



Universidade de Coimbra

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Captação de energia de vibrações

Jorge Manuel Aragão da Silva Morgado

Coimbra

2021

Captação de energia de vibrações

Dissertação submetida à Universidade de Coimbra,

por

Jorge Manuel Aragão da Silva Morgado

como requisito parcial para a obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Universidade de Coimbra

Coimbra

2021

Tese realizada sob a supervisão de:

Professor Doutor Manuel Marques Crisóstomo

Professor da

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

e

Professor Doutor António Paulo Mendes Breda Dias Coimbra

Professor da

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Júri:

Presidente - Professor Doutor André Manuel dos Santos Mendes

Vogal - Professor Doutor Mário João Simões Ferreira dos Santos

Vogal - Professor Doutor António Paulo Mendes Breda Dias Coimbra

Para os meus pais, António Manuel e Adina Glória.

J.M.

Agradecimentos

Aos meus pais e ao meu irmão, pelos grandes valores que representam e por tudo de bom que sempre me transmitiram.

Aos meus orientadores Professor Manuel Crisóstomo e Professor Paulo Coimbra, pelo apoio científico, colaboração, disponibilidade e paciência.

A todos os professores que de alguma forma se relacionaram com o meu percurso e me transmitiram os seus conhecimentos.

Aos meus colegas de curso, em especial, ao Henrique, ao Rui e ao Falcão, por tudo o que sempre representaram como colegas e amigos.

Aos meus amigos, em especial ao Mário, ao Wilson, ao Artur e ao Rocha, pela amizade de sempre.

À minha namorada, por todo o apoio e motivação.

A toda a minha família, especialmente a mais próxima, pelos valores que passaram de geração em geração.

*“Concerning matter, we have been all wrong.
What we have called matter is energy, whose vibration has been so lowered as to be
perceptible to the senses.
There is no matter.”*

*“No que diz respeito a matéria, estamos todos errados.
O que chamamos de matéria é energia, cuja vibração foi reduzida a ponto de ser
perceptível aos sentidos.
A matéria não existe.”*

Albert Einstein

Resumo

Esta dissertação tem por objetivo geral explorar o potencial de transdutores eletromagnéticos e piezoelétricos na captação de energia das vibrações, para diferentes valores de frequência, aceleração. Inicialmente, foram medidas as vibrações em diversos motores, assim como no passo humano, utilizando uma aplicação de *software* (myFrequency).

De seguida procedeu-se à análise prática do transdutor piezoelétrico Volture V22B e do transdutor eletromagnético VEG-50.

Para a análise da resposta de um transdutor piezoelétrico, foi implementada uma fonte de vibrações, à qual foi acoplada o medidor de vibrações e também o transdutor piezoelétrico V22B.

Implementando um circuito de gestão de energia, CBC EVAL-09, foi possível converter, armazenar e disponibilizar a energia captada pelo transdutor piezoelétrico.

Para a análise da resposta de um transdutor eletromagnético, foi instalada uma aplicação de *software* (Frequency Generator) para emular um gerador de sinais a partir de um telemóvel, para elevar a amplitude do sinal produzido foram implementados e utilizados separadamente, dois amplificadores de potência, um baseado no circuito integrado (CI) LM386N-4 e outro baseado no CI TDA2005, cuja saída excita um *shaker* (fonte de vibrações que teve quatro configurações diferentes). Acoplados ao *shaker* estão o medidor de vibrações e também o transdutor eletromagnético VEG-50.

Implementando um circuito de gestão de energia, baseado no CI LTC3588-1, foi possível converter, armazenar e disponibilizar a energia captada pelo transdutor eletromagnético.

Por fim, foi construído um *setup* experimental de demonstração, para captação de energia das vibrações e alimentação de um nó sensor *wireless* de baixo consumo BT510. Para a receção dos dados enviados pelo BT510, por Bluetooth, foi configurada a aplicação de telemóvel Laird Connectivity.

Abstract

This dissertation focuses on exploring the potential of electromagnetic and piezoelectric transducers in capturing energy from vibrations, for different values of frequency and acceleration. Initially, vibrations in several motors as well as in the human step, using a software application (myFrequency).

Then, a practical analysis of the response of the piezoelectric transducer Volture V22B and the electromagnetic transducer VEG-50, was performed.

For the response analysis of a piezoelectric transducer, a source of vibrations was implemented, to which we had coupled the vibration meter and also the piezoelectric transducer V22B.

By implementing an energy management circuit, CBC EVAL-09, it was possible to convert, store and make available the energy captured by the piezoelectric transducer.

For the response analysis of a electromagnetic transducer, a software application (Frequency Generator) was installed that allowed to emulate a signal generator from a mobile phone, to increase the amplitude of the produced signal, two power amplifiers were implemented and used separately, one based on the integrated circuit (IC) LM386N-4 and the other based on the TDA2005 IC, whose output excited a shaker (vibration generator which had four different configurations). Coupled to the shaker we had the vibration meter and also the VEG-50 electromagnetic transducer.

By implementing an energy management circuit, based on the LTC3588-1 IC, it was possible to convert, store and make available the energy captured by the electromagnetic transducer.

Finally, an experimental demonstration setup was built to capture energy from vibrations and a low-consumption wireless sensor node BT510 as a device to be powered. To receive the data sent by the BT510 via Bluetooth, the Laird Connectivity mobile application was configured.

Conteúdo

| | |
|---|--------------|
| Resumo | xiii |
| Abstract | xiv |
| Lista de Figuras | xviii |
| Lista de tabelas | xxi |
| Nomenclatura | xxii |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Captação de energia..... | 1 |
| 1.2 Motivação para a dissertação | 2 |
| 1.3 Objetivos | 2 |
| 1.4 Trabalho desenvolvido | 3 |
| 1.5 Estrutura da dissertação | 3 |
| 2 Energia das vibrações | 5 |
| 2.1 Introdução | 5 |
| 2.2 Fontes de energia existentes no ambiente e seu potencial..... | 6 |
| 2.3 Consumos de energia de equipamentos eletrônicos de pequena dimensão | 7 |
| 2.4 Estrutura base de uma plataforma para captação de energia das vibrações..... | 8 |
| 2.5 Tipos de transdutores utilizados na captação de energia das vibrações..... | 9 |
| 2.6 Associação de transdutores: geradores de energia híbridos, de múltiplas fontes e integrados. | 10 |
| 2.7 Estado da arte na captação de energia proveniente das vibrações | 11 |
| 2.8 Princípio de funcionamento de transdutores eletromagnéticos..... | 16 |
| 2.9 Princípio de funcionamento de transdutores piezoelétricos..... | 20 |
| 3 Caracterização experimental de fontes de vibrações | 25 |
| 3.1 Introdução..... | 25 |
| 3.2 Motor de automóvel | 25 |
| 3.3 Motor de bomba de água | 26 |
| 3.4 Motor de furadeira..... | 28 |
| 3.5 Passo humano | 29 |
| 3.6 Discussão | 30 |
| 4 Captação experimental de energia das vibrações com um transdutor piezoelétrico | 31 |
| 4.1 Transdutor piezoelétrico Vulture V22B..... | 32 |
| 4.2 Configuração da fonte de vibrações com o transdutor piezoelétrico V22B | 33 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.3 | Resposta do transdutor piezoelétrