os resultados tabelados foram obtidos dos gráficos das figuras 3.28, 3.29 e 3.30. 65

Capítulo 1

Introdução

1.1 Os materiais inteligentes

O estudo dos fenómenos físicos é usado de forma a garantir o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias para as diversas áreas da cultura humana. Transportes, habitação, comunicação, roupa, produção alimentar, ... são partes das nossas vidas que são influenciadas pelas características dos materiais presentes. Na história, a época de uma sociedade é caracterizada pelo tipo de material descoberto e que acaba por ser mais usado e trabalhado durante esse período de tempo. Assim obtemos as diferentes Idades: a Idade da Pedra, a Idade do Bronze e a Idade do Ferro.[11] A questão que se coloca é: "Qual será designado o período atual e futuro?" Para obtermos uma resposta, é necessário perceber como se caracterizam os materiais e quais os mais usados pela nossa sociedade.

A partir do século XX, foi realizado um estudo intensivo de materiais do grupo dos Materiais Avançados. Com a fabricação de tecnologias avançadas estes materiais começaram a ser necessários no nosso dia-a-dia. Estes podem ser divididos em subgrupos como o dos semicondutores, nanomateriais, biomateriais e o dos materiais inteligentes. Nos materiais inteligentes estão incluídos os tipos de compostos que reagem de forma diferente às alterações do ambiente onde estão introduzidos, produzindo respostas específicas. Alguns exemplos são as ligas com efeito de memória de forma, materiais magnetoresistivos, sistemas microeletromecânicos e os piezoelétricos (que correspondem ao tema deste trabalho, e serão discutidos mais à frente). Pensemos no caso do *smartphone*, esta tecnologia recorre a materiais avançados de diferentes tipos: temos semicondutores presentes nos circuitos integrados do aparelho, temos piezoelétricos usados como sensores nos circuitos de acelerómetro e giroscópio do sistema GPS, outros piezoelétricos são usados como atuadores que permitem a produção do som, e por último, a maioria destes exemplos apresentam escalas

nanométricas, o que os tornam nanomateriais também. Este é o resultado e o objetivo da evolução tecnológica: a produção de aparelhos constituídos pelos diferentes tipos de materiais conhecidos.

Assim, ao observar a nossa sociedade, verificamos que nos encontramos na Idade dos Materiais Avançados, e que estes irão permanecer como principal foco de estudo durante várias décadas, uma vez que apresentam uma elevada densidade de aplicações para o nosso quotidiano.

1.2 A captura de energia

Com o desenvolvimento de novos instrumentos e tecnologias inovadoras torna-se cada vez mais importante a procura de sistemas capazes de gerar energia para os alimentar. Qualquer aparelho que é usado pelo homem necessita de energia para exercer a sua função, por exemplo, uma pá, recorre à energia mecânica que o homem gasta para poder escavar; um comboio a vapor, só funciona porque usa energia térmica proveniente da combustão do carvão, que evapora a água e por consequência o vapor faz o mecanismo se mover; já um carro elétrico, gasta a energia elétrica das suas baterias para poder funcionar. Todos estas tecnologias tem algo em comum, necessitam de energia para funcionar, e à medida que o tempo passa verifica-se que quanto maior é o acesso a formas de obter energia, mais equipamentos é possível produzir e estes tornam-se mais eficientes também. Assim é absolutamente necessário conhecer diferentes formas de produção energética e saber em que sistemas estas podem ser aplicadas.

Desta ideia nasceu a expressão inglesa “Energy Harvesting”, que pode ser traduzida como “Colheita de Energia” ou “Captura de Energia”, ao contrário da produção energética clássica em que o interesse é criar um tipo de gerador ou conjuntos de geradores capazes de produzir energia suficiente para colocar uma rede de aparelhos a funcionar ou apenas um sistema complexo; a colheita de energia passa por criar um sistema capaz de alimentar um aparelho isolado, normalmente as energias envolvidas são reduzidas e o principal objetivo é tornar o dispositivo auto-suficiente, ou apenas mais eficiente.

Existem várias fontes energéticas que podem ser usadas para coletar energia útil para o nosso sistema. No nosso quotidiano já temos a colheita de energias térmicas que é o caso de materiais termoelétricos que geram energia elétrica a partir de gradientes de temperatura, a colheita de energia solar realizada por painéis fotovoltaicos, a colheita de energia por fricção/contacto para o caso dos materiais triboelétricos e a colheita de energia mecânica com sistemas piezoelétricos. Neste trabalho iremos focar no tema do último exemplo,

isto é, a colheita da energia cinética de perturbações mecânicas que existem num meio e conversão da mesma em energia elétrica.

A energia cinética apresenta-se sobre a forma de vibrações, deslocações, ou apenas forças e colisões. Deste modo será necessário um mecanismo de transdução capaz de converter esta energia para energia elétrica. Os mecanismos mais comuns podem recorrer a efeitos eletromagnéticos, eletrostáticos e/ou piezoelétricos. Torna-se importante adaptar a estrutura mecânica do sistema de transdução ao tipo de perturbações ambientais que pretendemos coletar. As vibrações são umas das formas mais comuns de energia cinética e estas são mais adequadas para geradores inerciais, que apresentam um sistema mecânico com uma componente inercial que funciona como uma referência para o movimento que se transmite para a componente móvel do mecanismo, estabelecendo-se deslocamentos relativos entre estas partes. Um gerador deste tipo terá um fator de qualidade e uma frequência de ressonância que poderá amplificar a sua resposta às perturbações captadas[12].

Então como se poderá enquadrar o efeito piezoelétrico neste sistema? A resposta passa pelo facto de qualquer gerador inercial em funcionamento apresentar deformações mecânicas no seu sistema que são reações às vibrações ambientais. Deste modo, podermos recorrer a um material piezoelétrico, que na presença das tensões mecânicas que são exercidas sobre ele, deforma-se e gera diferenças de potencial que podem ser aplicadas a um circuito armazenador de energia elétrica, mais à frente iremos discutir melhor este efeito.

1.3 O efeito piezoelétrico

Na nossa atualidade já existem diversas aplicações para materiais com efeitos piezoelétricos. Estes são incluídos em reações catalíticas para controlar velocidades de reação, também permitem a controlo da velocidade das reações de *etching* de metais, são aplicados em sistemas de autocarregamento, e em outros processos eletroquímicos como a deposição seletiva, produção de hidrogénio e degradação de corantes.[1] Na figura 1.1 temos um esquema das aplicações dos materiais piezoelétricos em processos eletroquímicos.

O efeito piezoelétrico é um efeito que resulta do «... acoplamento de comportamentos mecânicos e elétricos de (...) cristais de determinadas classes».[13] De facto, na história, este efeito foi detetado em classes de cristais pelos irmãos Jacques e Pierre Curie em março de 1880. Nos seus estudos, descobriram que o quartzo, topaz, sal Rouchelle e açúcar eram exemplos de cristais que na presença de deformações mecânicas geravam, de forma proporcional, um potencial elétrico; este efeito é conhecido pelo Efeito Piezoelétrico Direto. Em 1881, Gabriel Lippmann [14] verificou que esse processo também podia ser reversí-

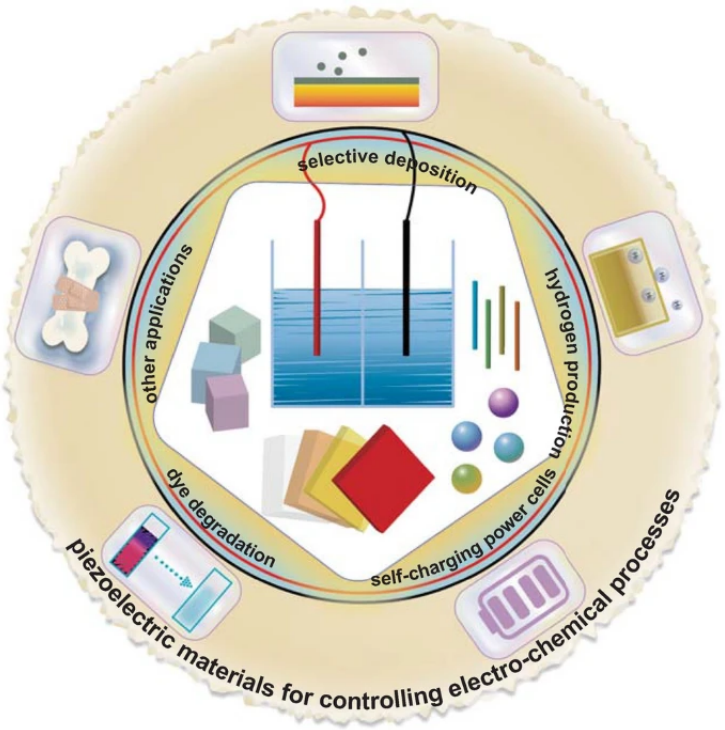


Figura 1.1: Aplicações piezoelétricas em processos eletroquímicos.[1]

vel ao nível termodinâmico, ou seja, aplicar um potencial elétrico no cristal criava uma deformação proporcional; designa-se a este fenómeno Efeito Piezoelétrico Inverso. Nesse mesmo ano essa conclusão foi verificada experimentalmente pelos irmãos Curie. O estudo deste efeito tornou-se pouco apelativo nos 30 anos seguintes, uma vez que a matemática envolvida era complicada. Até à publicação da obra de Woldemar Voigt, em 1910 [15], no qual foram estudadas 20 classes de cristais piezoelétricos. Deste estudo definiu-se os 18 coeficientes piezoelétricos macroscópicos de cristais sólidos. Mais tarde, entre 1916 e 1917, o conhecimento adquirido sobre este fenómeno culminou na invenção da sua primeira aplicação pelo físico Robert Boyle: o Sonar piezoelétrico. Desde de então, a comunidade cientifica continuou a estudar/desenvolver novas aplicações práticas para estes materiais [16].

1.3.1 A teoria da Piezoeletricidade

As bases termodinâmicas da Piezoeletricidade foram formuladas por Lippmann e Voigt.[13, 14, 15, 17] A partir da primeira lei da termodinâmica, a conservação de energia de um meio piezoelétrico continuo é dada pela equação:

$$\dot{U} = T_{ij}\dot{S}_{ij} + E_i\dot{D}_i \tag{1.1}$$

Ano	Autores	Acontecimento
1880	Jacques e Pierre Curie	Descoberta do efeito piezoelétrico direto em cristais como o quartzo, sal Rouchelle e açúcar.
1881	Gabriel Lippmann	Descoberta do efeito piezoelétrico inverso através das leis da termodinâmica.
1881	Jacques e Pierre Curie	Confirmação experimental do efeito piezoelétrico inverso.
1910	Woldermar Voigt	Estudo de 20 classes de cristais piezoelétricos e definição dos 18 coeficientes piezoelétricos macroscópicos de cristais sólidos.
1916-1917	Robert William Boyle	Primeira aplicação dos cristais piezoelétricos: o Sonar piezoelétrico.

Figura 1.2: Esquema cronológico de acontecimentos.

onde U é a densidade de energia no meio piezoelétrico, T_{ij} é o tensor de tensão, S_{ij} é o tensor de deformação, E_i é o tensor de campo elétrico, D_ié o tensor de deslocamento elétrico e a notação com um ponto simboliza a primeira derivada temporal.

A forma da entalpia elétrica na teoria da Piezoeletricidade linearizada é:

$$H = \frac{1}{2}c^E_{ijkl}S_{ij}S_{kl} - e_{kij}E_kS_{ij} - \frac{1}{2}\varepsilon^S_{ij}E_iE_j \tag{1.2}$$

onde c^E_{ijkl}, e_{kij}, ε^S_{ij} são as constantes de elasticidade a campo elétrico constante, de piezoeletricidade e de permitividade a deformação constante, respetivamente.

A partir da equação 1.2 obtém-se as seguintes expressões presentes nas referências desta secção [17, 18]:

$$T_{ij} = c^E_{ijkl}S_{kl} - e_{kij}E_k \tag{1.3}$$

$$D_i = e_{ikl}S_{kl} + \varepsilon^S_{ik}E_k \tag{1.4}$$

estas equações constituem a situação linear de um meio piezoelétrico continuo sem fronteiras. No entanto, o que pretendemos são as versões destas equações para meios com fronteiras. Assim os três pares de equações seguintes representam um sistema piezoelétrico nessas condições:

$$S_{ij} = s^E_{ijkl}T_{kl} + d_{kij}E_k \tag{1.5}$$

$$D_i = d_{ikl}T_{kl} + \varepsilon^T_{ik}E_k \tag{1.6}$$

e

$$S_{ij} = s^D_{ijkl}T_{kl} + g_{kij}D_k \tag{1.7}$$

$$E_i = -g_{ikl}T_{kl} + \beta^T_{ik}D_k \tag{1.8}$$

e

$$T_{ij} = c^D_{ijkl} S_{kl} - h_{kij} D_k \tag{1.9}$$

$$E_i = -h_{ikl} S_{kl} + \beta^S_{ik} D_k \tag{1.10}$$

onde d_{kij}, g_{kij} e h_{kij} são as formas alternativas das constantes piezoelétricas, s^E_{ijkl} e s^D_{ijkl} são as constantes de flexibilidade a campo constante e a deslocamento elétrico constante, e β^T_{ik} e β^S_{ik} são as constantes de impermeabilidade a tensão constante e deformação constante. Estas novas constantes permitem descrever a resposta do material piezoelétrico nas respetivas condições. Deste modo, podemos identificar o material determinando os valores destas constantes.

Reconhecendo a existência das constantes piezoelétricas já podemos passar à identificação dos diferentes tipos de materiais piezoelétricos e verificar o motivo pelos quais os mais utilizados atualmente apresentam uma maior resposta piezoelétrica.

1.3.2 Os materiais piezoelétricos contemporâneos

Após 1917 foram realizadas novas descobertas de cristais piezoelétricos, alguns existentes na natureza, outros tiveram de ser sintetizados. Como vimos anteriormente o primeiro cristal piezoelétrico descoberto foi o Quartzo, em 1880, pelos irmãos Curie. Mas mais tarde, em 1946, foram descobertas as cerâmicas de titanato de bário ($BaTiO_3$) que apresentavam efeito piezoelétrico também. Este foi o gatilho para o rápido avanço dos estudos desta área, pois em 1954 são descobertas as cerâmicas de titanato zirconato de chumbo (PZT) com melhor piezoeletricidade que as anteriores. Uma vez que as cerâmicas PZT contêm chumbo que é um elemento prejudicial para o ambiente tornou-se interessante a procura de outros cristais capazes de substituir este tipo de compostos. Sendo descoberta, em 1960, a alta ferroeletricidade do titanato de sódio e bismuto (BNT) que o tornou no próximo candidato à substituição do PZT. Ainda agora se estudam novos cristais e combinações cristalinas com BNT para serem utilizadas no mercado dos piezomateriais.[2]

Normalmente as estruturas cristalinas polares e com simetria pontual tendem a apresentar configurações cristalográficas que permitem a existência do efeito piezoelétrico. Na procura de novos materiais grande parte do estudo é realizado na classe das cerâmicas que apresentam essas estruturas e constituições necessárias à existência de Piezoeletricidade.

Na atualidade, as cerâmicas mais conhecidas e usadas no mercado ainda são algumas das famílias das perovskitas de chumbo que apresentam uma fórmula genérica $Pb(B'B'')O_3$, uma vez que têm ótimas características piezoelétricas [4]. Uma perovskita apresenta uma

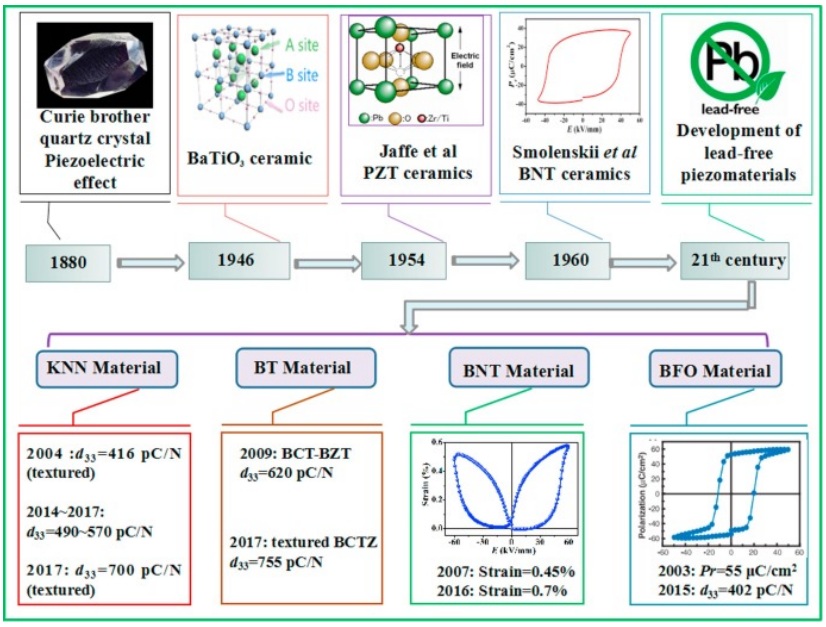


Figura 1.3: Esquema representativo da sequência cronológica dos tipos de cerâmicas piezoelétricas descobertas.[2]

fórmula ABO_3 onde A e B são catiões e os aniões são oxigénios. No caso dos titanatos de chumbo a estrutura mais estável é cúbica e na presença de uma deformação ocorre uma deslocação nos catiões B que cria um momento dipolar na célula cristalina. Esta distorção ocorre a nível das posições octaédricas e permite a criação de uma estrutura polar e ferroelétrica. A primeira cerâmica piezoelétrica policristalina mais importante foi o $Pb(Zr,Ti)O_3$, o titanato de chumbo e zircónio, também conhecido por PZT (figura 1.4), que começou a ser estudado nos anos 70 [4]. O PZT apresenta um carácter ferroelétrico e entre as fases tetragonal (FT) e trigonal (FR) tem excelentes propriedades piezoelétricas. Na figura 1.5 podemos observar o diagrama de fases do PZT. Nas fases FR e FT o PZT apresenta uma polarização espontânea (Ps) que está associada à estrutura que o cristal apresenta, deste modo a existência dessa característica atribui o carácter piezoelétrico ao material (figura 1.6). No entanto, a onde o material apresenta maior liberdade direcional de polarização acontece entre essas duas fases, onde temos uma mistura de diferentes estruturas cristalinas com as diferentes direções de Ps correspondentes a cada fase, esta é a zona da fronteira de fase morfotrópica (MPB - Morphotropic Phase Boundary), aqui verificamos uma cerâmica PZT com propriedades piezoelétricas excelentes. Existem outras perovskitas de chumbo designadas de *relaxores* que apresentam ótimas qualidades piezoelétricas, no entanto aparentam ter baixa estabilidade. Uma forma de perceber o grau de piezoeletricidade é através de uma constante designada do fator de acoplamento eletromecânico (k) que representa a eficiência de conversão energia mecânica e elétrica

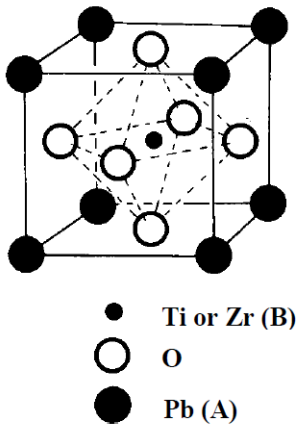


Figura 1.4: Estrutura do PZT [3]

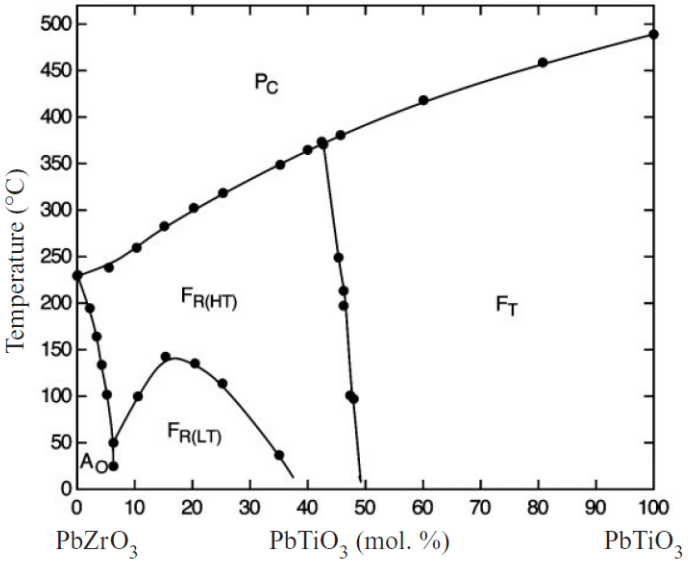


Figura 1.5: Diagrama de fases $PbZrO_3 - PbTiO_3$[4]

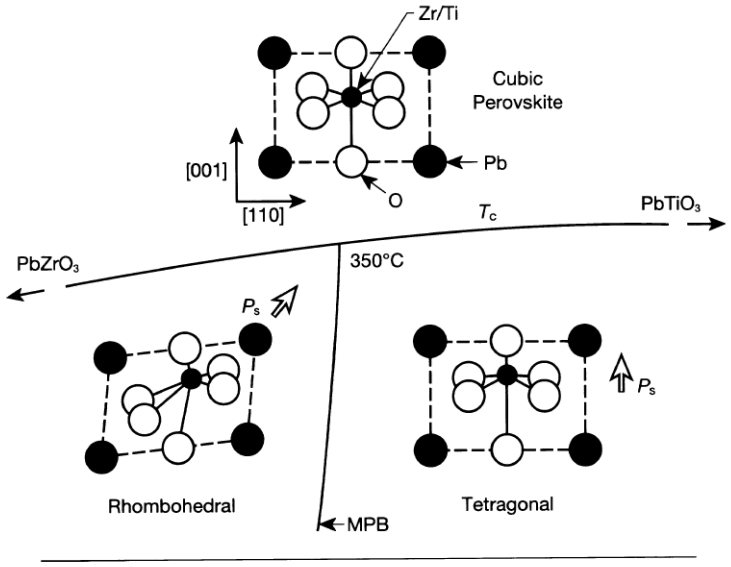


Figura 1.6: Polarização Espontânea de cada fase [3]

(vice-versa) que o piezoelétrico apresenta.

$$k^2 = \frac{energia\ mecânica\ convertida\ em\ energia\ elétrica}{energia\ mecânica\ fornecida} \tag{1.11}$$

No caso da cerâmica PZT com uma concentração de 48% de iões Ti, esta constante apresenta aproximadamente o valor 0,67.

Por outro lado, a fabricação das perovskitas de chumbo também apresenta grande relevância na explicação para o seu sucesso atual. Existem três grandes métodos de preparação destas cerâmicas: mistura de óxidos, solução e crescimento de cristal. O método mais comum para o PZT é a produção em solução. Este método de produção recorre à dissolução dos óxidos num solvente orgânico e através de reações químicas permitem o estabelecimento das ligações entre os catiões metálicos estruturando o cristal pretendido após a evaporação do solvente. A este processo é designado de Decomposição Metal-orgânica e é responsável pela preparação dos filmes finos policristalinos. Duas grandes característica deste processo são o seu baixo preço e a sua fácil deposição. Uma vez obtida a solução desejada basta espalhar esta sobre a superfície do material no qual pretendemos depositar com técnicas de *spin-coating* e *dip-coating*. O substrato utilizado costuma a ser platina no caso do PZT, uma vez que apresenta boas características como elétrodo. Outros métodos como o de crescimento de cristais já está a ser usado na formação de cristais de PZT, no entanto torna-se muito difícil atingir cristais de alta qualidade e com elevadas quantidades. Este facto limite a aplicação deste método, uma vez que o efeito piezoelétrico é de natureza

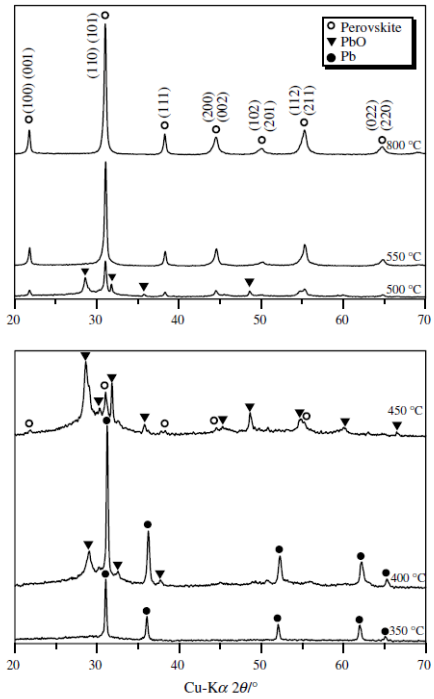


Figura 1.7: XRD do desenvolvimento das perovskitas de PZT [5]

cristalográfica[4].

Através de um estudo realizado [5] foi possível verificar o desenvolvimento do PZT pelo método de Decomposição Metal-orgânica através da técnica de difração de raios-X (XRD). Na figura 1.7 podemos verificar que no inicio são detetados os cristais de chumbo, à medida que a temperatura aumenta e a reação química se estabelece começa a aparecer novos cristais de óxido de chumbo até desaparecer todo o chumbo cristalino da mistura, nesta fase ainda não são detetadas perovskitas. Só depois da decomposição estar completa podemos ver que a principal contribuição cristalográfica para o espetro é a das perovskitas de PZT.

1.3.3 A classificação das cerâmicas PZT

Como vimos anteriormente o uso de cerâmicas PZT tornou-se indispensável para a construção de dispositivos piezoelétricos, tudo explicado pelo facto do processo de produção do PZT ser de certo modo fácil e rápido tendo como resultado um produto barato e com propriedades fatores de acoplamento consideravelmente elevados. No entanto as propriedades do PZT podem variar dependendo de alterações adotadas no método de fabricação. Este facto levou à criação de classificações para os diferentes tipos de cerâmicas PZT fabricadas.

Na criação do sonar o tipo de PZT mais utilizado era o PZT-4 que apresentava carac-

Propriedade	Símbolo	Unidade	PZT-4	PZT-5A	PZT-5H	PZT-5J
Constante Dielétrica	K	-	1400	1600-1800	3400-3800	2100
Campo Coercivo	E_c	kV/cm	14.4	11.8-12.0	5.5-8.0	10.0
Polarização residual	P_r	$\mu Coul/cm^2$	31	23.0	12.9	
Polarização de saturação	P_{sat}	$\mu Coul/cm^2$	40.1	27.7	19.5	
Fator de acoplamento eletromecânico	k_{eff}	-	0.49	0.50	0.53	
Fator de acoplamento planar	k_p	-	0.54	0.56-0.68	0.59-0.75	0.72
Constante de deformação extensional	d_{33}	m/V ($\times 10^{-12}$)	225	350-390	585-650	485
Constante de tensão extensional	g_{33}	V.m/N ($\times 10^{-3}$)	8.5	16.6-23.2	12.5-19.0	21.3
Constante de acoplamento extensional	k_{33}	-	0.35	0.53-0.72	0.59-0.75	0.74
Constante de deformação transversal	d_{31}	m/V ($\times 10^{-12}$)	-85	-190	(-320) - (-265)	-270
Constante de tensão transversal	g_{31}	V.m/N ($\times 10^{-3}$)	-7.5	(-13.7) - (-11.3)	(-9.5) - (-8.5)	-10.4
Constante de acoplamento transversal	k_{31}	-	0.22	0.35-0.4	0.36-0.44	0.37
Densidade	ρ	g/cm^3	7.6	7.7	7.4	

Tabela 1.1: Valores das propriedades elétricas e piezoelétricas das diferentes classes de cerâmicas PZT [9, 10]

terísticas elétricas ótimas para a sua utilização como sensor de altas frequências acústicas em ambiente subaquático. Depois com o aparecimento de dispositivos transdutores para aplicações sensoriais, de atuação e de produção energética passaram a ser mais adequada a classe PZT-5. Neste classe encontramos os PZT-5A que têm propriedades piezoelétricas muito boas mas baixa estabilidade e os PZT-5H já são o oposto, uma vez que apresentam maior estabilidade mas propriedades razoáveis. Existem ainda os PZT-5J que são uma combinação das propriedades da família 5A e 5H. Há evidências de outras famílias de PZT de classe superior à 5, no entanto apenas iremos considerar as acima descritas. Na tabela 1.1 temos alguns valores retirados de um estudo realizado pela NASA em 1998 para caracterizar diferentes classes de PZTs[9] e foram adicionados dados de uma ficha de dados de uma empresa de desenvolvimento de materiais piezoelétricos[10]. Algo que se verifica é que ao longo destas décadas a qualidade da fabricação deste material evoluiu obtendo assim um aumento em valor absoluto das diferentes constantes piezoelétricas.

1.4 Sistemas de recolha de energia avançados

Ao longo destes anos, o desenvolvimento de dispositivos piezoelétricos tem ganho muitas estruturas diferentes e com objetivos de captar as deformações mecânicas de naturezas diferentes do meio. Existem geradores otimizados para captar deformações por impactos e compressão, outros por vibrações através de ressonâncias específicas, outros através deformações causadas por rotações. Um modelo muito comum usado para a captação de deformações por impacto/compressão direcional é a geometria circular (figura 1.8b), em

que temos um substrato circular condutor onde é depositado uma camada circular de PZT e depois por cima depositada uma camada condutora. Para a captação de deformações causadas pela compressão e distensão de movimentos rotatórios/centrífugos é usado um modelo de barra com massa de prova (figura 1.8a), onde o PZT é depositado nessa barra que quando é sujeita a uma velocidade angular variável sofre compressões e distensões que são passadas ao material piezoelétrico; no entanto, a forma mais comum é o modelo cantiléver com massa de prova (figura 1.8c) que é responsável por captar vibrações e impactos realizados em direções perpendiculares ao plano do cantiléver (propagações transversais) e em direções paralelas ao plano do cantiléver (propagações longitudinais). Outra forma de aumentar os a eficácia da colheita do dispositivo passa pela combinação de camadas PZT depositadas alternadamente no material de forma a obtermos mais volume de material piezoelétrico ativo e assim para a mesma perturbação do meio tornar e energia de saída superior.

Neste trabalho iremos considerar a estrutura cantiléver com uma camada de PZT, também designado por cantiléver PZT Unimorfo. Esta estrutura é uma das mais simples e mais comuns do mercado para aplicações de colheita de energia.

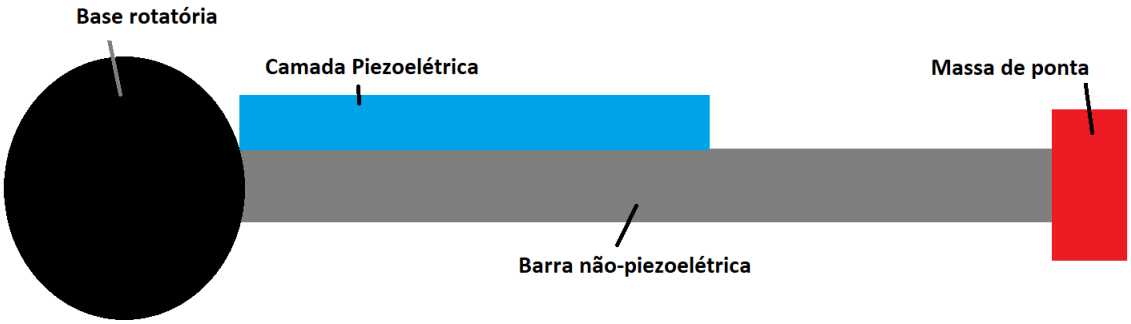
1.4.1 Modelo teórico do Coletor Cantiléver Unimorfo

O modelo de deformação mecânica do cantiléver a campo constante e a polarização estabelecida para uma tensão mecânica aplicada constante é denominado cantiléver unimorfo. Por isso o nosso modelo vai se basear na equação da deformação mecânica a campo elétrico constante (equação 1.5) e na equação da polarização elétrica do material para uma tensão mecânica constante (equação 1.6), isto significa que irão ser consideradas as constantes de correspondência elétrica s, a constante de deformação d e a permitividade do material ε (estas constantes estão presentes nas equações referidas anteriormente).

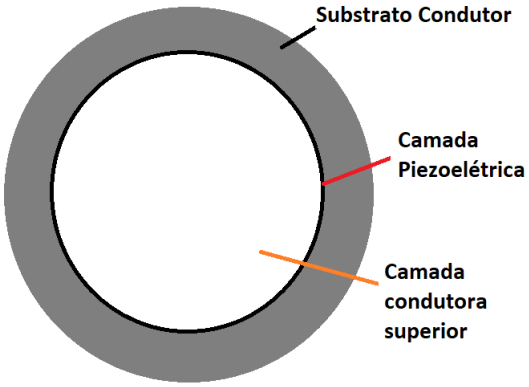
Primeiramente vamos considerar a componente mecânica do nosso modelo, ou seja, podemos descrever o cantiléver como um sistema oscilatório que se encontra sobre a influência de oscilações externas apresenta uma lei de movimento da seguinte forma[13]:

$$YI\frac{\partial^4 z_{rel}(x,t)}{\partial x^4}+c_sI\frac{\partial^5 z_{rel}(x,t)}{\partial x^4\partial t}+c_a\frac{\partial z_{rel}(x,t)}{\partial t}+m\frac{\partial^2 z_{rel}(x,t)}{\partial t^2}=-m\frac{\partial^2 z_b(x,t)}{\partial t^2}-c_a\frac{\partial z_b(x,t)}{\partial t} \tag{1.12}$$

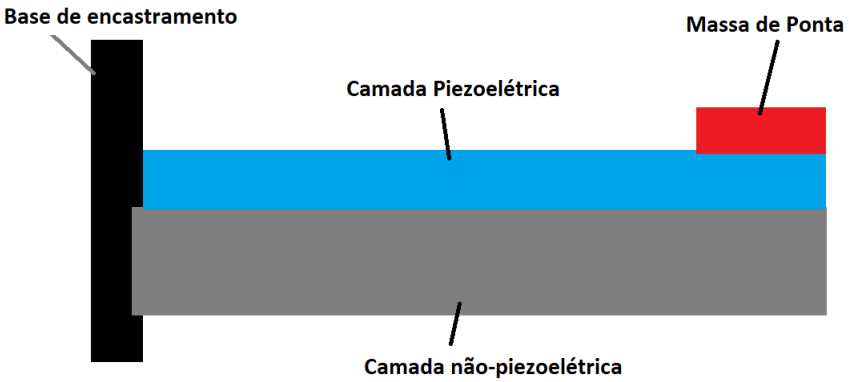
em que Y é o módulo de Young da estrutura, I é o momento de inércia, c_s é o coeficiente de amortecimento de deformação, c_a é o coeficiente de amortecimento do ar, $z_{rel}(x,t)$ é a função que dá a deslocação do ponto em x do cantiléver no tempo t relativamente à zona encastrada, $z_b(x,t)$ é a função que nos dá o deslocamento da base encastrada ao longo do



(a) Dispositivo usado para captar deformações mecânicas nas rotações



(b) Dispositivo usado para captar deformações mecânicas direcionais



(c) Dispositivo usado para captar vibrações mecânicas

Figura 1.8: Esquemas simples de diferentes tipos de dispositivos

tempo.

Da equação 1.12 podemos caracterizar a cinética do movimento do nosso cantiléver da forma mais generalizada. No entanto, este sistema também pode ser simplificado em blocos que representam os parâmetros mecânicos que caracterizam o dispositivo; podemos resumir o nosso cantiléver a um sistema de um grau de liberdade constituído por uma massa, uma mola e um amortecedor (figura 1.9). partir deste processo podemos determinar o deslocamento relativo do nosso sistema [6, 13]:

$$z(t) = \frac{\omega^2}{\omega_n^2 - \omega^2 + j2\zeta\omega_n\omega} Y_0 e^{j\omega t} \tag{1.13}$$

Da equação 1.13 obtemos a frequência natural do sistema sem amortecimento

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} = \sqrt{\frac{3YI/L^3}{0.236mL + M_t}} \tag{1.14}$$

em que $k_{eq} = \frac{3YI}{L^3}$, $m_{eq} = 0.236mL + M_t$, M_té a massa de prova e L é o comprimento do cantiléver.

Outra informação importante retirada da equação 1.13 é o fator de amortecimento equivalente do sistema:

$$\zeta = \frac{c_{eq}}{2\omega_n m_{eq}} \tag{1.15}$$

em que c_{eq} é o coeficiente de amortecimento equivalente do sistema.

Esta aproximação permite-nos fazer uma construção da lei dos deslocamentos do nosso cantiléver, no entanto a simplificação desconsidera toda a dinâmica associada à estrutura e à distribuição da deformação pelo cantiléver, o que significa obter erros na determinação da resposta elétrica do material piezoelétrico. Deste modo, é necessário calcular os resultados da equação 1.12.

Passemos então à expressão geral das frequências de ressonância do cantiléver unimorfo [13, 19, 20]:

$$\omega_r = \lambda_r^2 \sqrt{\frac{0.236 D_p w}{(m_e + m_p)\left(L - \frac{L_t}{2}\right)^3}} \tag{1.16}$$

$$m = \rho_p t_p + \rho_s t_s \tag{1.17}$$

$$m_e = 0.236mw\left(L - \frac{L_t}{2}\right) + mw\frac{L_t}{2} \tag{1.18}$$

$$D_p = \frac{(Y_p^2 t_p^4 + Y_s^2 t_s^4 + 2Y_p Y_s t_p t_s (2t_p^2 + 2t_s^2 + 3t_p t_s))}{12\,(Y_p t_p + Y_s t_s)} \tag{1.19}$$

onde,

Y_p= módulo de Young do piezoelétrico,

Y_s = módulo de Young do substrato,

L_t = comprimento da massa de prova,

w = largura do cantiléver e da massa de prova,

t_p = espessura do piezoelétrico,

t_s = espessura do substrato,

M_t = massa de prova,

ρ_p = densidade do piezoelétrico,

ρ_s = densidade do substrato,

m_e = massa equivalente do sistema real.

Consideremos a componente elétrica através dos resultados da equação 1.12 podemos determinar os parâmetros elétricos do cantiléver unimorfo[13, 19, 20].

A expressão da carga do dispositivo é da seguinte forma

$$Q = \frac{-3d_{31} s_s s_p t_s\,(t_s + t_p)\,L^2}{B} F \tag{1.20}$$

onde, $s_s = 1/Y_s$é a constante de flexibilidade do substrato, $s_p = 1/Y_p = s_{11}^E$é a constante de flexibilidade do piezoelétrico e está associada à constante de correspondência elétrica do piezoelétrico, $B = s_s^2 t_p^4 + 4s_s s_p t_s t_p^3 + 6s_s s_p t_s^2 t_p^2 + 4s_s s_p t_p t_s^3 + s_p^2 t_s^4$ e F a amplitude da força aplicada no sistema.

O valor da tensão em circuito aberto é dado pela equação:

$$V = \frac{-3d_{31} s_s s_p t_s t_p\,(t_s + t_p)\,L}{\varepsilon_{33}^T w B \left(1 + \left(\frac{3s_p^2 s_s t_p t_s^2 (t_p + t_s)^2}{s_h B} - 1\right) k_{31}^2\right)} F \tag{1.21}$$

em que d_{31} é a constante de deformação do piezoelétrico, ε_{33}^T é a permitividade do material piezoelétrico, $s_h = s_p t_s + s_s t_p$ e k_{31} é a constante de acoplamento eletromecânico do piezoelétrico.

Por fim, uma vez obtida a carga e a tensão gerada em circuito aberto pelo piezoelétrico, podemos calcular a energia elétrica gerada em circuito aberto:

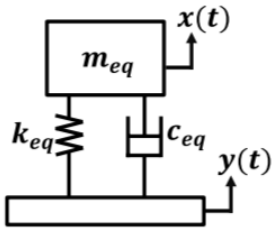


Figura 1.9: Esquema representativo em blocos do cantiléver.[6]

$$U = \frac{9d_{31}^2 s_s^2 s_p^2 t_s^2 t_p \left(t_s + t_p\right)^2 L^3}{\varepsilon_{33}^T w B^2 \left(1 + \left(\frac{3s_p^2 s_s t_p t_s^2 (t_p + t_s)^2}{s_h B} - 1\right) k_{31}^2\right)} F^2 \tag{1.22}$$

1.5 O CeNTI e os objetivos do Estágio

Em Portugal, um dos centros de investigação científicos com interesse no estudo dos materiais inteligentes e das suas aplicações tecnológicas é o Centre for Nanotechnology and Smart Materials (CeNTI), conhecido pelo desenvolvimento de dispositivos recorrendo ás áreas de eletrónica integrada, engenharia mecânica e química aplicada. O presente trabalho faz parte do programa de estágio, incluído no percurso académico do mestrado de Física do ramo Experimental, resultante da colaboração entre a Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e o CeNTI.

O desafio proposto pelo David Esteves, coorientador de estágio e investigador da equipa de Smart Materials do CeNTI, foi o desenvolvimento de um dispositivo autónomo com colheita de energia, recorrendo ao uso de piezoelétricos comerciais para ser integrado num *skateboard*. Para cumprir este objetivo foi desenvolvido um plano de trabalho que consistiu no estudo e simulação numérica do funcionamento de piezoelétricos comerciais, desenvolvimento de um método experimental que permitiu caracterizar dispositivos comercias desta natureza e por fim desenvolver uma estrutura de fixação capaz de suportar e garantir o funcionamento dos piezoelétricos enquanto o *skateboard* é utilizado.

Capítulo 2

Simulação numérica dos dispositivos comerciais

A simulação numérica é uma ferramenta que permite antever o comportamento do objeto de estudo resolvendo e calculando os resultados das equações físicas que descrevem o fenómeno de interesse. Desta forma pode ser evitada a necessidade de realizar diversos ensaios e rapidamente obter as informações necessárias para atingir os objetivos propostos.

2.1 *Software* de simulação: *COMSOL Multiphysics*

A análise de dispositivos piezoelétricos como os cantiléveres unimorfos passa pelo estudo do acoplamento eletromecânico do sistema [6, 19, 21]. Existem algumas formas diferentes de caracterizar este tipos de sistema: o método de parâmetros distribuídos (DOM - distributed parameter method), o método da análise de elementos finitos (FEA - finite element analysis) que é característico dos *softwares* de simulação e o método de análise do modelo de parâmetros concentrados, que vimos anteriormente na aproximação do sistema em blocos.

Neste capítulo será considerado o método FEA, ou seja, um método de simulação numérica que permite o estudo de sistemas físicos complexos, com muitas estruturas, e/ou com muitos materiais diferentes. Este processo torna-se demorado e pode requerer a utilização de sistemas computacionais avançados à medida que o sistema em estudo se torna mais complexo. Na atualidade um dos melhores softwares FEA comerciais é o *COMSOL*, que suporta a análise do acoplamento piezoelétrico em estruturas.[21] Deste modo os dados obtidos nas secções seguintes resultam do uso do *software COMSOL Multiphysics*.

Material	Largura (Δx)(mm)	Comprimento (Δy)(mm)	Altura (Δz)(mm)
Poliéster	20.8	46	0.05
PZT-5H	20.8	46	0.15
Aço inoxidável 304	23.3	55.3	0.15
Kapton	23.3	47.8	0.03
massa de prova (do tipo Acrílico)	23.3	10	3

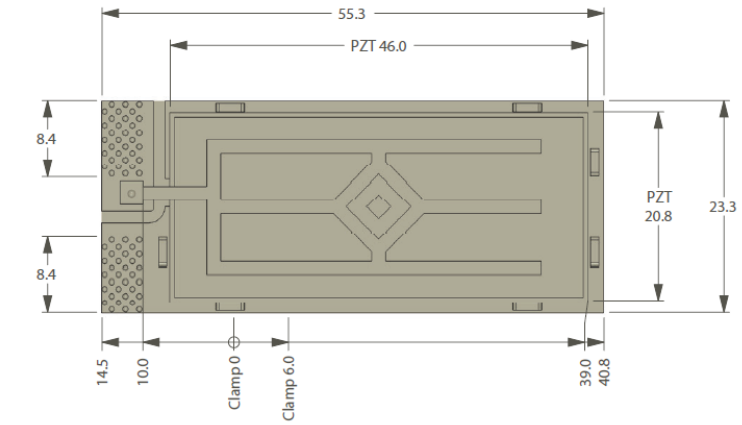
Tabela 2.1: Dimensões e materiais usados na estrutura do PPA-1001 simulado

2.2 Geometria dos dispositivos e parâmetros usados em simulação

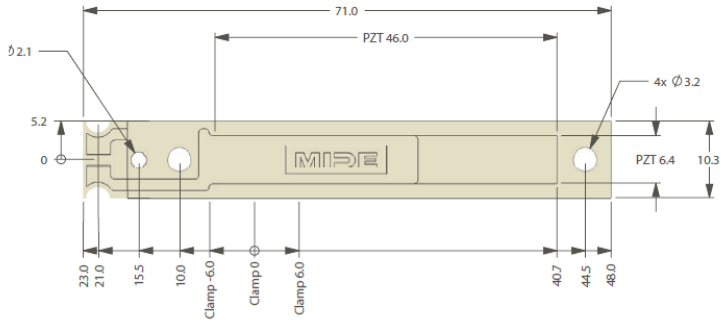
Comecemos por identificar os dispositivos usados ao longo do trabalho, estes são dois cantiléveres unimorfos de PZT-5H, comercializados pela empresa *Midé*. Outras informações e especificações poderão ser encontradas no manual de utilizador dos dispositivos [7]. O primeiro modelo é designado por PPA-1001 que apresenta uma estrutura clássica com a deposição de uma camada de PZT-5H sobre um substrato metálico e revestido por materiais poliméricos (figura 2.1a). O segundo é designado por PPA-1021 que recorre a uma deposição do PZT-5H num material polimérico (figura 2.1b).

Recorrendo à ferramenta de construção de geometrias do *COMSOL*, foi possível criar uma representação aproximada dos dispositivos. As tabelas 2.1 e 2.2 apresentam as camadas dos cantiléveres ordenadas da superior para a inferior e com as respetivas dimensões. No caso do PPA-1021 a estrutura foi encapsulada em FR4 e por isso as camadas intermédias também apresentam esse material (esta informação não é visível na tabela, no entanto a partir da representação da figura 2.3 verifica-se tal facto). O estudo também passou pela introdução de uma massa de prova no dispositivo desenhado, por isso também está incluído nas tabelas referidas as dimensões desse componente. Nas figuras 2.2 e 2.3 podemos visualizar as representações construidas que foram usadas nas simulações. Em ambos os dispositivos desenhados foi definido uma zona onde o dispositivo é encastrado, nas figuras podemos visualizar uma divisão entre a parte livre e a parte encastrada. No caso do PPA-1001 este está encastrado até aos 14.5 mm de comprimento e o PPA-1021 até aos 23.0 mm, a estas posições é designado pelo manual de utilizador como *Clamp* 0 e é visível na figura 2.1.

Os parâmetros usados para as definições dos materiais encontram-se na tabela 2.3, onde estão expressos os valores das constantes mecânicas dos materiais utilizados. Os parâmetros elétricos considerados são as constantes piezoelétricas do PZT-5H, que são fornecidas pelo *COMSOL* na sua forma mais completa através de notação matricial.



(a)



(b)

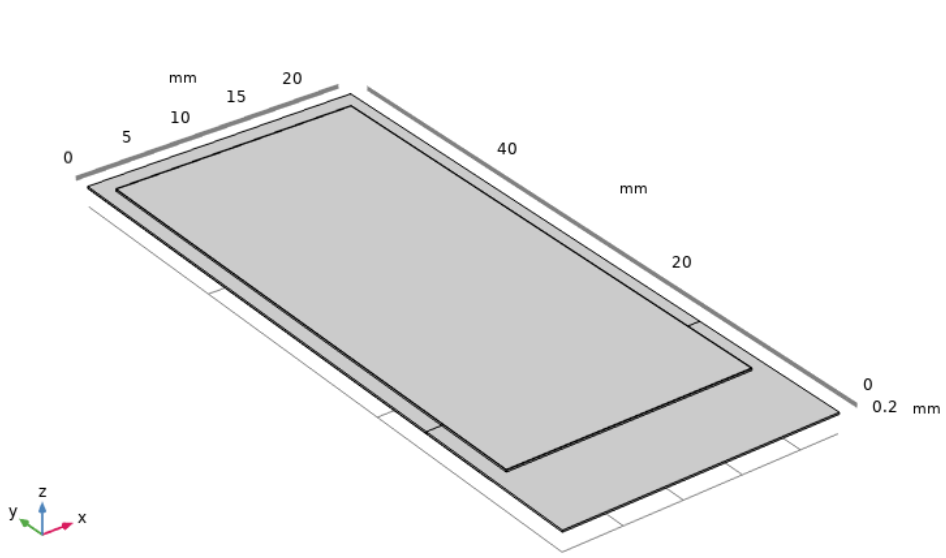
Figura 2.1: Cantiléveres Unimorfos PZT-5H da Midé. (a) PPA-1001. (b) PPA-1021. Os valores numéricos encontram-se em mm.[7]

Material	Largura (Δx) (mm)	Comprimento (Δy) (mm)	Altura (Δz) (mm)
FR4	10.3	71	0.08
Cobre	6.4	46	0.03
PZT-5H	6.4	46	0.25
Cobre	6.4	46	0.03
FR4	10.3	71	0.36
massa de prova (do tipo Acrílico)	10.3	10	3

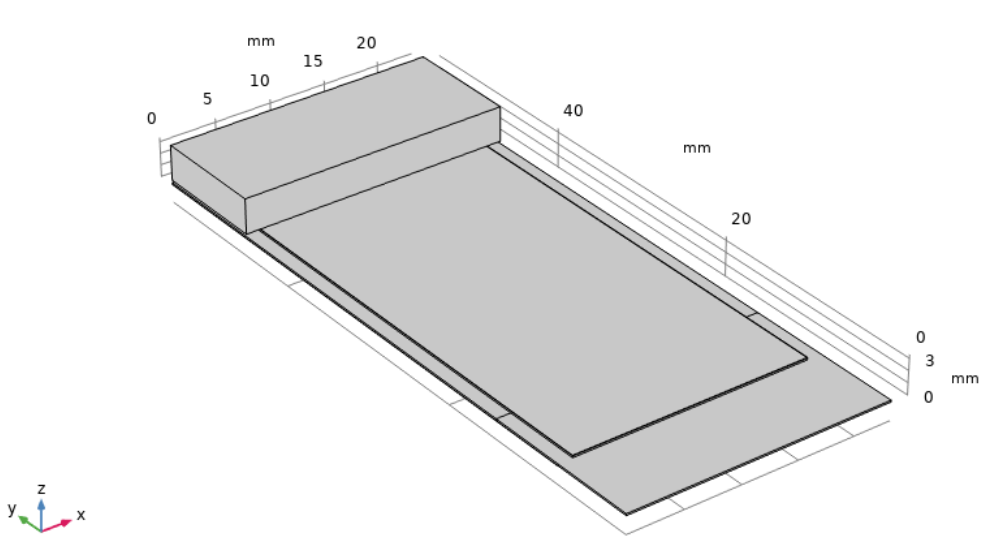
Tabela 2.2: Dimensões e materiais usados na estrutura do PPA-1021 simulado

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Poliéster	Aço inoxidável 304	Kapton	FR4	Cobre	PZT-5H	Acrílico
Módulo de Young	Y	GPa	3.65	193	4.1	26	110	6.3	3.2
Coeficiente de Poisson	ν	-	0.48	0.29	0.34	0.172	0.343	0.31	0.37
Densidade	ρ	kg/m^3	1380	8000	1410	1900	8930	7800	-

Tabela 2.3: Parâmetros mecânicos dos materiais utilizados na simulação

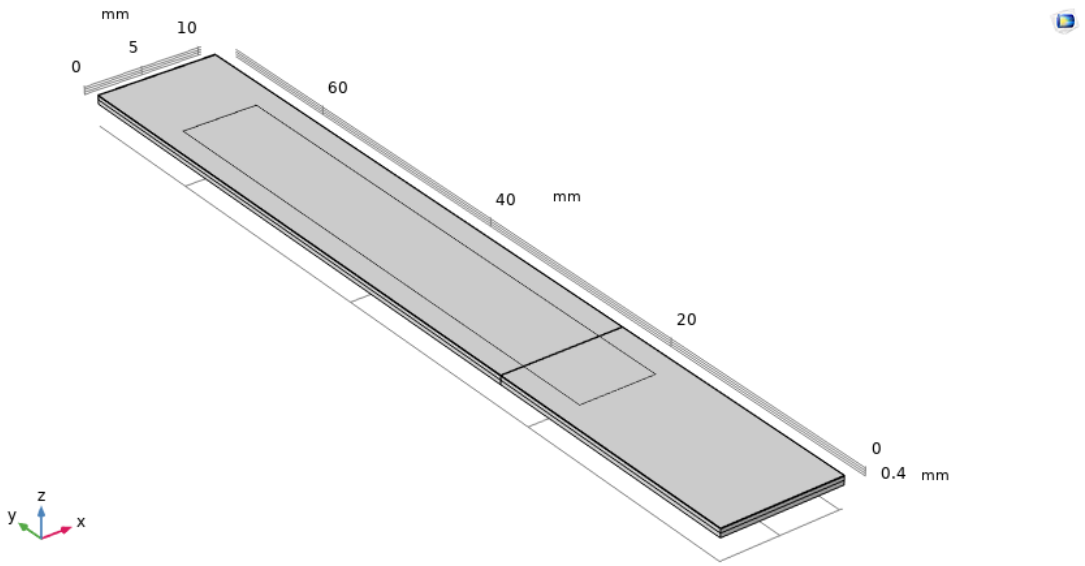


(a)

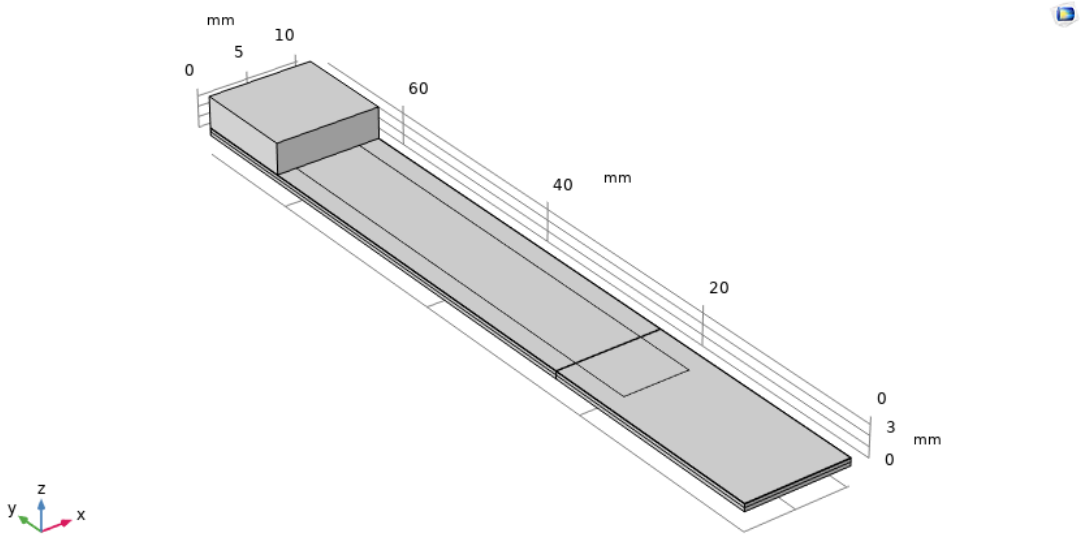


(b)

Figura 2.2: Geometria usada na simulação do PPA-1001. (a) Estrutura sem massa de prova. (b) Estrutura com massa de prova.

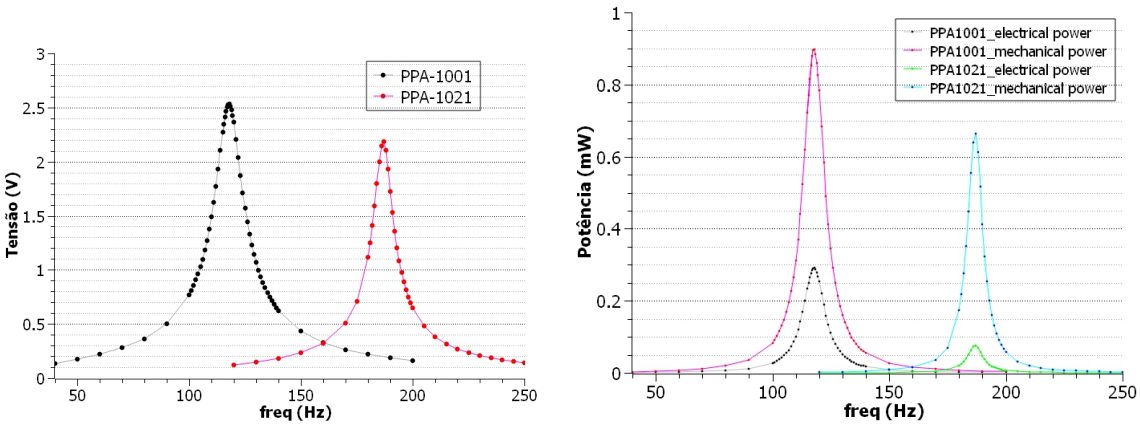


(a)



(b)

Figura 2.3: Geometria usada na simulação do PPA-1021. (a) Estrutura sem massa de prova. (b) Estrutura com massa de prova.



(a) (b)

Figura 2.4: Resultados da dependência da tensão e potência de saída com a frequência da força aplicada. a) A tensão de saída para o PPA-1001 e PPA-1021. b) As potências elétricas e mecânicas para o PPA-1001 e PPA-1021.

2.3 Os estudos realizados

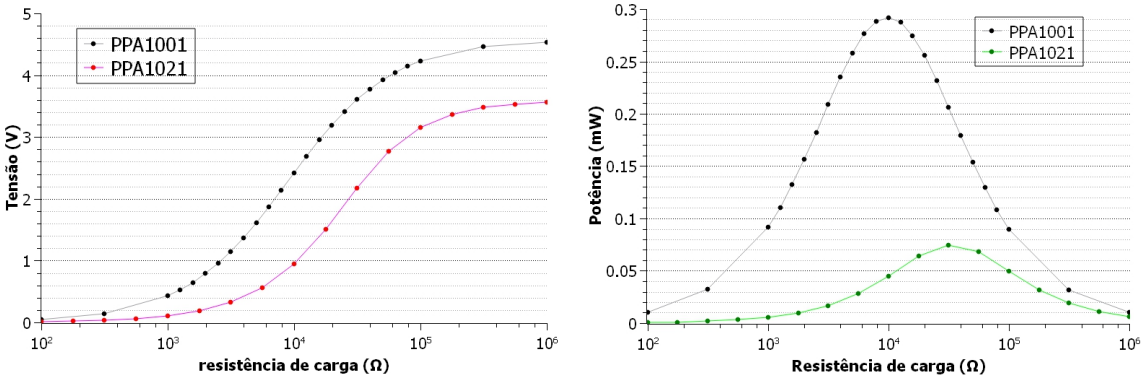
2.3.1 Determinação das frequências de ressonância do cantiléver

Uma vez que o objetivo do nosso trabalho, passa pela criação de sistemas capazes de converter energia a partir de vibrações mecânicas é necessário reconhecer qual será o comportamento do nosso dispositivo para oscilações com frequências diferentes. Assim é necessário determinar a frequência de ressonância do cantiléver que corresponde à situação em que a estrutura apresenta maior amplitude de deflexão, e por isso esta será frequência que permitirá ao material gerar um maior *output* energético. Deste modo fez-se um varrimento em frequência a aceleração constante de oscilação (1 g) para cada dispositivo e mediu-se a tensão de saída, a potência de saída e a potência mecânica realizada para colocar o dispositivo a vibrar. Na figura 2.4 podemos visualizar os resultados obtidos dessa simulação. Podemos verificar que nas frequências onde obtemos os máximos de *output* em potência o dispositivo encontra-se em ressonância. Para o caso do PPA-1001 temos ressonância nos 117.8 Hz e para o PPA-1021 temos nos 187.31 Hz. Outra observação importante é que o PPA-1001 parece apresentar um *output* superior ao do PPA-1021. Mas iremos confirmar essa afirmação em seguida.

2.3.2 Determinação da potência elétrica máxima e da resistência de carga ótima

Um fator muito importante na construção de dispositivos usados para geração de energia é a determinação da resistência de carga ótima do gerador. Qualquer circuito que

pretendemos alimentar com o nosso sistema de colheita de energia apresenta uma resistência de carga e quando esta se aproxima do valor ótimo, o cantiléver irá debitar o máximo de potência elétrica. Assim foi realizado um varrimento em resistências de carga do circuito de forma a determinar o máximo de potência elétrica possível de obter a partir de cada dispositivo na sua ressonância e com uma aceleração constante (1 g). Na figura 2.5 apresenta os resultados obtidos para a determinação das potências elétricas máximas. A tensão em ambos os casos aumenta com o aumento da resistência de carga, no entanto esta tende para um valor fixo que corresponde ao valor de tensão para o circuito aberto. No caso do PPA-1001 este valor é próximo dos 4.54 V e para o PPA-1021 é 3.56 V. Com a análise dos gráficos da potência: 1) o máximo da potência elétrica corresponde ao valor da resistência para a qual está associada o ponto de inflexão da curva da Tensão, para o PPA-1001 temos um máximo de 0.29198 mW e para o PPA-1021 temos 74.677 μW; 2) no caso da potência mecânica, esta é mínima para o valor ótimo de resistência de carga; 3) a resistência de carga ótima do PPA-1001 é aproximadamente 10 kΩ e do PPA-1021 é 31.623 kΩ.



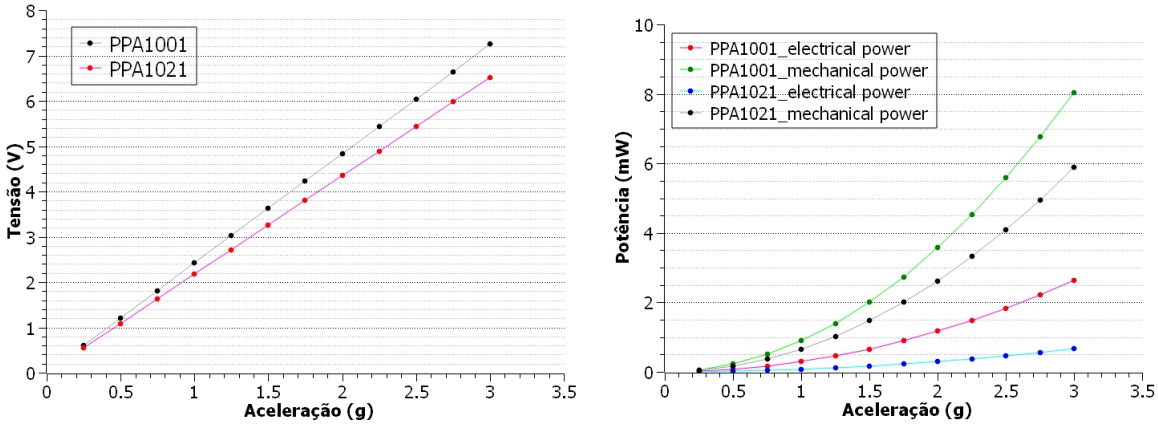
(a) (b)

Figura 2.5: Resultados da dependência da tensão e potência de saída com a resistência de carga do circuito. a) A tensão de saída para o PPA-1001 e PPA-1021. b) As potências elétricas do PPA-1001 e PPA-1021.

2.3.3 A dependência da resposta com a aceleração aplicada

Outro fator a considerar é as forças associadas às vibrações que são captadas pelo cantiléver. Como já vimos, o meio pode apresentar diferentes oscilações resultantes de forças e impactos diferentes, por isso é importante analisar a dependência do output energético do nossos dispositivos para diferentes acelerações (que estão associadas às forças oscilatórias aplicadas). Deste modo foi realizado o estudo dependência da tensão e das potências elétrica e mecânica com a aceleração aplicada. Os resultados foram obtidos considerando

o valor da aceleração em g, ou seja, como múltiplo de 9.8 m/s^2e estes estão presentes na figura 2.6. Como se esperava, ambos os casos apresentam maior potência de saída para acelerações superiores.



(a) (b)

Figura 2.6: Resultados da dependência da tensão e potência de saída com a aceleração aplicada ao dispositivo. a) A tensão de saída para o PPA-1001 e PPA-1021. b) As potências elétricas e mecânicas do PPA-1001 e PPA-1021.

2.3.4 Estudo integrado com massa de prova

Por fim, outra variável é a introdução da massa de prova nos nossos cantiléveres. Uma vez conhecida a ressonância do nosso dispositivo grande parte das vezes esta não se adequa ao meio que o pretendemos inserir, e por isso torna-se impossível obter a maior eficiência possível na transformação da energia mecânica para energia elétrica. Deste modo é necessário a introdução de uma massa de prova que permite afinar a ressonância do dispositivo. Esta dependência está descrita na equação 1.16 (Secção 1.4.1), e agora podemos ver a sua representação no gráfico da figura 2.7. Na realização deste estudo, considerou-se o volume da massa de prova constante para ambos os dispositivos, aquilo que se fez variar foi a densidade desse componente de modo a obtermos massas diferentes. Esta massa apresenta as características mecânicas de um acrílico, no entanto a sua densidade é variável, de forma a simplificar o processo de representação dessa componente na simulação. Algumas observações devem ser registadas: 1) a presença de massa de prova diminui a frequência de ressonância do dispositivo (figura 2.7), quando é adicionada uma massa de 3 g ao PPA-1001 a frequência de ressonância passa a ser 52.2 Hz (figura2.8a), já com a adição de uma massa de 0.8 g ao PPA-1021 a frequência de ressonância passa a ser 100.5 Hz (figura 2.8b); 2) a adição de massa de prova permite um aumento da potência elétrica gerada e um aumento da resistência de carga ótima, no caso do PPA-1001 com uma massa de 3g passa a gerar

2.2106 mW para uma resistência de 31.623 kΩ, já o PPA-1021 com a adição de uma massa de 0.8 g passa a gerar 0.30811 mW para uma resistência de 56.234 kΩ; 3) por fim, com a introdução de massa de prova os dispositivos apresentam a tendência vista anteriormente com o aumento da aceleração, no entanto com a particularidade de a adição da massa de prova de 0.8 g no PPA-1021 tornar a sua resposta muito parecida ao PPA-1001 sem massa (figura 2.10).

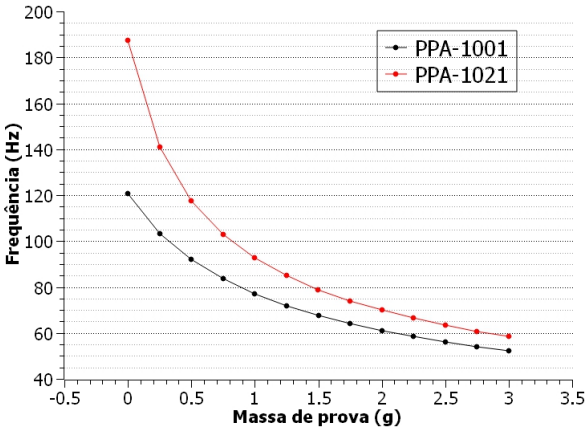
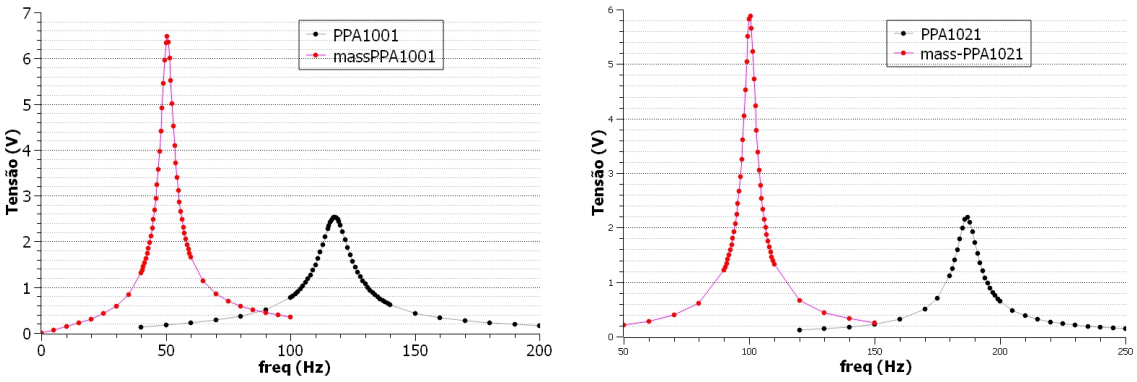


Figura 2.7: A dependência da frequência de ressonância dos dispositivos com a massa de prova.

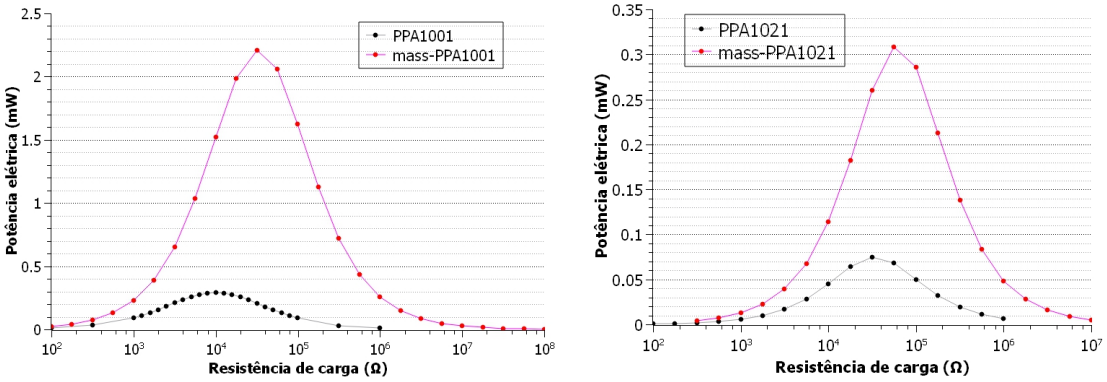


(a) (b)

Figura 2.8: Variação da frequência de ressonância com a introdução de massas de prova (aceleração de 1 g). a) Comparação das frequências de ressonância para o PPA-1001. Foi introduzida uma massa de prova de 3 g. Comparação das frequências de ressonância para o PPA-1021. Foi introduzida uma massa de prova de 0.80 g.

2.4 Síntese dos resultados

Como forma de sintetizar os resultados obtidos anteriormente temos a tabela 2.4 que apresenta os valores mais relevantes (correspondentes a acelerações de 1 g) para o nosso



(a) (b)

Figura 2.9: Variação da potência elétrica máxima e da resistência de carga ótima com a introdução de massa de prova (aceleração de 1 g). a) Comparação da potência elétrica máxima para o PPA-1001. Foi introduzida uma massa de prova de 3 g. b) Comparação da potência elétrica máxima para o PPA-1021. Foi introduzida uma massa de prova de 0.80 g.

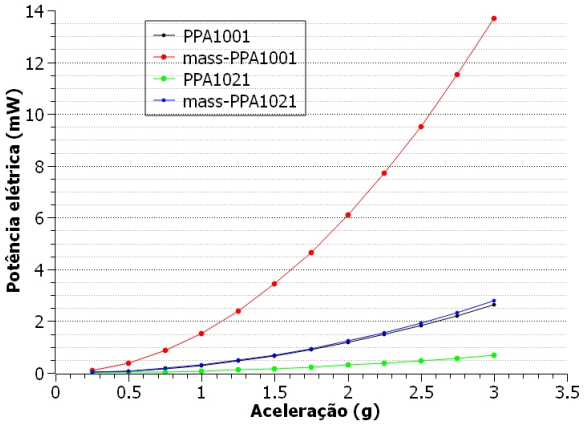


Figura 2.10: Comparação da dependência da potência elétrica com a aceleração aplicada entre os dispositivos sem massa de prova e com massa de prova.

trabalho: massa de prova (M_t), frequência de ressonância (f_r), tensão de circuito aberto (V_{open}), potência elétrica máxima (P_e) e a resistência de carga ótima (R_{opt}).

Dispositivo	M_t (g)	f_r (Hz)	V_{open} (V)*	P_e (mW)	R_{opt} ($k\Omega$)
PPA-1001	0	117.80	4.5373	0.29198	10.000
PPA-1021	0	187.31	3.5624	0.074677	31.623
PPA-1001	3	52.20	23.157	2.2106	31.623
PPA-1021	0.8	100.50	10.039	0.30811	56.234

Tabela 2.4: Valores teóricos obtidos nas simulações em *COMSOL Multiphysics.**Valor obtido para uma resistência muito alta.

Capítulo 3

Trabalho experimental

3.1 Caracterização dos dispositivos comerciais

3.1.1 A montagem experimental

Foi necessário o desenvolvimento de uma montagem capaz de gerar oscilações, dado o interesse de caracterizar a resposta dos dispositivos piezoelétricos excitados por vibrações mecânicas transversais. Para gerar sinais oscilatórios optou-se pelo uso da indução eletromagnética que pode ser observada numa coluna de som. Quando se fornece uma corrente elétrica aos terminais da coluna, a sua membrana movimenta-se. Por um lado, este tipo de sistema permite controlar a forma das oscilações geradas através do sinal elétrico fornecido, ou seja, com um gerador de sinal será possível controlar a forma e frequência da oscilação. Por outro lado, o objetivo final será montar os dispositivos a caracterizar num *skateboard*, por isso prevê-se que as frequências das vibrações mecânicas associadas à movimentação sejam inferiores a 200 Hz. Este facto justifica a utilidade deste sistema, já que uma coluna de som pode funcionar no intervalo]0,200] Hz.

Assim foi adquirida uma coluna *Subwoofer* [22] para constituir a montagem experimental utilizada. Nesta coluna foi fixada uma base, como pode ser observado na figura 3.1, na qual puderam ser montados os dispositivos. Quando ligado o gerador de sinais, a coluna reproduzia uma oscilação com a frequência introduzida no gerador, e com uma amplitude controlada pela potência elétrica fornecida pelo gerador. O dispositivo montado ficava ligado a um osciloscópio que media a sua saída em tensão. Na figura 3.2 podemos visualizar como ficou a montagem planeada.

Na natureza as vibrações mecânicas transversais podem ser representadas como ondas sinusoidais [23, 24]. Assim se considerarmos um ponto na origem de um espaço tridimensional e que oscila devido a uma vibração mecânica transversal com uma propagação paralela

Figura 3.1: Fotografia da base de fixação dos dispositivos.

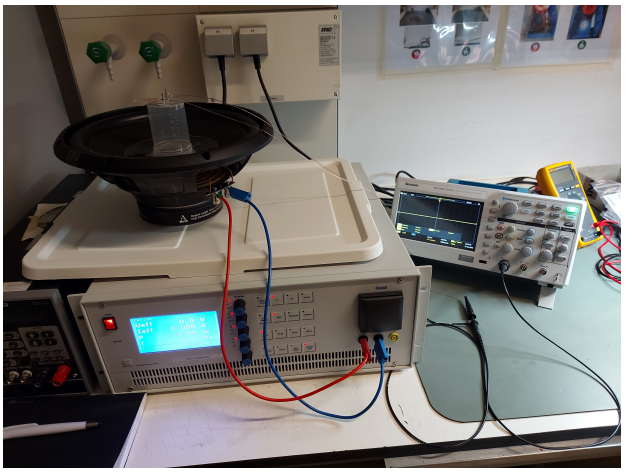


Figura 3.2: Montagem experimental inicial. Coluna ligada ao gerador de sinal sinusoidal utilizado. Osciloscópio responsável pela medição do sinal de saída dos dispositivos.

ao plano Oxy, podemos descrever o seu deslocamento através da expressão:

$$z(t) = Zsen(\omega t + \varphi) \tag{3.1}$$

, onde *z(t)* representa a posição na direção dos *zz* (direção perpendicular ao deslocamento da vibração mecânica) do ponto ao longo do tempo t, Z a amplitude dessa oscilação, ω a frequência angular de oscilação e φ uma fase. Deste modo calculando a segunda derivada de *z(t)* podemos também determinar a aceleração gerada pela vibração mecânica no ponto:

$$a(t) = -Asen(\omega t + \varphi) \tag{3.2}$$

, onde *a(t)* representa o valor da aceleração na mesma direção de *z(t)* do ponto de estudo ao longo do tempo t e A a amplitude da aceleração dada por $A = \omega^2 Z$, o sinal negativo indica a diferença de sentido entre a aceleração e a variação da posição que é uma condição

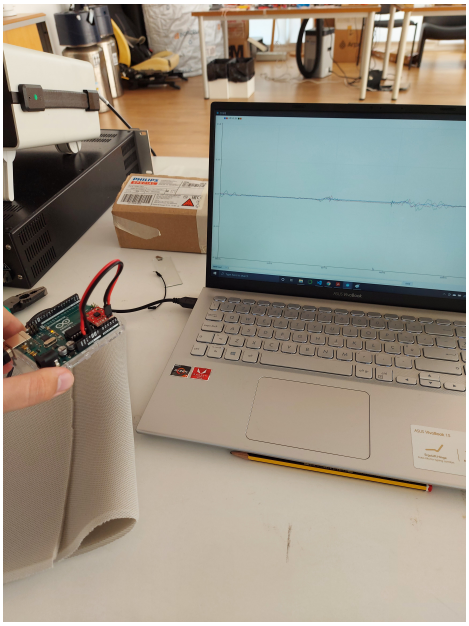
necessária ao movimento oscilatório.

Podemos concluir que para caracterizar a excitação a realizar sobre o sistema em estudo é necessário que a montagem permita saber a o valor da frequência ($f = \omega/2\pi$) e a amplitude da aceleração (A) das vibrações aplicadas.

Como forma de medir as acelerações geradas pelo montagem durante o seu funcionamento foi imperativo arranjar um mecanismo capaz de tal efeito. Parte do tempo foi investido inicialmente na criação de um sistema ótico que recorrendo ao efeito de interferência ótica seria capaz de determinar a amplitude da vibração gerada pela base de fixação e depois através da relação $A = \omega^2 Z$ seria determinado o valor da amplitude de aceleração (No Apêndice A está exposto mais informações sobre esta tema). No entanto surgiram dificuldades na obtenção de boas leituras com esse sistema devido ao ruído do sinal e como tal resultou numa mudança de estratégia. Para medir a aceleração do gerador de vibrações usou-se um circuito acelerómetro modular que apresentava compatibilidade com placas Arduino. O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrónica de hardware livre e de placa única, projetada com um microcontrolador com suporte de entradas/saídas que pode ser programado com uma linguagem de programação padrão.

Na escolha do acelerómetro duas condições de funcionamento foram estritamente necessárias para o seu bom funcionamento na montagem, uma destas seria o intervalo de acelerações para que o sensor estava limitado, e que por observações obtidas durante o trabalho, ficou no intervalo de 0.1g a 3g; e por outro lado a taxa de aquisição que deveria permitir obter dados para frequências entre os 1 Hz e os 200Hz. Na figura 3.3 pode ser observada a construção do sistema de medição de acelerações recorrendo ao software da Arduino e também é visível o acelerómetro usado que mais se aproximou às condições propostas.

Por fim, após o a programação da placa Arduino, o sistema de medição foi introduzido no gerador de vibrações (no Apêndice B temos mais algumas informações sobre o código construido). Na figura 3.4 temos a montagem final capaz de gerar vibrações com frequência e aceleração definidas pelo utilizador. Como forma de caracterizar o nosso gerador de vibrações foi construido um espetro de acelerações para diferentes frequências para uma potência de 0.2W no gerador de sinal (na figura 3.5 pode ser visualizado o espetro obtido).



(a)

(b)

Figura 3.3: a) Sistema de medição de aceleração Arduino. b) Acelerómetro utilizado.

Figura 3.4: A Montagem utilizada.

3.1.2 Procedimento experimental

O processo experimental passou pelo estudo da ressonância dos dispositivos, determinação da potência máxima e resistência de carga ótima, verificar as dependências das respostas em tensão e potência dos dispositivos com variações de aceleração aplicadas durante a vibração, verificou-se o comportamento destes com a adição de uma massa de prova, determinou-se as razões de amortecimento do PPA-1001 e PPA-1021 e por fim realizaram-se testes qualitativos dos cantiléveres para obter uma perspetiva da sua performance individual.

A descoberta da existência do efeito de amortecimento pela adição de massa de prova, levou à realização da verificação desse efeito nos nossos dispositivos e principalmente no

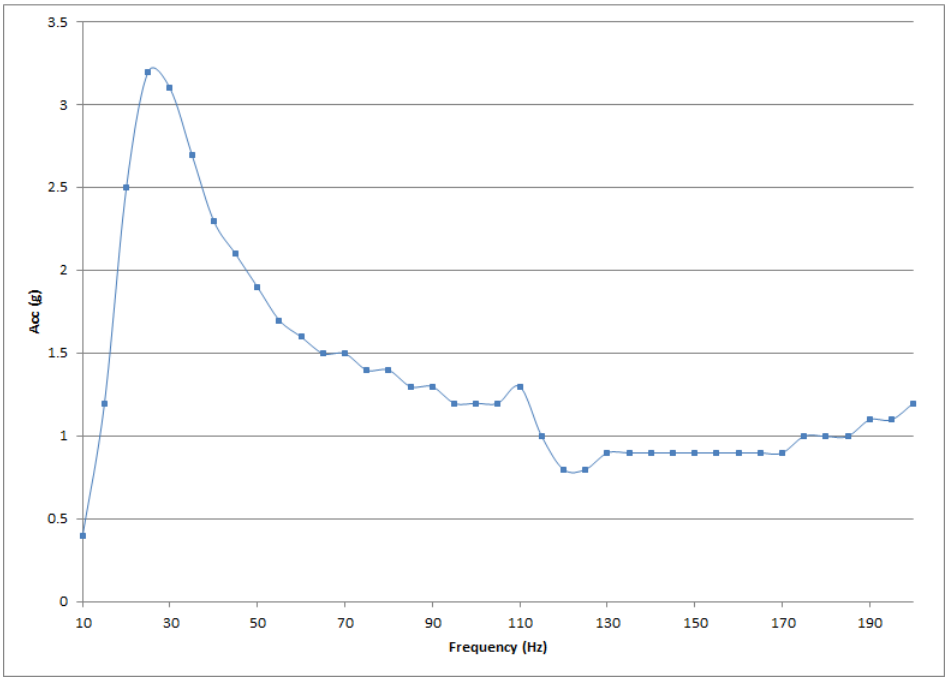
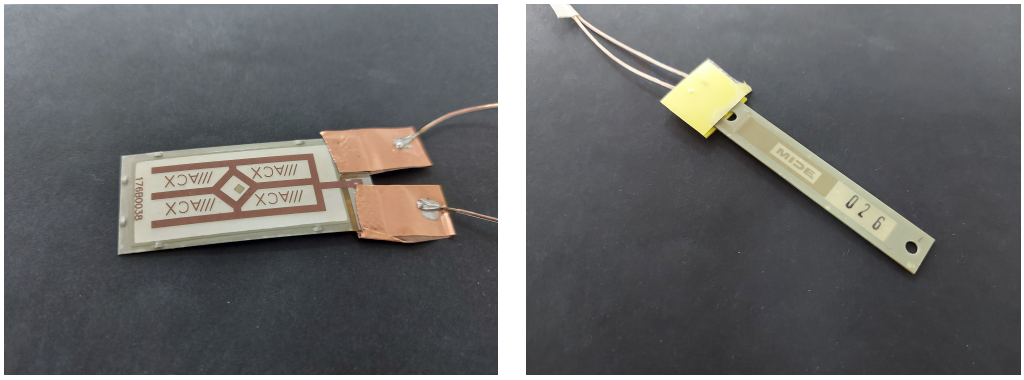


Figura 3.5: Resultados da calibração do gerador de vibrações.

dispositivo PPA-1021, o que fez desconsiderar a proposta de dispositivo estudado em simulação numérica.

Assim, os dispositivos utilizados nos estudos apresentados foram os definidos anteriormente, o PPA-1001 e o PPA-1021 (figura 3.6), mais as versões do PPA-1001 com a massa de prova 1 de 1.03g e com a massa de prova 2 de 2.23g ambas com incerteza de medição de 0.01g.



(a) (b)

Figura 3.6: Dispositivos utilizados: (a) PPA-1001 e (b) PPA-1021.

3.1.2.1 Determinação das frequências de ressonância

Na determinação da ressonância, os cantiléveres foram montados no gerador de vibrações, foi realizado um varrimento em frequência com aceleração constante de 1g, aproxi-

madamente, com uma incerteza de 0.04g. Para cada frequência foi registada o valor da amplitude da tensão do sinal sinusoidal visualizado no osciloscópio. Deste modo foi possível obter uma representação gráfica desses valores (figura 3.7), onde foram visualizados os máximos da tensão de circuito aberto que correspondiam à frequência de ressonância do dispositivo.

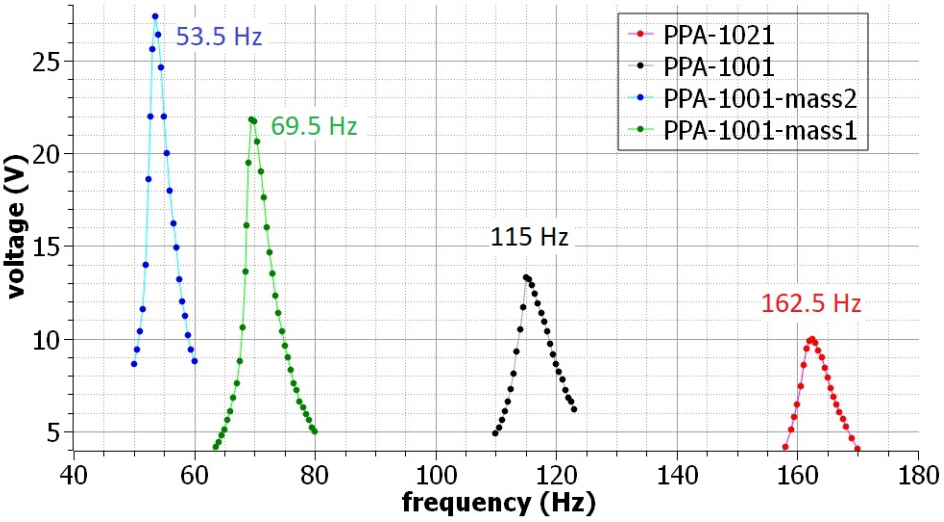


Figura 3.7: Resultados experimentais da determinação das ressonâncias para os diferentes dispositivos.

Na Tabela 3.1 temos registadas as frequências de ressonância de cada dispositivo e a respetiva incerteza de medição. Foi também realizada uma comparação com os valores obtidos em simulação numérica. No caso do PPA-1001 foi obtido um erro de 2.4%, o que permite admitir uma aproximação dos resultados simulados à realidade para este cantiléver. No entanto o PPA-1021 apresentou um erro de 13% que pode indicar uma divergência dos resultados obtidos neste e nos próximos testes.

Dispositivo	f_r (Hz)	Incerteza (Hz)	f_{rs}	Erro (%)
PPA-1001	115	0.5	117.80	2.4
PPA-1021	162.5	0.5	187.31	13
PPA-1001-mass1	69.5	0.5	-	-
PPA-1001-mass2	53.5	0.5	-	-

Tabela 3.1: Valores das frequências de ressonância dos dispositivos. Está registada a incerteza de medição da frequência e o erro em percentagem comparado com o valor da simulação.

Por fim, verificou-se que os valores de frequência de ressonância dos dispositivos não foram consistentes durante o trabalho, devido a instabilidades associadas à montagem construída. Embora fossem valores próximos aos apresentados estas diferenças causadas por alterações nas condições de montagem, ou até mesmo a possível degradação dos dispositi-

vos durante os estudos são consideradas como possíveis razões para algumas incoerências entre os resultados da simulação numérica e experimentais.

3.1.2.2 Determinação da potência máxima e resistência de carga ótima

Na realização desta parte foi necessário a utilização de resistências que serviram para medir a potência de saída dos dispositivos (figura 3.8). A resistência foi ligada aos cabos

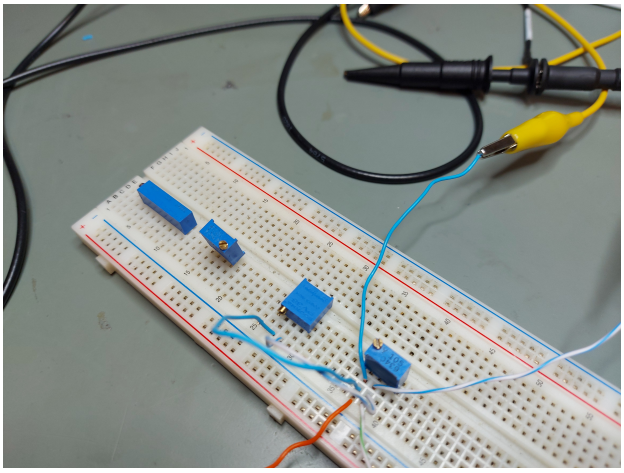


Figura 3.8: Resistências variáveis usadas no circuito.

do dispositivo e depois mediu-se a tensão eficaz dos terminais da resistência recorrendo ao osciloscópio. Sabendo o valor da resistência (R) e da tensão de saída (V_{RMS}) podemos determinar a potência de saída do dispositivo recorrendo à expressão:

$$P_{saída} = \frac{V_{RMS}^2}{R} \tag{3.3}$$

O estudo foi realizado para os dispositivos na sua frequência de ressonância respetiva e a uma aceleração constante de 1g, com uma incerteza de medição de 0.04g.

A figura 3.9 apresenta os resultados do estudo, onde pode ser observado, tal como no Capítulo anterior, um máximo de potência que corresponde a um valor de resistência de carga ótima para esse dispositivo. Na tabela 3.2 temos registado os valores de resistência de carga ótima ($R_{ótima}$) e de potência máxima ($P_{máx}$) obtidos. Foram também calculados:

- os desvios entre os valores experimentais da resistência e da simulação numérica;
- as razões entre a potência máxima experimental e a obtida da simulação numérica.

A partir destes resultados foram realizadas as seguintes observações: 1) o PPA-1001 apresenta um desvio de 33% entre o valor experimental de resistência de carga ótima e o valor da simulação; 2) o PPA-1021 apresenta um desvio de 44% para a resistência de carga

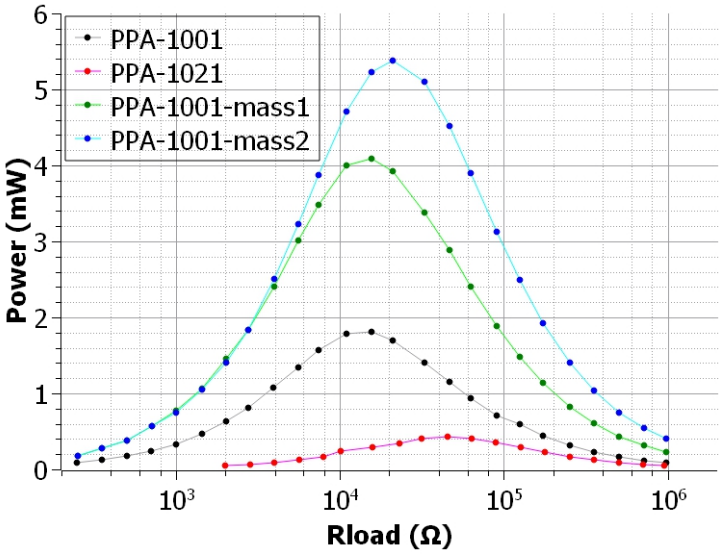


Figura 3.9: Resultados experimentais da determinação das potências máximas e resistências de carga ótimas para os diferentes dispositivos.

Dispositivo	$R_{ótima}(k\Omega)$	$R_{opt}(k\Omega)$	Desvio (%)	$P_{máx}$ (mW)	P_e (mW)	Razão
PPA-1001	13.25	10.000	33	1.81	0.29198	6.2
PPA-1021	45.60	31.623	44	0.43	0.074677	5.8
PPA-1001-mass1	15.60	-	-	4.09	-	-
PPA-1001-mass2	21.10	-	-	5.39	-	-

Tabela 3.2: Valores das potências máximas ($P_{máx}$) e resistências de carga ótima ($R_{ótima}$) dos dispositivos. Valores do desvio da resistência de carga relativamente ao valor simulado (R_{opt}) e da razão entre potência experimental e potência obtida em simulação (P_e).

ótima, que confirma a existência de diferenças entre o simulado e o real; 3) a resistência ótima diminui do PPA-1021 para o PPA-1001, no entanto a adição de massa de prova e o aumento da mesma também influencia a resistência de carga ótima aumentando-a; 4) os valores das potências de saída máximas obtidos experimentalmente apresentam ser aproximadamente seis vezes superiores que os obtidos na simulação numérica; 5) à medida que a frequência de ressonância diminui a potência aumenta, no casos do PPA-1001 esta relação ocorre devido à adição da massa de prova; entre o PPA-1001 sem massa e o PPA-1021 a diferença entre potências está associado à geometria e diferença de constituições.

3.1.2.3 Determinação da dependência com a aceleração

Na determinação da dependência da resposta dos cantiléveres com a aceleração foi usada a montagem descrita na subsecção 3.2.2. Desta vez foi fixado o valor de resistência de carga ótima e a frequência de ressonância para cada dispositivo, fazendo variar a aceleração aplicada pelo gerador de vibrações. Realizou-se para quase todos os dispositivos um varrimento de acelerações dentro do intervalo de 0.25g e 2g, fazendo um passo de 0.25g. A

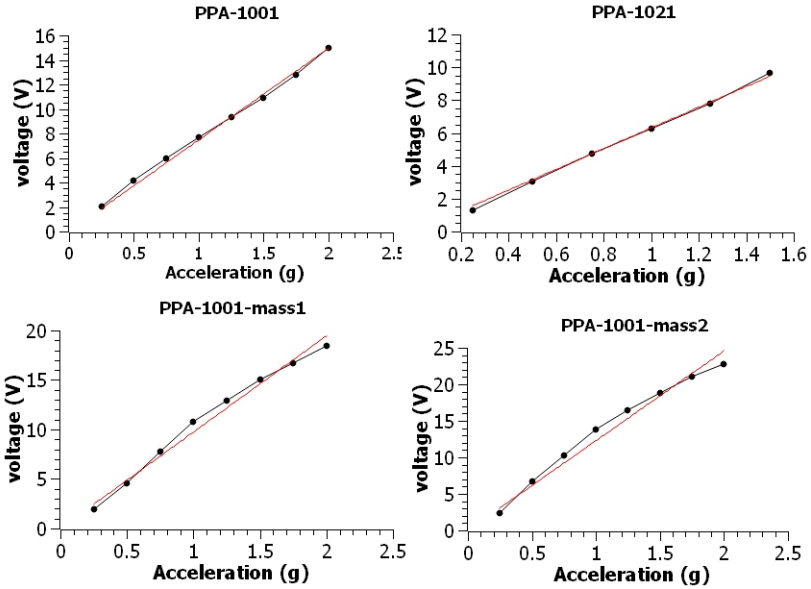


Figura 3.10: Resultados da dependência da tensão RMS com a aceleração.

Gráfico	m (V/g)	incerteza (%)
PPA-1001	7.46	1.1
PPA-1021	6.31	1.3
PPA-1001-mass1	9.73	2.1
PPA-1001-mass2	12.28	2.5

Tabela 3.3: Resultados do ajuste linear para os gráficos da figura 3.10.

única exceção foi o PPA-1021, que para a sua frequência de ressonância tornou-se difícil alcançar valores de aceleração estáveis acima dos 1.5g, levando a serem desconsiderados os dados superiores a esse limite. Durante este processo registou-se os valores de tensão RMS e de potência de saída máxima recorrendo à equação 3.3. Os dados estão presentes nas figuras 3.10 e 3.11.

Para os dados da tensão foi realizado um ajuste linear para cada gráfico, uma vez que dependência da tensão de saída com a aceleração é proporcional. Na tabela 3.3 estão os parâmetros obtidos no ajuste do tipo $V = mA$, em que V é a tensão RMS registada e A a amplitude da aceleração aplicada. Os parâmetros de ajuste obtiveram incertezas inferiores ou iguais a 2.5 %, o que indica que existe uma relação de proporcionalidade entre a tensão de saída e a aceleração. No entanto, existe desvios superiores dos dados à reta de ajuste para os casos com massa de prova, que resulta da dificuldade obtida na medição dos valores devido à limitação da montagem experimental. Por outro lado, para os dispositivos PPA-1001 verifica-se que a existência de uma massa de prova aumenta o declive (m) da reta de tendência como era observado nos resultados simulados. Tal como no caso do PPA-1021 e do PPA-1001, temos uma diferença de declives em que o menor é o do primeiro tal como

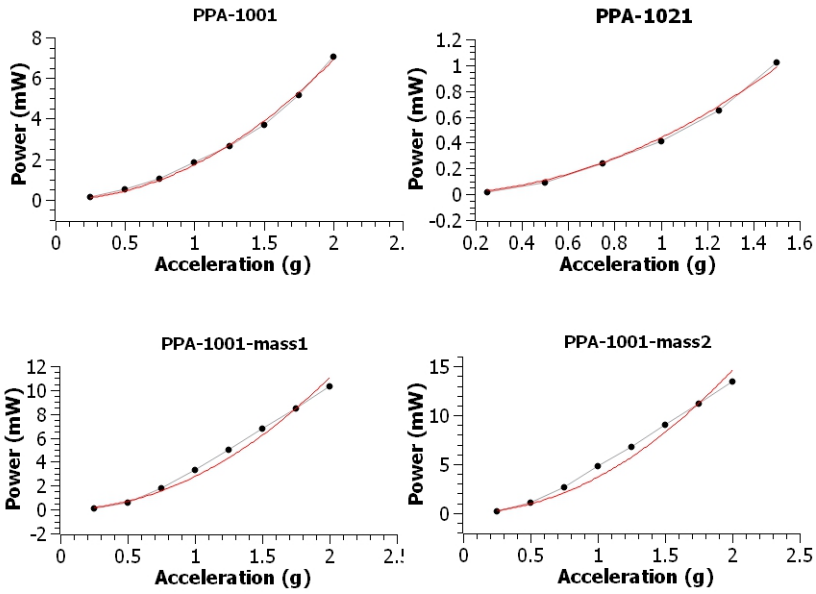


Figura 3.11: Resultados da dependência da potência máxima com a aceleração.

Gráfico	a (mW/g^2)	incerteza (%)
PPA-1001	1.72	1.2
PPA-1021	0.44	2.3
PPA-1001-mass1	2.76	2.9
PPA-1001-mass2	3.66	3.8

Tabela 3.4: Resultados do ajuste não-linear para os gráficos da figura 3.11.

era previsto.

Para os dados da potência foi realizado um ajuste não-linear para cada gráfico, já que a potência de saída dos cantiléveres apresenta ser proporcional ao quadrado da aceleração. Na tabela 3.4 estão os parâmetros obtidos no ajuste do tipo $P = aA^2$, em que P é a potência média máxima de saída e A a amplitude da aceleração aplicada. Os valores do ajuste apresentam incertezas inferiores ou iguais a 3.8% o que indica que a potência elétrica é proporcional ao quadrado da amplitude da aceleração. O parâmetro a indica-nos o sentido da concavidade da função e o seu aumento representa um «fechar» da função, no nosso caso é possível verificar uma correspondência entre os comportamentos reais e simulados, uma vez que a presença de massa de prova faz esse parâmetro a aumentar se compararmos entre o PPA-1001 e PPA-1021, o último apresenta menor valor tal como esperado.

3.1.2.4 Determinação da dependência com a massa de prova

A determinação da dependência com a massa de prova tornou-se essencial para determinar quais a massas a colocar no dispositivo para fazer o seu afinamento da ressonância

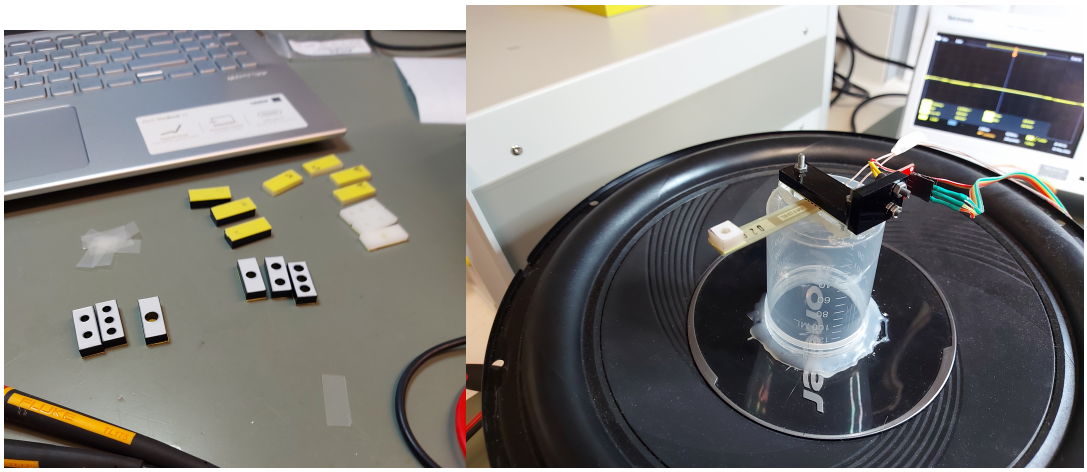


Figura 3.12: Exemplos de massas em acrílico desenhadas a laser para serem utilizadas no processo experimental.

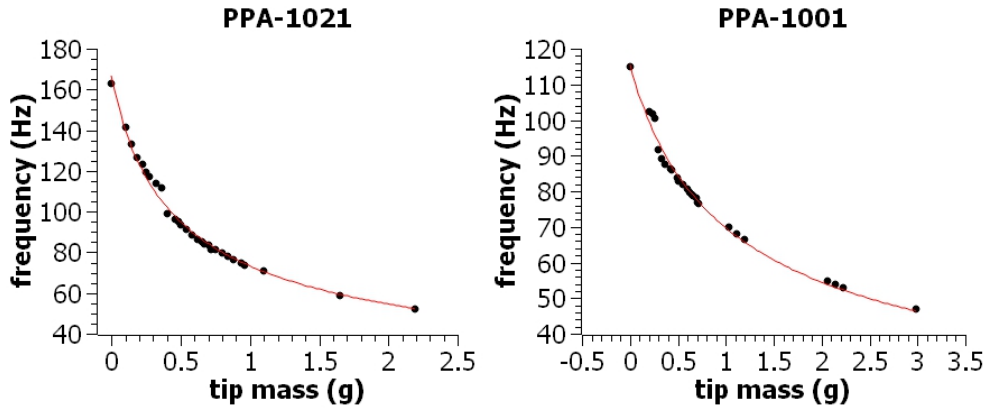


Figura 3.13: Resultados experimentais da dependência da frequência de ressonância com a massa de prova para os dois dispositivos.

para o valor pretendido. Durante esta parte foram desenvolvidas massas através da técnica de corte laser em acrílico. Na figura 3.12 temos algumas das massas utilizadas neste estudo, estas foram fixadas nos cantiléveres com a ajuda de um adesivo. O procedimento adotado passou pela fixação da massa no dispositivo e depois realizar o varrimento da frequência de vibração até ser atingida a ressonância e registar esse valor Os valores registados para ambos os dispositivos estão presentes nos gráficos da figura 3.13. Realizou-se o ajuste não-linear dos dados, recorrendo à expressão:

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_e}{m_e + m_{tip}}} \tag{3.4}$$

, esta expressão resulta da equação 1.14 [19, 20, 13, 7], o f é a frequência de ressonância do dispositivo, k_e é o coeficiente de rigidez efetivo do sistema, m_e a massa efetiva do sistema sem massa de prova (m_{tip}). Na tabela 3.5 temos os valores do parâmetros k_e e m_e do ajuste,

Dispositivo	m_e (g)	Δm_e (%)	m_{ef} (g)	erro (%)	k_e (N/m)	Δk_e (%)	k_{ef} (N/m)	erro (%)
PPA-1001	0.57	5.3	0.92	38	301.39	3.0	452.15	33
PPA-1021	0.24	3.8	0.16	33	262.58	1.8	261.21	0.5

Tabela 3.5: Parâmetros do ajuste não-linear dos gráficos da figura 3.13 com respetivas incertezas relativas (Δ). Comparação dos parâmetros e dados fornecidos pela ficha de informação dos dispositivos [7]. Os valores m_{ef} e k_{ef} são os valores fornecidos.

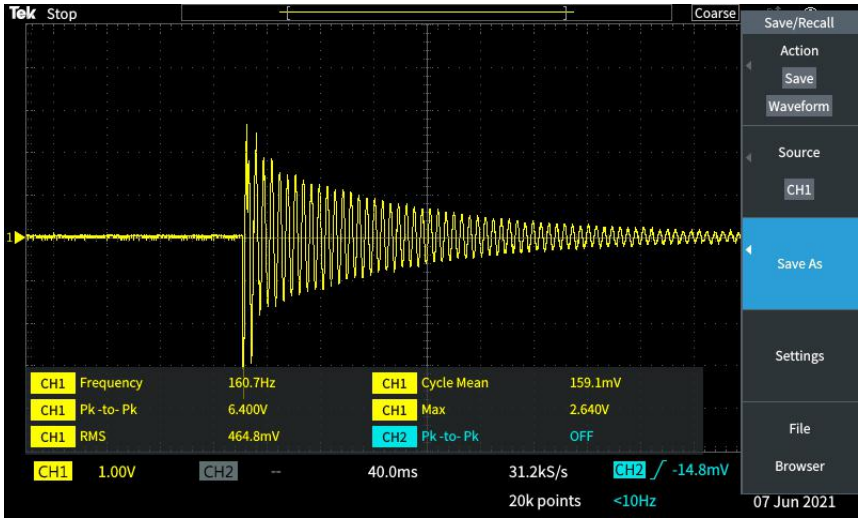


Figura 3.14: Exemplo de uma resposta do cantiléver com amortecimento, na figura temos o caso do PPA-1021.

mais as suas incertezas associadas. Por fim, estes valores foram comparados aos fornecidos pelo fornecedor do dispositivo. Na tabela 3.5 temos registados os erros resultantes da comparação realizada.

3.1.2.5 Estudo do amortecimento dos dispositivos

Uma forma de caracterizar um sistema oscilatório é a determinação do seu fator de qualidade (Q). Este fator é responsável por descrever o quão amortecido é o sistema. [25] Por outras palavras, o amortecimento é um efeito que nos reduz a eficiência de conversão energética dos coletores deste tipo.

Este estudo passou pela realização de um impacto no dispositivo montado e foi analisado o sinal de saída resultante dessa ação. Na figura 3.14 temos um exemplo da visualização dessa resposta nos osciloscópio. Foram extraídos os dados do osciloscópio e realizamos um ajuste não-linear para o comportamento do PPA-1001 e PPA-1021 (figura 3.15).

O ajuste foi baseado na expressão geral de um sinal sinusoidal amortecido:[25]

$$V = V_0 e^{-\alpha(t+t_0)} sen(\omega(t+t_0)) \tag{3.5}$$

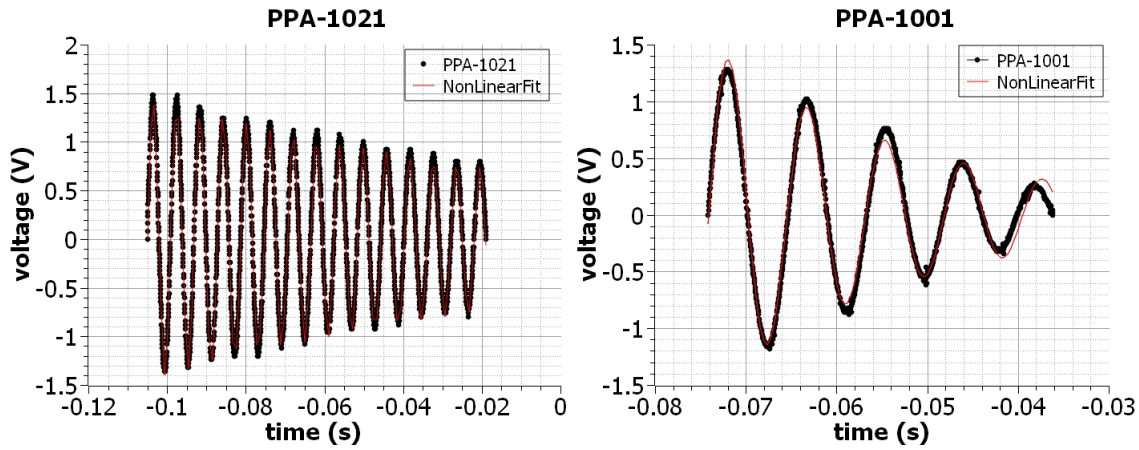


Figura 3.15: Determinação dos parâmetros dos resultados experimentais do estudo do amortecimento dos dispositivos.

Gráfico	V_0(V)	incerteza (%)	t_0(s)	incerteza (%)	α (s^{-1})	incerteza (%)	ω (s^{-1})	incerteza (%)
PPA-1001	1.51	0.7	0.074	0.01	42.46	1.0	726.53	0.06
PPA-1021	1.45	0.2	0.11	0.001	7.88	0.6	1058.77	0.005

Tabela 3.6: Parâmetros do ajuste não-linear dos gráficos da figura 3.15.

,onde V corresponde ao valor da tensão, V_0 é valor inicial da tensão, α é a constante de decaimento, t é o tempo, t_0 é o instante inicial, e ω é a frequência angular do sistema ($\omega = 2\pi f$). Na tabela 3.6 estão os valores dos parâmetros obtidos do ajuste, com as respetivas incertezas.

Conhecendo o valor da constante de decaimento e a frequência angular foi determinado o coeficiente de amortecimento (ζ) e o fator de qualidade (Q) através das seguintes equações: [25]

$$\zeta = \frac{\alpha}{\omega} \tag{3.6}$$

$$Q = \frac{1}{2\zeta} = \frac{\omega}{2\alpha} \tag{3.7}$$

Na tabela 3.7 temos uma comparação entre os fatores de qualidade obtidos da atividade experimental e os fornecidos na ficha informativa. Verificou-se diferenças entre os valores, ambos são superiores a 0.5 o que indica que estamos perante um sistema subamortecido, no entanto era esperado um valor superior para o PPA-1001 e um valor inferior para o PPA-1021, embora ambos apresentem a mesma relação de diferença nas duas situações, o que indica que o PPA-1021 é menos amortecido que o PPA-1001.

Em último lugar este estudo foi realizado para formular uma possível explicação para as diferenças obtidas entre os resultados experimentais e os da simulação numérica. Uma vez que as geometrias e as estruturas dos modelos são muito próximas à realidade podemos

Dispositivos	Q	Q_f	erro (%)
PPA-1001	8.56	14.9	43
PPA-1021	67.18	25.6	162

Tabela 3.7: Comparação dos fatores de qualidade obtidos e os fornecidos pela ficha informativa [7]. Os valores de Q_f correspondem aos fornecidos.

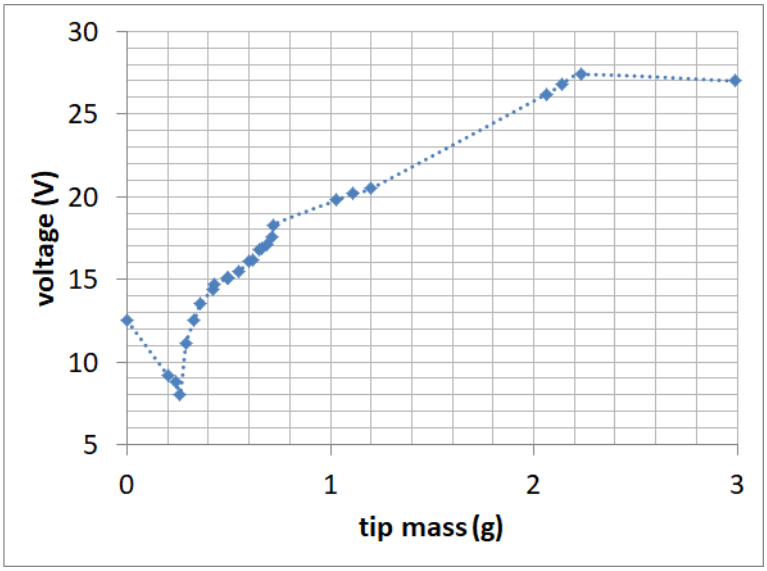


Figura 3.16: Resposta em tensão RMS com a adição de massas de prova para o dispositivo PPA-1001.

concluir que as divergência estará associada à diferença dos coeficientes de amortecimento utilizados. Nas simulações introduziu-se um amortecimento correspondente ao valor do fator de qualidade fornecido (Q_f), no entanto nas condições experimentais estes valores são diferentes. Assim podemos concluir que esta será a razão mais provável para as diferenças entre resultados.

3.1.2.6 Deteção do efeito de amortecimento por massa nos dispositivos

Durante o estudo da dependência com a massa de prova, verificou-se um comportamento dos dispositivos que se afastava ao esperado nos modelos vistos nos Capítulos 1 e 2. Durante a introdução das massas de prova nos cantiléveres foi detetado uma diminuição da tensão de saída para as massas mais leves. Este efeito pode ser observado nos gráficos das figuras 3.16 e 3.17. Como este efeito afetou o dispositivo PPA-1021 numa das ressonâncias que pretendíamos estudar (utilizada em simulação, pode ser observada na tabela 2.4 de síntese dos resultados), então decidiu-se não utilizar este cantiléver com essa massa de prova.

No entanto foi colocada uma hipótese que pode explicar este acontecimento. A adição da massa de prova pode estar a funcionar como um agente que causa esse efeito obser-

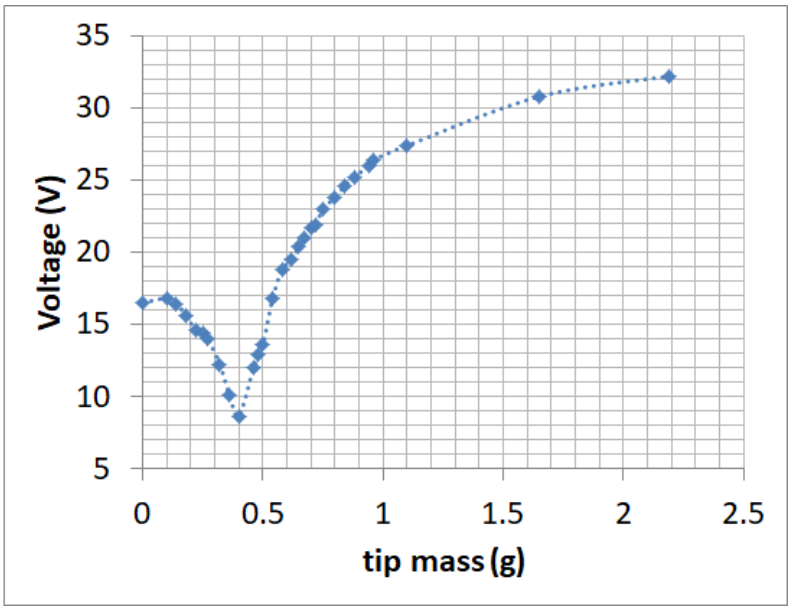


Figura 3.17: Resposta em tensão RMS com a adição de massas de prova para o dispositivo PPA-1021.

vado. Este tipo de amortecimento é utilizado muitas vezes para reduzir a intensidade das oscilações dos sistemas que se encontram em ressonância, este fenómeno foi analisado por João Nunes na sua dissertação [26]. Uma forma de observar este efeito é através da visualização de uma redução da amplitude de vibração que o sistema tem na sua frequência de ressonância.

Assim no caso de um cantiléver piezoelétrico uma redução de amplitude de oscilação irá se traduzir uma diminuição na tensão de saída do dispositivo. Deste modo quando feito o varrimento em frequência do dispositivo PPA-1021 com uma massa de prova que afina a sua ressonância para aproximadamente 100 Hz é observado um mínimo de tensão no local onde deveria ser um máximo. Na figura 3.18 temos o gráfico que nos permite visualizar esse efeito.

3.1.2.7 Provas de conceito dos dispositivos

Foram realizadas provas de conceito com os dispositivos que permitiram tirar algumas informações qualitativas sobre as possíveis aplicações que os dispositivos poderiam ter. Construiu-se um circuito capaz de retificar a saída elétrica de um cantiléver (figura 3.19). Este circuito serviu para podermos ligar o coletor de energia a um sistema de consumo elétrico de corrente continua.

Numa primeira fase, ligou-se uma fita de LEDs que requeria uma tensão de 5V (figura 3.20). Este teste serviu para comprovar que os coletores não apresentam potência elétrica

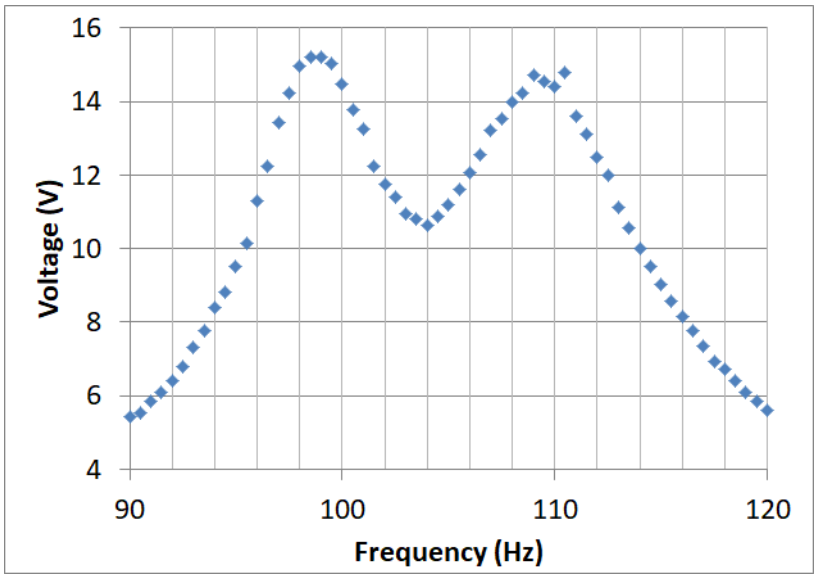
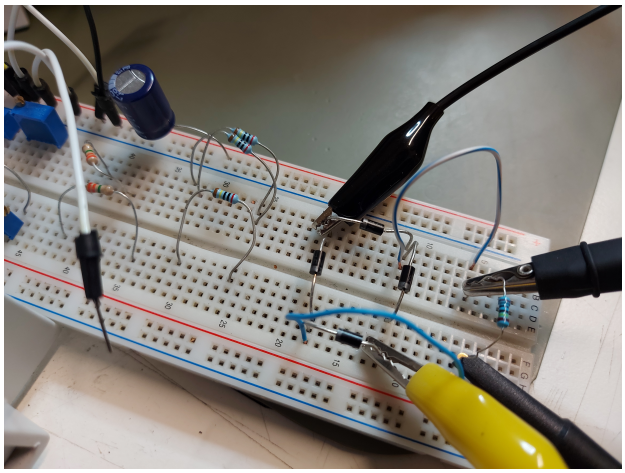
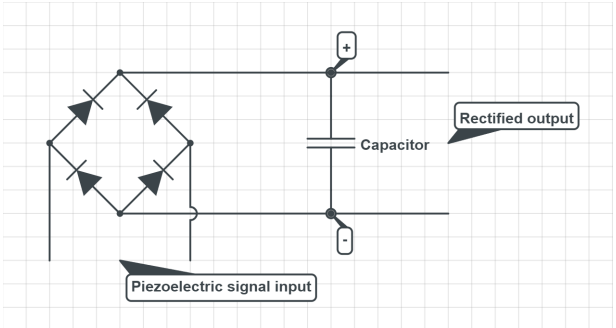


Figura 3.18: Visualização do efeito de amortecimento por adição de uma massa de 0.40g no dispositivo PPA-1021.



(a)



(b)

Figura 3.19: (a) Construção de um circuito retificador. (b) Esquema do circuito retificador utilizado.

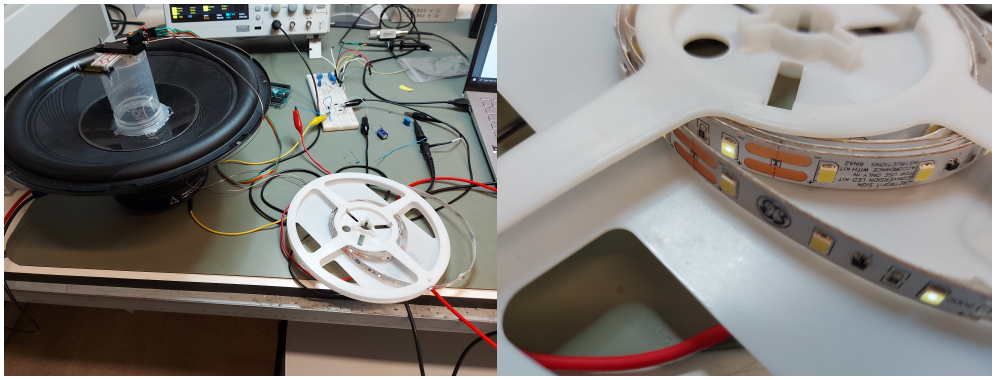


Figura 3.20: Alimentação de uma fita LED de 5V.

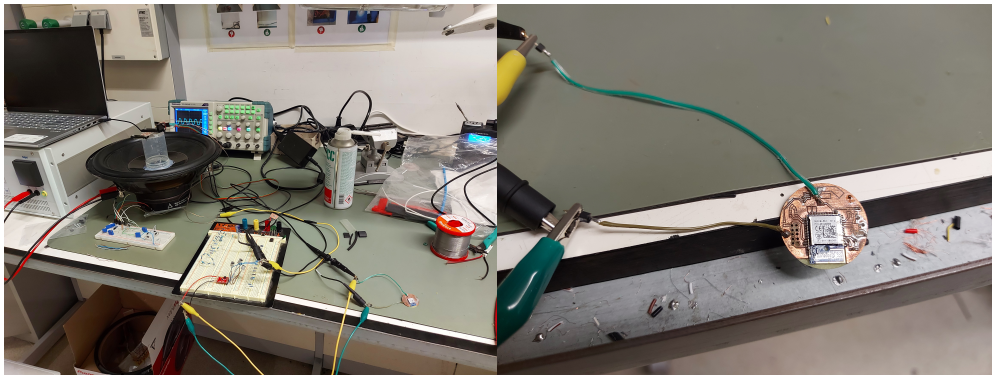


Figura 3.21: Alimentação de uma antena Bluetooth.

suficiente apesar de produzirem tensões que cobrem o valor requerido pelos LEDs. De todos os dispositivos o PPA-1001 com massa de prova 2 permitiu acender a fita com maior intensidade que os outros.

Numa segunda fase, testou-se a capacidade de fazer uma antena Bluetooth funcionar (figura 3.21). Embora o dispositivo PPA-1001 com massa 2 apresentasse melhor resultado, este só conseguia fazer a antena ligar para ser detetada, mas na tentativa de conexão a antena não tinha energia suficiente por isso desligava-se.

Por fim, analisou-se o carregamento de um condensador de 660 μF (na figura 3.22 podemos visualizar o sinal dos terminais de um condensador em carregamento) e obteve-se os resultados da tabela 3.8 para o PPA-1001 e PPA-1021.

Dispositivo	Q (C)	U (V)	T (s)	$P_{médio}$ (mW)
PPA-1001	0.0106	16	274	0.308
PPA-1021	0.0107	16.2	371	0.233

Tabela 3.8: Resultados obtidos do teste de carregamento de condensador. Na tabela estão os valores da carga acumulada (Q), a tensão máxima atingida (U), o tempo de carga (T) e a potência média de carregamento.

Assim, foi possível verificar que para fazer algum tipo de alimentação de um destes

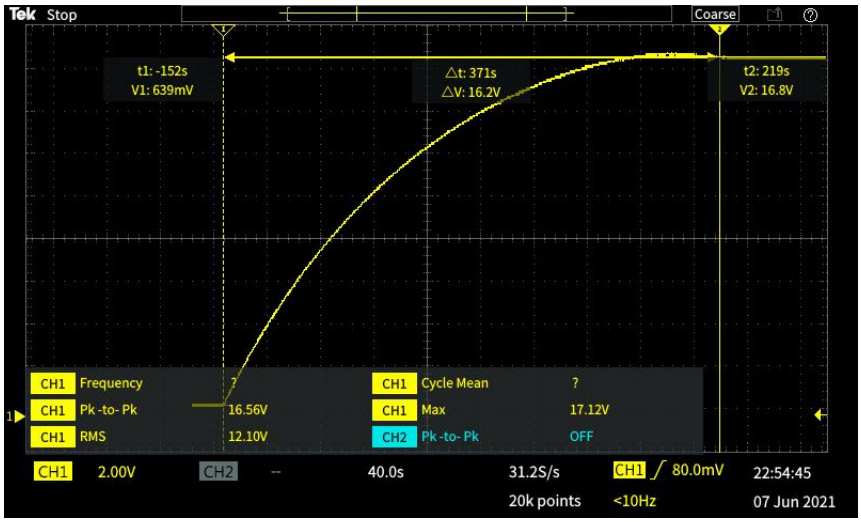


Figura 3.22: Exemplo de um carregamento de um condensador. Carregamento com o PPA-1021.

dispositivos seria necessário uma combinação de vários coletores para obtermos potência elétrica suficiente.

3.2 Desenvolvimento do sistema *skateboard-harvester*

3.2.1 Estrutura do sistema e procedimento utilizado

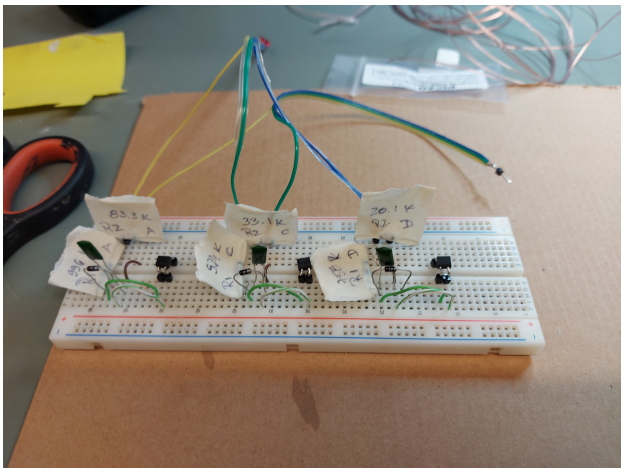
Nesta secção foi desenvolvida como prova de conceito uma estrutura constituída por coletores piezoelétricos capaz de ser acoplada ao *skateboard*, de forma a demonstrar os resultados e simulação numérica realizada ao longo da presente tese.

Para cada *skateboard* planeou-se a utilização de três dispositivos no skateboard, como forma de garantir uma potência gerada suficiente para poder alimentar sistemas eletrónicos, como por exemplo um sistema de LEDs, uma antena *Bluetooth* ou sensores. Desta forma tornou-se necessária a montagem de três circuitos que iriam retificar a saída dos dispositivos e limitar a tensão de saída (figura 3.23). Nesta fase pretendeu-se visualizar a resposta dos dispositivos enquanto o *skateboard* se movia. Para tal recorreu-se ao sistema Arduino como forma de medir a tensão de saída, no entanto as entradas estão limitadas a uma tensão DC de 5V. Deste modo, os circuitos eram constituídos por um circuito integrado que fazia a função de uma ponte de díodos retificadora. Para garantir que não se passava o limite de tensão aceite pelo Arduino incluiu-se um divisor de tensão para reescalar o valor da tensão de saída e adicionou-se um díodo Zener de 4.7V em paralelo na configuração inversa de forma a fechar o circuito quando é atingida a tensão de *breakdown* e assim limitar a tensão de saída do retificador.

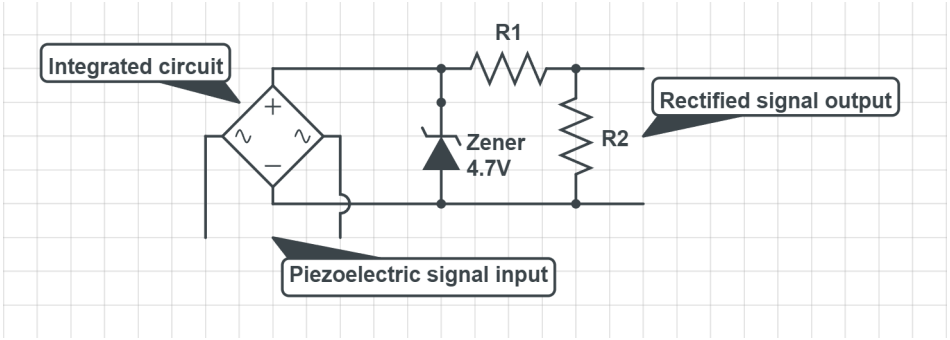
Nas figuras 3.24 e 3.24 observa-se fotografia do sistema *skateboard-harvester* inicial que nos permitiu tirar os resultados preliminares da resposta de cantiléveres piezoelétricos num *skateboard* em movimento. A estrutura utilizada foi construida com acrílico cortado numa mesa laser, e esta foi montada em baixo da tábua do *skateboard* e aparafusada na base do eixo da roda. A escolha desta localização deveu-se à hipótese estar mais suscetível às vibrações que o sistema está sujeito.

Como forma de realizar um estudo em ambiente de laboratório controlado decidiu-se observar a resposta do sistema coletor fixo ao *skateboard* sobre vibrações de frequências fixas geradas pelo gerador de vibrações utilizado no trabalho. Na figura 3.25 podemos visualizar essa montagem experimental.

Por fim, levou-se o sistema *skateboard-harvester* para executar uma experiência em ambiente real, para uma estrada de alcatrão inclinada. A escolha deste ambiente de testes deveu-se à premissa de que esta seria uma das principais vias que seriam utilizadas para circular com o *skateboard* e que devido à sua superfície irregular esta permitiria gerar vibrações superiores no sistema. Por outro lado, a opção da inclinação deveu-se ao facto de garantir uma aceleração constante de forma a garantir algum controlo sobre a velocidade



(a)



(b)

Figura 3.23: (a) Circuitos montados com circuito integrado retificador, divisores de tensão e díodos Zener. (b) Esquema representativo de cada circuito.

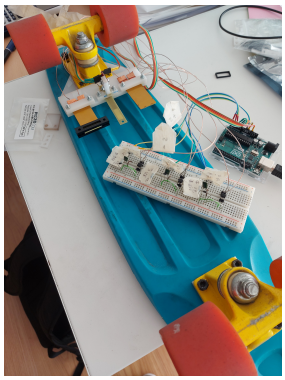
a que o sistema está sujeito para se poder realizar repetições dos testes.

3.2.2 Testes e resultados

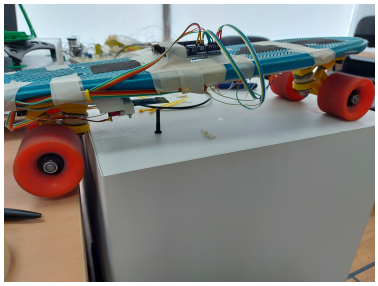
3.2.2.1 Caracterização do sistema *skateboard-harvester*

Recorrendo a dois acelerómetros, caracterizou-se as frequências das vibrações a que o *skateboard* está sujeito enquanto se encontra em movimento sobre uma superfície de alcatrão - em ambiente real. O principal objetivo destes estudos era expor as frequências características do nosso sistema para podermos definir quais os dispositivos mais indicados para serem emparelhados ao *skate*.

Inicialmente testou-se o efeito que a velocidade linear do *skateboard* tem sobre as vibrações geradas na direção perpendicular ao movimento (considerada como a direção do eixo do zz no nosso estudo). Recorrendo a uma aplicação foi possível utilizar o acelerómetro de um smartphone para se poder retirar estes resultados presentes na figura 3.26. Fixou-se o smartphone ao skate e realizaram-se testes nos quais era variada a velocidade.



(a)



(b)

(c)

Figura 3.24: (a) Fixação da estrutura em acrílico, e ligação dos dispositivos aos respetivos circuitos. O sistema *skateboard-harvester* nas figuras (b) e (c).

Considerou-se para este estudo a velocidade V1 que foi a mais lenta, V2 a intermédia e V3 a velocidade mais elevada.

Na figura 3.26 temos representado para cada velocidade o gráfico da dependência temporal da aceleração, a respetiva transformada de Fourier normalizada e uma suavização dos dados («smooth») do gráfico da transformada de modo a diminuir o ruído. Para o caso V1, detetou-se acelerações com uma amplitude próxima de 2g e com uma frequência de oscilação num intervalo próximo dos 50Hz. No V2, foram obtidas acelerações superiores ao caso anterior, com valores dentro do intervalo de 2 - 3g, e com um máximo de amplitude no espetro de frequências perto dos 75 Hz. Para V3 a aceleração atingiu os 4g e o máximo do espetro das frequências encontra-se próximo dos 100Hz. Destes resultados verificou-se que as vibrações perpendiculares ao deslocamento do skate sobre o alcatrão estão dependentes

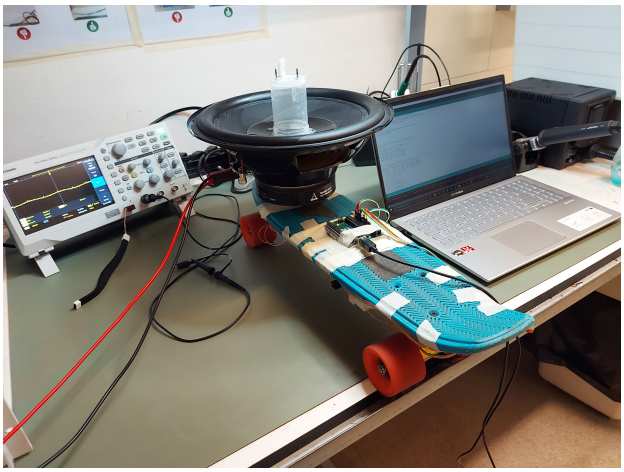


Figura 3.25: Montagem do estudo de caracterização com vibrações controladas pelo gerador de vibrações.

da velocidade linear do sistema, para velocidades superiores as acelerações das vibrações aumentam e a frequência das mesmas também parece aumentar. O comportamento da frequência pode estar associado à forma como o sistema se movimenta sobre uma superfície rugosa como o alcatrão, neste caso para maiores velocidades significa um aumento da rotação das rodas do skate e por isso uma passagem mais rápida pelas elevações presentes no alcatrão. Embora tal sejam observados essas variações, existe uma semelhança em todos os espetros que é a existência de um máximo relativo num intervalo de frequências próximas de 50Hz. Isto poderá indicar a presença de uma frequência natural do sistema, sendo interessante afinar os cantiléveres a esta frequência.

Após a preparação do acelerómetro Arduino, este foi incluído na estrutura de caracterização do sistema coletor (figura 3.24). Primeiramente, realizou-se uma análise do comportamento vibracional do *skateboard* no alcatrão através deste sensor. Na figura 3.27 estão os gráficos correspondentes ao estudo realizado. Durante o movimento do skate num piso inclinado de alcatrão este apresentava acelerações perpendiculares à direção do deslocamento com amplitudes no intervalo de 1g a 2g e com duas frequências características uma próxima dos 70Hz e outra num intervalo próximo de 165Hz. Contudo verificou-se uma contribuição de um sinal ruidoso constante que funcionou como um desvio dos valores da aceleração, esse efeito pode ser explicado pela presença de um pico na origem dos espetros.

Para realizar a fase seguinte de estudos foram escolhidos os dispositivos PPA-1001, PPA-1021 e o PPA-1001 com massa 2, pois estes apresentam um intervalo de frequências que seria capaz de cobrir grande parte das vibrações que o skate está exposto durante o seu movimento. Uma primeira abordagem será a introdução do gerador de vibrações

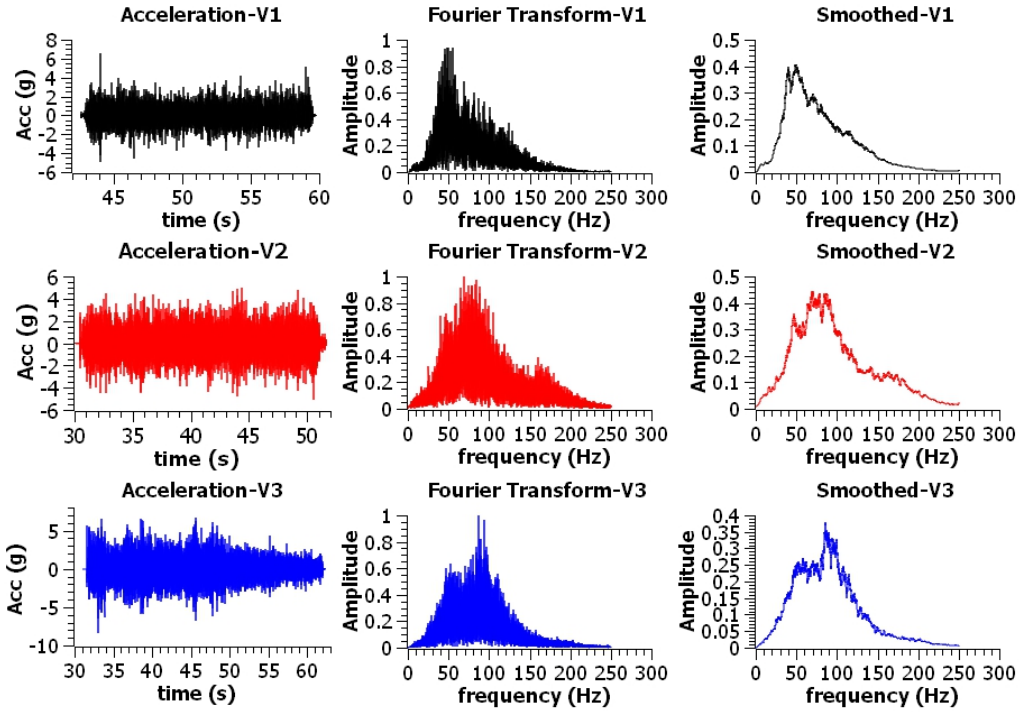


Figura 3.26: Resultados do primeiro estudo da dependência da frequência com a velocidade do *skateboard*.

para excitar o sistema *skateboard-harvester* com frequências constantes e bem definidas para avaliar a respostas dos três dispositivos montados, deste modo poderemos avaliar a qualidade das respostas do sistema ainda num ambiente controlado. O ultimo passo do estudo consistiu no teste de circulação na estrada inclinada de alcatrão, onde foi possível analisar a resposta do sistema em condições mais próximas da realidade.

3.2.2.2 Resultados do sistema *skateboard-harvester*

Em primeiro lugar, temos o estudo com o gerador de vibrações (montagem da figura 3.25). Foram aplicadas no sistema três frequências diferentes todas com uma aceleração constante de 1g. Em cada gráfico temos a aceleração medida pelo acelerómetro Arduino e a resposta em tensão dos cantiléveres que foi medida pelo Arduino. Os valores da tensão foram suavizados recorrendo a uma média móvel dos dados com um intervalo de 55 pontos de forma a obter o valor médio de tensão ao longo do tempo de aquisição. Na tabela 3.9 temos a síntese dos resultados dos gráficos das figuras 3.28, 3.29 e 3.30.

Em todos os casos verificou-se uma redução da aceleração detetada pelo acelerómetro Arduino, este facto deveu-se a duas razões: 1) a estrutura do *skateboard* amortece as forças que o gerador aplica no *skate*; 2) as vibrações foram geradas com a base da coluna Subwoofer e não com a membrana. Contudo no caso dos 115.5Hz acontece um amorteci-

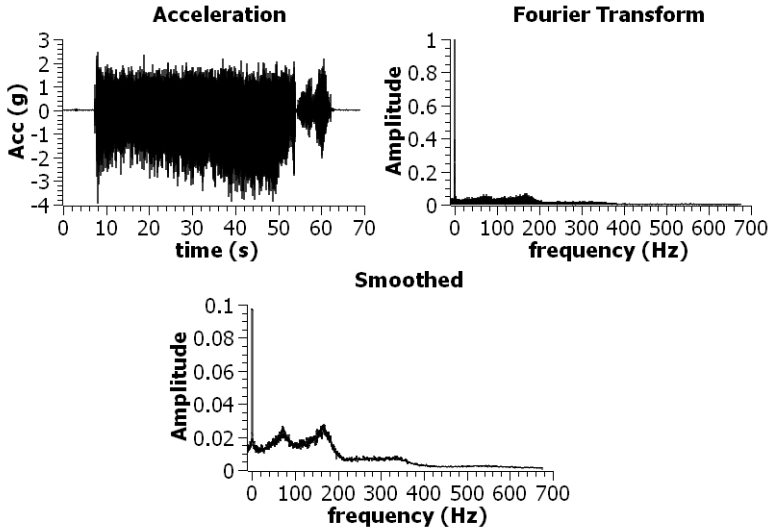


Figura 3.27: Resultados obtidos com o acelerómetro Arduino.

mento superior, que poderá estar relacionado com a estrutura do gerador (neste intervalo de frequências a montagem apresenta uma baixa transferência de energia mecânica gerada para o *skateboard*, no gráfico da calibração (figura 3.5) é visível um mínimo de acelerações geradas perto dessa frequência). Foi constatado que para cada frequência testada o dispositivo que apresentou maior valor de tensão de saída era o que tinha a sua ressonância próxima dessa frequência.

f (Hz)	A (g)	Δ (%)	PPA-1001 (V)	Δ (%)	PPA-1021 (V)	Δ (%)	PPA-1001-mass2 (V)	Δ (%)
115.5	0.11	9.0	0.77	3.9	0.025	20	0.01	50
163.5	0.3	3.3	0.4	2.5	0.47	4.0	0.045	22
53.5	0.35	7.1	0.225	6.7	0.01	50	0.45	3.3

Tabela 3.9: Amplitudes de aceleração (A) e valores de tensão média de saída dos dispositivos com as respetivas incertezas relativas (Δ). Os resultados tabelados foram obtidos dos gráficos das figuras 3.28, 3.29 e 3.30.

Na figura 3.31 temos os resultados dos últimos testes realizados que consistiram em colocar um utilizador a descer uma estrada de alcatrão inclinada com o sistema. Tal na análise de dados anterior é apresentada a aceleração detetada no acelerómetro Arduino, os valores da tensão de saída dos dispositivos e a respetiva representação gráfica dos valores médio da tensão.

A aceleração que o sistema tem na direção perpendicular ao seu deslocamento na superfície consegue atingir valores no intervalo de 1g a 2g. As tensões médias do PPA-1001 rondam os 0.8V com máximos de 1V; o PPA-1021 apresenta valores médios de 0.5V com máximos de 0.7V e o PPA-1001 com massa 2 tem uma tensão de saída média de 0.6V e um máximo de 0.74V.

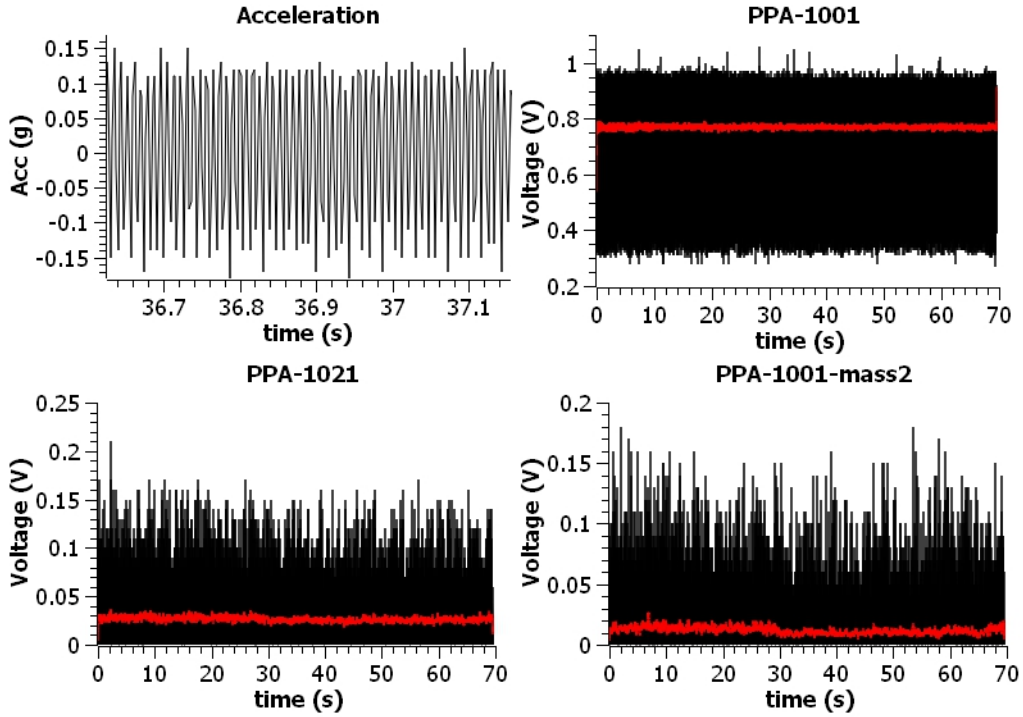


Figura 3.28: Estudo do sistema *skateboard-harvester* com o gerador de vibrações numa frequência de 115.5Hz e aceleração de 1g.

Estes resultados mostram um desvio ao que se previa pelas análises anteriores. De acordo com o estudo das ressonâncias dos dispositivos estes poderiam atingir tensões de circuito aberto superiores ou iguais a 10V quando estes estão na sua ressonância o que significaria que os resultado deveriam estar saturados, uma vez que tínhamos limitado a saída dos dispositivos para 5V. Por isso estes últimos resultados indicam que a potência elétrica gerada seria mais baixa do que o previsto. Tal como foi observado nos espetros das figuras 3.26 e 3.27 o movimento do sistema permitia a existência de vibrações mecânicas perpendiculares ao deslocamento em que os máximos da amplitude do espetro aconteciam em intervalos de frequência que continham as ressonâncias dos dispositivos.

Por um lado, a existência da contribuição de outras frequências no nosso espetro, criou um desvio ao previsto. Este fenómeno é designado de Interferência Destrutiva que normalmente ocorre com a sobreposição de ondas com frequências diferentes. [25] Um dos principais efeitos desse fenómeno é a diminuição da amplitude das oscilações que neste caso é refletido numa diminuição da amplitude das vibrações mecânicas que excitam os cantiléveres diminuindo assim a sua tensão elétrico gerada.

Assim, podemos verificar que este sistema não consegue garantir um funcionamento eficaz dos coletores, uma vez que estes nas condições corretas para uma configuração cantiléver podem apresentar potências elétricas superiores para vibrações mecânicas com ace-

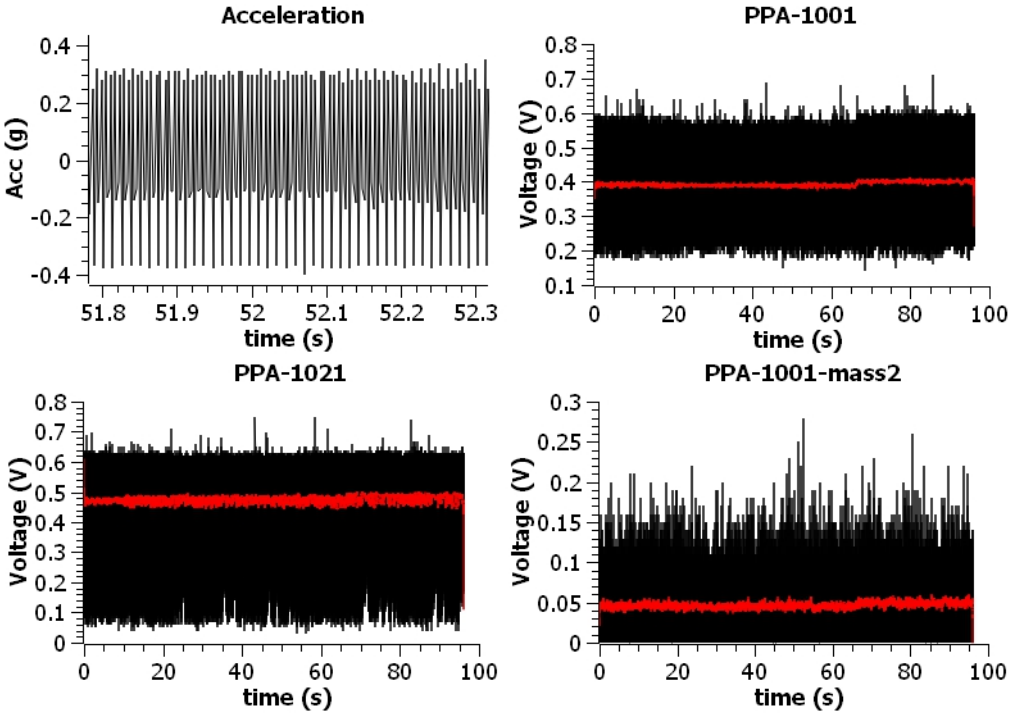


Figura 3.29: Estudo do sistema *skateboard-harvester* com o gerador de vibrações numa frequência de 163.5Hz e aceleração de 1g.

lerações idênticas às medidas neste último estudo.

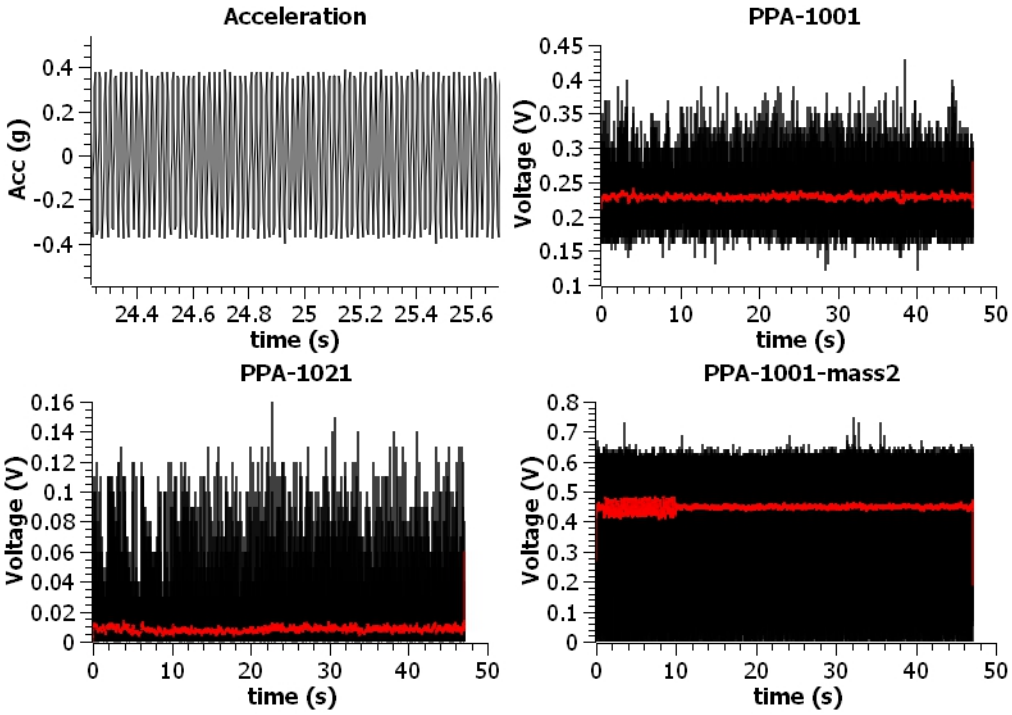


Figura 3.30: Estudo do sistema *skateboard-harvester* com o gerador de vibrações numa frequência de 53.5Hz e aceleração de 1g

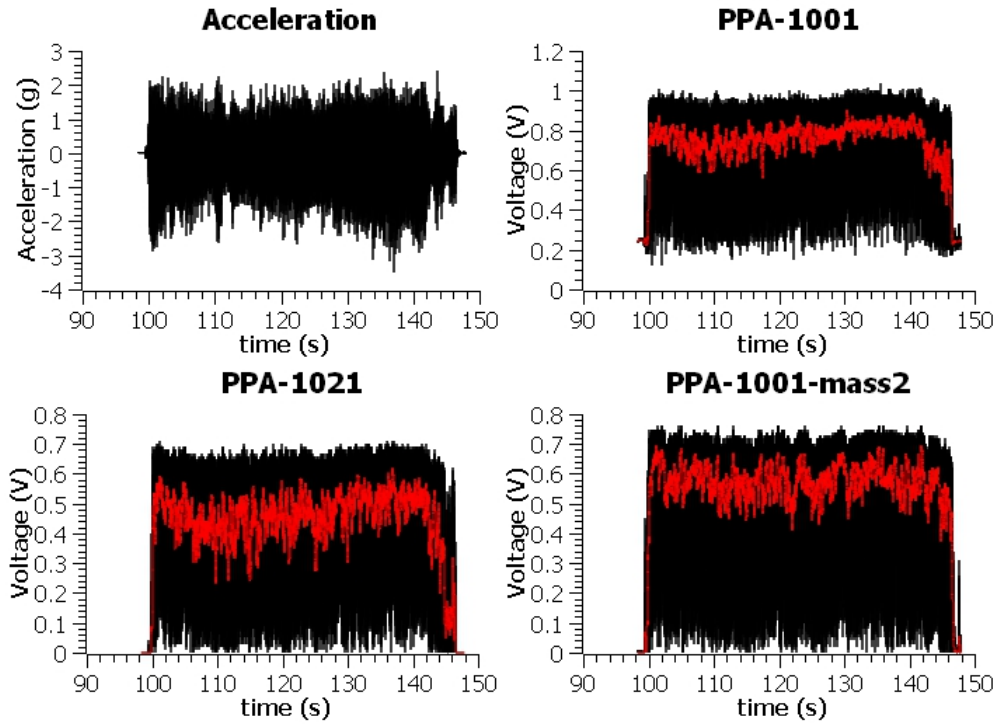


Figura 3.31: Resultados do estudo do sistema *skateboard-harvester* num piso inclinado de alcatrão.

Capítulo 4

Conclusões e Trabalho Futuro

4.1 Conclusões

Os materiais piezoelétricos são uma classe de materiais inteligentes com grandes aplicações em sistemas sensores, atuadores e coletores energéticos devido à sua capacidade de acoplar os efeitos mecânicos e eletrostáticos, a sua fácil redução de escala e a sua variedade de respostas possíveis de obter dependendo da sua configuração. No tema da colheita de energia os sistemas piezoelétricos apresentam-se normalmente na configuração cantiléver que permite a conversão da energia mecânica de vibrações e deformações em energia elétrica. Neste trabalho demonstrou-se esse potencial dos cantiléveres piezoelétricos, com o grande objetivo de o analisar e quantificar para averiguar a sua utilidade na integração de um *skateboard*.

De forma a atingir o objetivo acima mencionado foram estudadas a natureza mecânica e elétrica de cantiléveres de PZT-5H, e o comportamento destes quando montados num skateboard em movimento. Deste modo, o nosso trabalho foi estruturado em três partes:

- Verificação e estudo por simulação numérica do comportamento de dispositivos comerciais de PZT-5H;
- Construção de uma montagem experimental capaz de caracterizar os dispositivos e caracterização dos mesmos;
- Construção e caracterização do sistema coletores piezoelétricos + *skateboard*.

A partir da física e do procedimento experimental associada a esta atividade, tornou-se possível o desenvolvimento de várias ideias e conclusões sobre este tópico.

Verificou-se que a uma simulação numérica recorrendo ao software de análise de elementos finitos COMSOL Multiphysics, demonstrou estimar o comportamento esperado dos

dispositivos comerciais utilizados de acordo com as equações conhecidas da teoria da Piezoeletricidade. Os dispositivos estudados foram o PPA-1001 e o PPA-1021 que apresentam estruturas e materiais diferentes na constituição da configuração cantiléver. Analisou-se a resposta da tensão gerada por estes em regimes vibracionais de frequências no intervalo de 0-200Hz, a forma como a resistência de carga do circuito influencia a potência elétrica de saída dos dispositivos, a resposta para acelerações aplicadas diferentes, a dependência da frequência de ressonância com a massa de prova e por ultimo a comparação entre os modelos de dispositivos sem massa e com massa de prova.

A simulação foi construída considerando os dados estruturais e morfológicos dos cantiléveres comerciais fornecidos pela ficha informativa do comerciante. Para esta condição, os dispositivos PPA-1001 e PPA-1021 apresentavam uma frequência de ressonância de 117.80Hz e 187.31Hz respetivamente. As potências elétricas máximas geradas pelos dispositivos foram aproximadamente 0.29 mW para o PPA-1001 e 0.07 mW para o PPA-1021. Com a adição de uma massa de prova de 3g no PPA-1001 a frequência de ressonância diminuiu para 52.20Hz e e a potência aumentou para 2.21 mW, aproximadamente. No caso do PPA-1021, a adição de uma massa de prova de 0.8g, diminui a sua ressonância para 100.50Hz e permitiu um aumento da potência de saída do dispositivo para um valor de 0.39 mW.

Uma montagem experimental foi desenvolvida recorrendo a um gerador de sinal, um gerador de vibração mecânica (coluna *subwoofer*) e um acelerómetro para medir as acelerações geradas nos dispositivos pela membrana. Com esta montagem tornou-se possível aproximar as condições de estudo experimentais às condições consideradas na simulação numérica e tentou-se verificar as previsões obtidas no primeiro ponto realizando a caracterização dos dispositivos.

Conclui-se que as frequências de ressonância dos cantiléveres, o PPA-1001 apresenta uma primeira frequência natural de 115Hz, o PPA-1021 tem uma frequência natural primária de 162.5Hz, que corresponde a erros relativamente aos valores obtidos da simulação de 2.4% e 13% respetivamente. As potências elétricas geradas era aproximadamente 6 vezes superiores às dos modelos simulados, cerca de 1.81mW para o PPA-1001 e 0.43mW para o PPA-1021. A adição de uma massa de prova de 1.03g diminui a ressonância do PPA-1001 para 69.5Hz e aumentou a potência gerada para 4.09 mW. Para uma massa de prova cerca de 2.2 vezes superior (2.23g) o PPA-1001 passa a ter a sua primeira ressonância nos 53.5Hz e uma potência de saída de 5.39 que é 1.3 vezes superior ao caso anterior.

Foram detetados desvios bem visíveis ao nível das potências elétricas máximas ca-

racterísticas dos dispositivos. Foram desenvolvidas duas justificações principais para o acontecido. Por um lado, tamanho dos elementos finitos considerados na simulação pode não ter sido o mais adequado, uma vez que o método FEA permite obter resultados mais otimizados conforme diminuímos o tamanho de elementos, no entanto isto requer um aumento no tempo e capacidade de processamento que estavam limitados pelo equipamento utilizado. Por outro lado, foram determinados os fatores de qualidade dos dois dispositivos PPA-1001 e PPA-1021, para o primeiro 8.56 e o segundo 67.18 com erros relativamente aos fatores fornecidos pela ficha informativa de 43% e 162%, respetivamente.

Outro desvio ao previsto foi a presença de um efeito de amortecimento de massa de prova que se detetou para ambos os dispositivos na fase experimental e não era previsto na teoria. Este efeito causou uma redução substancial das potências elétricas geradas pelos dispositivos com massas de prova mais leves, por esta razão se desconsiderou o dispositivo PPA-1021 com uma massa de prova capaz de ajustar a ressonância para frequências próximas de 100Hz. A razão encontrada mais provável foi a combinação da geometria e método de fixação da massa que permitiu o aparecimento deste efeito.

Apesar de existirem alguns desvios entre os resultados obtidos por simulação númerica e os resultados experimentais, existiram muitas semelhanças que foram imperativas para retirar informação sobre o funcionamento característico dos dispositivos. Por exemplo as frequências de ressonância dos dispositivos permaneceram inferiores a 200Hz. As potências elétricas geradas estão na ordem de grandeza das décimas e unidades de mW, que correspondeu a um aumento da energia produzida para o caso real, sendo algo ótimo numa situação de colheita energética. A adição das massas de prova permitiram um ajuste da frequência de ressonância e um aumento da geração energética, tal como foi previsto pelos resultados da simulação. As provas de conceito realizadas também foram interessantes para chegar à conclusão de que a combinação de coletores é essencial para obter potências elétricas capazes de alimentar outros dispositivos elétricos (sensores, antenas, LEDs...).

Por último, desenvolveu-se o protótipo em escala piloto constituído por um *skateboard-harvester* que consistiu na fixação de uma estrutura em acrílico onde estavam montados os coletores e o acelerómetro. nesta parte do trabalho foi caracterizado o espetro de frequências e as amplitudes de aceleração do *skateboard* em movimento sobre uma superfície de alcatrão inclinado. As frequências detetadas estavam dentro do intervalo de frequências que continha as ressonâncias do coletores (frequências inferiores a 200Hz). Foram detetadas vibrações mecânicas com direção perpendicular ao deslocamento do *skateboard* (direção dos zz) que apresentavam amplitudes de aceleração entre 1g e 3g.

Neste estudo, verificou-se a existência de máximos de amplitude no espetro das frequências das vibrações mecânicas o que era indicio da existência de uma frequência natural do sistema que aumentava com o aumento da velocidade do skateboard. Com a introdução dos coletores no sistema a resposta destes não foi superior a 1V para os três dispositivos mesmo com acelerações entre 1g e 2g. Estes resultados afastaram-se do que estava previsto, uma vez que foram detetados máximos de espetros que apresentavam frequências próximas às dos dispositivos.

Em suma, podemos concluir que seria necessário uma mudança de procedimento nesta parte, uma vez que a existência do efeito de interferência destrutiva de vibrações mecânicas de frequências diferentes diminui a potência elétrica gerada pelos coletores.

4.2 Trabalho Futuro

Do estudo pioneiro para colheita de energia em sistemas de vibrações mecânicos e tendo em conta resultados obtidos, foi possível definir novas linhas de ação para aprimoramentos do trabalho futuro.

A primeira parte deste projeto foi realizada a simulação e previsão do funcionamento dos cantiléveres piezoelétricos em condições de vibrações mecânicas transversais. Primeiramente seria interessante a adaptação das simulações aos novos fatores de qualidade determinados durante a segunda fase do trabalho para verificar as alterações aos dados obtidos. Em contrapartida, em vez da realização de um estudo só para vibrações transversais, seria interessante explorar outras formas de geração energética como recolha energética através de impactos mecânicos. Esta nova forma de recolha levaria também ao desenvolvimento de novas estruturas e geometrias.

A caracterização dos dispositivos comerciais foi realizada numa montagem construida durante o trabalho realizado. Uma forma de garantir uma maior consistência das medições realizadas seria a construção de uma caixa onde montar a coluna para reduzir os efeitos de ressonância desta.

Por fim, a grande intenção deste projeto passou pelo afinamento dos coletores às frequências naturais do skateboard, no entanto seria importante a realização de mais testes cinéticos de forma a caracterizar o dispositivo em regimes diferentes, como superfícies em cimento com ranhuras. Deste modo seria possível estabelecer a possibilidade de obter potências geradas superiores através da recolha energética de impactos mecânicos.

Bibliografia

[1] Weiqi Qian, Weiyou Yang, Yan Zhang, Chris R. Bowen, and Ya Yang. Piezoelectric materials for controlling electro-chemical processes. *Nano-Micro Letters*, 2020.

[2] Ting Zheng, Jiagang Wu, Dingquan Xiao, and Jianguo Zhu. Recent development in lead-free perovskite piezoelectric bulk materials. *Progress in Material Science*, 2018.

[3] *Characteristics of Ferroelectric PZT Ceramics*. PhD thesis, University of Birmingham. Visualizado em 15/07/2021.

[4] B. E. Watts. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier Science Ltd., 2001.

[5] Radhouane Bel-Hadj-Tahar, Mohamed Abboud, and Mouna Bouzitoun. Thermal analysis of the crystallization kinetics of lead zirconatetitanate powders prepared via sol-gel route. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020.

[6] Levent Beker, Haluk Kulah, and Ali Muhtaroglu. Piezoelectric cantilever prototype for energy harvesting in computing applications. *International Conference on Energy Aware Computing*, 2011.

[7] PPA. Ppa products / datasheet and user manual. published by MidÃľ on their website: www.mide.com, January 2017. Manual dos dispositivos piezoelÃľtricos comerciais.

[8] Guy Plantier, Caroline Bes, Thierry Bosch, and Francis Bony. Auto adaptive signal processing of a laser diode self-mixing displacement sensor. *2005 IEEE Instrumentationand Measurement Technology Conference Proceedings*, 2:1013–1017, 2005.

[9] Matthew W. Hooker. Properties of pzt-based piezoelectric ceramics between -150 and 250 c. *NASA*, September 1998.

[10] Piezo.com. Materials technical data (typical values). Data sheet published on: https://info.piezo.com/hubfs/Data-Sheets/piezo-material-properties-data-sheet-20201112.pdf, 2021. Visualizado em 15/06/2021.

[11] William Callister and David Rethwisch. *Materials Science and Engineering.* Wiley, 9th edition, 2014.

[12] S. Beeby, M. Tudor, and N. White. Energy harvesting vibration sources formicrosystems applications. *Measurement Science and Technology*, 2006.

[13] A. Erturk and D. Inman. *Piezoelectric Energy Harvesting.* Wiley, 2011.

[14] G. Lippmann. Principe de la conservation de l'electricitÃľ. *Annales de chimie et de physique*, 24:145–178, 1881.

[15] Woldemar Voigt. *Lehrbuch der kristallphysik (mit ausschluss der kristalloptik).* Leipzig, Berlin, B.G. Teubner, 1850-1919.

[16] "the curie brothers discover piezoelectricity". Published on the American Physical Society website: https://www.aps.org/publications/apsnews/201403/physicshistory.cfm, March 2014. Visualizado 1/07/2021.

[17] IEEE. *IEEE Standard on Piezoelectricity.* Institute of Electrical and Electronics Engeneering, 1988.

[18] Giovanni Cimatti. The piezoelectric continuum. *Annali di Matematica*, 2004.

[19] E. Varadrajan and M. Bhanusri. Design and simulation of unimorph piezoelectric energy harvesting system. 2013.

[20] Qing He, Zhen Yan, Likai Fei, and Bo Song. Modeling and analysis of piezoelectric vibrating generator of cantilever. *Applied Mechanics and Materials*, 148-149:1327–1330, 2012.

[21] Lu Wang, Libo Zhao, Zhuangde Jiang, Guoxi Luo, Ping Yang, Xiangguang Han, Xiang Li, and Ryutaro Maeda. High accuracy comsol simulation method of bimorph cantilever for piezoelectric vibrationenergy harvesting. *AIP Advances*, 9, 2019.

[22] Dale H. Litwhiler. A custom vibration test fixture using a subwoofer. 2011.

[23] Dudley Towne. *Wave Phenomena.* Courier Dover Publications, 2014.

[24] D. Giancoli. *Physics for scientists engineers with modern physics.* 3rd edition, 2009.

[25] Jose Silva, Jose Oliveira, and Jose Moreira. *Ondas e Meios Continuos.* U.Porto editorial, 1st edition, 2013.

[26] Joao Miguel Matos Nunes. Adaptive tuned mass damper (atmd) based in shape-memory alloy (sma) elements. Master's thesis, Faculdade de Ciencias e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2016.

[27] Goon Tan, Kazuki Maruyama, Kanamitsu Yuya, Shintaro Nishioka, Tomoatsu Ozaki, Toshihito Umegaki, Hirotaka Hida, and Isaku Kanno. Crystallographic contributions topiezoelectric properties in pzt thinfilmsï£¡. 2019.

[28] Zubair Butt, Zeeshan Anjum, Faisal Qayyum, Hafiz Ali, and Shahid Mehmood. Investigation of electrical properties and mechanical quality factor of piezoelectric material (pzt-4a). *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2017.

[29] Dongna Shen, Jung-Hyun Park, Jyoti Ajitsaria, Song-Yul Choe, Howard C. Wikle, and Dong-Joo Kim. The design, fabrication and evaluation ofa mems pzt cantilever with anintegrated si proof mass for vibrationenergy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18, 2008.

[30] R. Shashank, S. K. Harisha, and M. C. Abhishek. Modelling and analysis of piezoelectric cantilever energyharvester for different proof mass and material proportion. *Materials Science and Engineering*, 310, 2018.

[31] Thomas Schlinquer, Abdenbi Mohand-Ousaid, and Micky Rakotondrabe. Optimal design of a unimorph piezoelectric cantilever devoted to energy harvesting to supply animal tracking devices. *IFAC (International Federation of Automatic Control)*, 2017.

[32] Silvano Donati and Michele Norgia. Overview of self-mixing interferometer applications to mechanical engineering. *Optical Engineering*, 2018.

Apêndice A

Montagem do sistema ótico

Como forma de determinar a aceleração gerada pelo gerador de vibrações foi colocada a hipótese da construção de um interferómetro de auto-mistura.[32, 8] O funcionamento deste dispositivo é idêntico ao de um interferómetro de Milchelson, embora neste caso a nossa fonte seja também o nosso detetor. Na figura A.1 podemos visualizar um esquema simplificado de um interferómetro de auto mistura. A deslocação do alvo S_m cria uma diferença de caminho ótico para o feixe refletido o que permite gerar interferência ótica no fotodetetor. Nos gráficos da figura A.2 apresenta-se o sinal esperado obter do fotodetetor para uma oscilação sinusoidal do alvo. Com este tipo de sistema seria possível medir o deslocamento do alvo através da seguinte expressão: [32, 8]

$$\Delta s = n\frac{\lambda}{2} \tag{A.1}$$

, onde Δs é o deslocamento do alvo, n o número de franjas e λ o comprimento de onda do feixe laser. Assim teríamos uma resolução para o nosso sistema de meio comprimento de onda. E conhecendo a amplitude do deslocamento podemos determinar a amplitude de aceleração através da equação:[25]

$$A = \omega^2 \Delta s \tag{A.2}$$

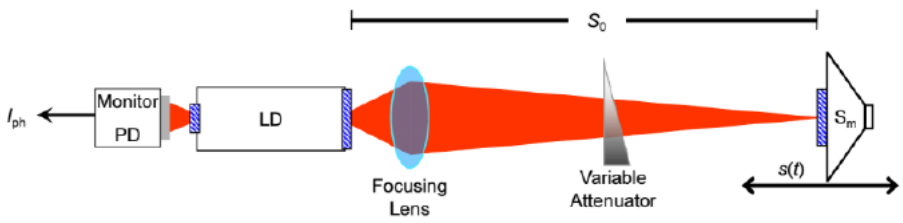


Figura A.1: Esquema de um interferómetro de auto-mistura.

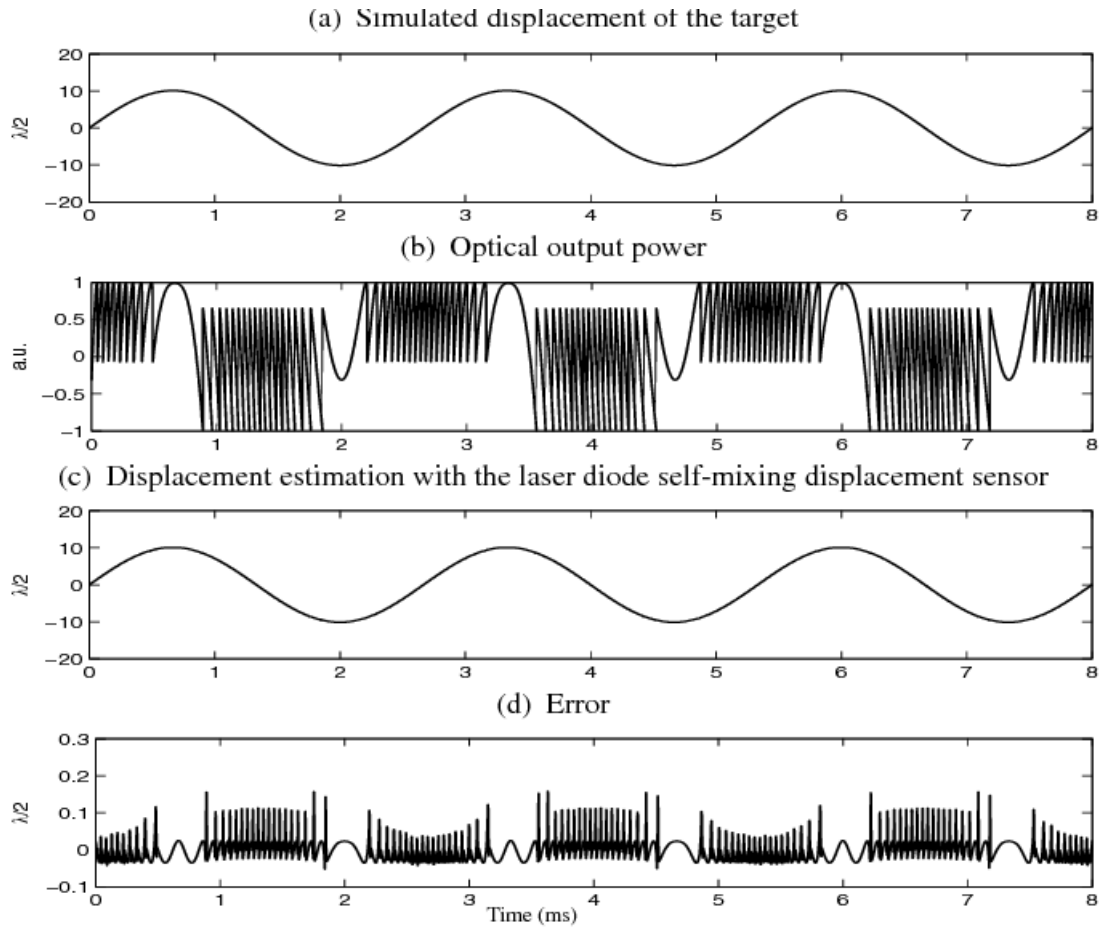


Figura A.2: Tipo de sinal esperado obter do interferómetro (b) para uma deslocação sinusoidal do alvo (a).[8]

Figura A.3: Díodo laser utilizado na montagem.

,onde A é a amplitude da aceleração e ω a frequência angular da oscilação.

A grande maioria dos díodos laser atuais costumam a ter integrado um fotodíodo que pode funcionar como detetor. Por isso foi adquirido o modelo de díodo laser que está presente na figura A.3. Este foi alimentado por baterias e ligado a um circuito amplificador desenhado para diminuir o ruído do sinal antes de entrar no osciloscópio (ver figura A.4). Na figura A.5 está uma fotografia da montagem realizada.

Após terem sido realizados testes da montagem verificou-se que não estávamos a conseguir obter um sinal com franjas visíveis o que levou à mudança de estratégia na forma de como medir a aceleração gerada pelo gerador de vibrações.

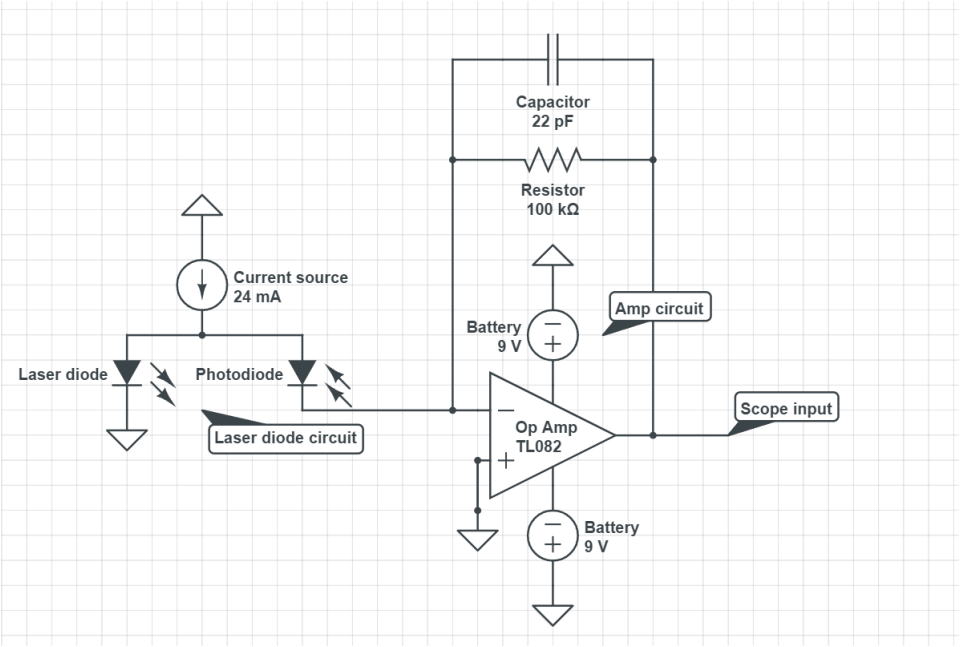


Figura A.4: Esquema do circuito amplificador.

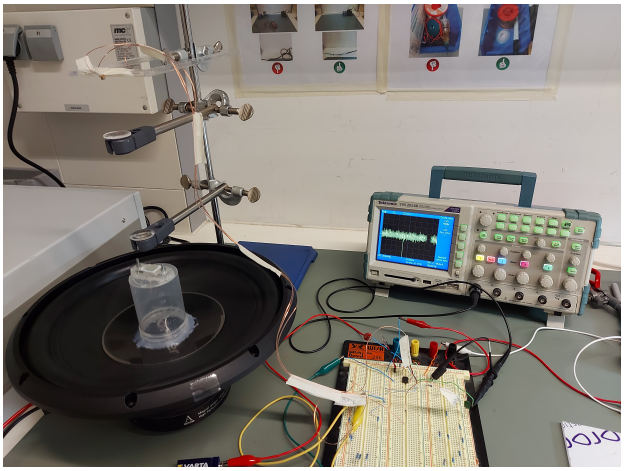


Figura A.5: Montagem do sistema ótico.

Apêndice B

Código do acelerómetro Arduino

Neste Apêndice temos os códigos construídos em Arduino IDE que foram usados durante o estágio.

```
int numReadings = 500;
int readings[500];
int index = 0;
int sensorValue_x;
float sensorMin , sensorMax, total;
float sensorCal = 0.36;
void setup()
{
  Serial.begin(250000);
}
void loop()
{
  // MEASUREMENTS
  // every iteration of loop makes one additional measurement
  sensorValue_x = analogRead(A0);
  readings[index] = sensorValue_x;
  index++;
  if (index >= numReadings)
  {
    index = 0;
    //running average, min and max
    float total = 0;
    sensorMax = sensorValue_x;
    sensorMin = sensorValue_x;
    for (int i = 0; i < numReadings; i++)
    {
      total += readings[i];
      if (readings[i] > sensorMax) sensorMax = readings[i];
      if (readings[i] < sensorMin) sensorMin = readings[i];
    }
    float average = total / numReadings;
    float amplitude = abs(sensorMax - sensorMin);

    // OUTPUT TO SERIAL
    Serial.print("\tMIN:\t");
    Serial.print ((sensorMin * (5.0 / 1024.0) - 2.129) / sensorCal,3);
    Serial.print("\tMAX:\t");
    Serial.print ((sensorMax * (5.0 / 1024.0) - 2.129) / sensorCal,3);
    Serial.print("\tAVG:\t");
    Serial.print ((average * (5.0 / 1024.0) - 2.129) / sensorCal,3);
    Serial.print("\tAMP:\t");
    Serial.println(( amplitude * (5.0 / 1024.0) / sensorCal) / 2.0,2);
  }
}
```

Figura B.1: Código do terminal de medição da amplitude da aceleração detetada pelo acelerómetro.

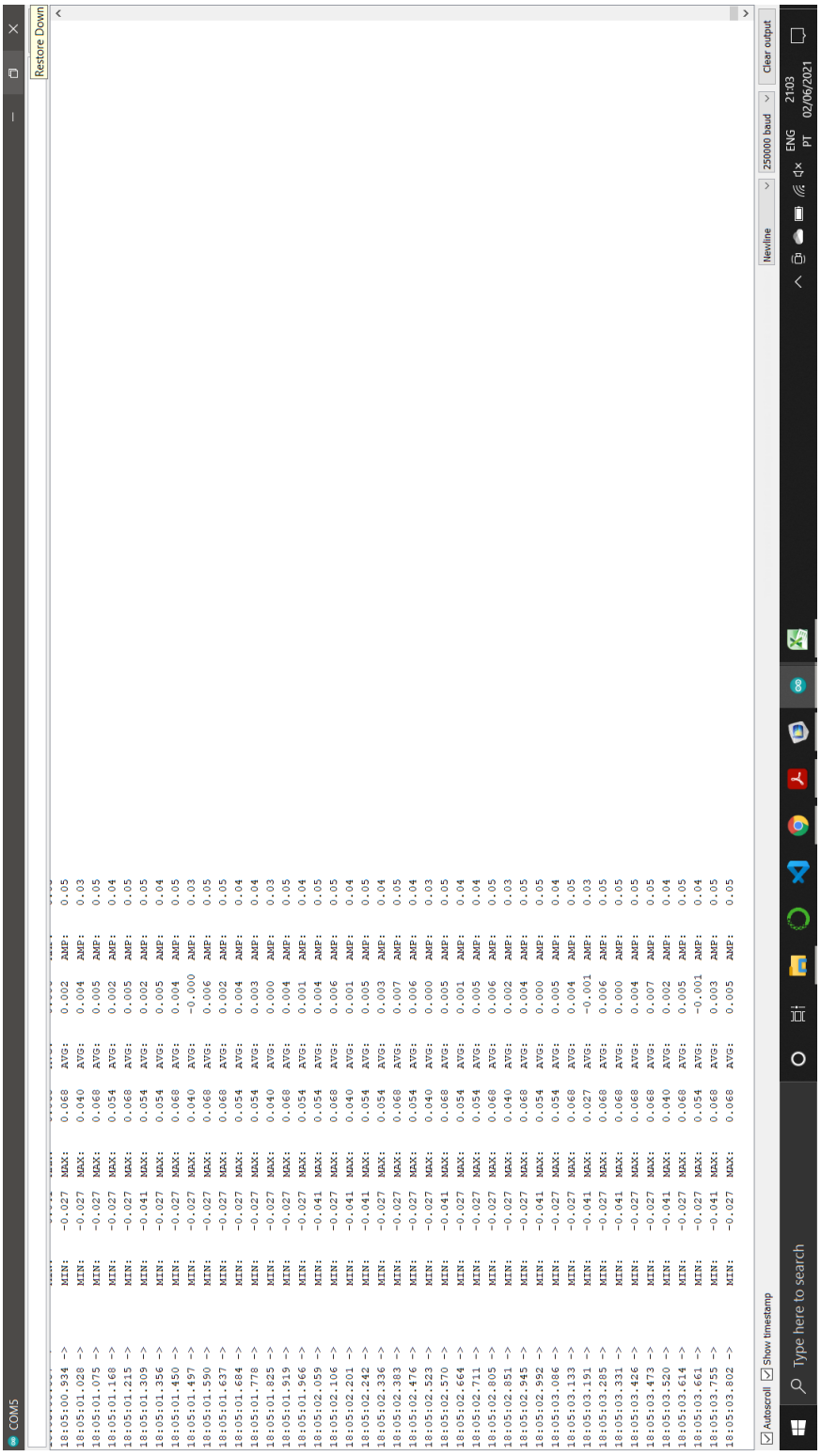


Figura B.2: Terminal utilizado para medir as acelerações do gerador de vibrações.

```
unsigned long micro_time;    //variable to hold the time
int sensorValue_x, sensorValue_cantA, sensorValue_cantB, sensorValue_cantC;
float acc_x, voltage_A, voltage_B, voltage_C;

void setup() {
  // initialize serial communication at 250000 bits per second:
  Serial.begin(250000);
}



// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  micro_time = micros(); //cronometro
  // read the input on analog pin 0:
  sensorValue_x = analogRead(A0);
  sensorValue_cantA = analogRead(A3);
  sensorValue_cantB = analogRead(A4);
  sensorValue_cantC = analogRead(A5);


  // Convert the analog reading (which goes from 0 - 1023) to a voltage (0 - 5V):
  acc_x = (sensorValue_x * (5.0/1024.0) - 2.135)/ 0.36;
  voltage_A = (sensorValue_cantA * (5.0 / 1024.0))/0.480;
  voltage_B = (sensorValue_cantB * (5.0 / 1024.0))/0.479;
  voltage_C = (sensorValue_cantC * (5.0 / 1024.0))/0.478;
  // print out the value you read:
  Serial.print(micro_time);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(acc_x);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(voltage_A);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(voltage_B);
  Serial.print(" ");
  Serial.println(voltage_C);
}
```

Figura B.3: Código utilizado para a medição de acelerações e saídas de tensão dos coletores piezoelétricos fixos no *skateboard*.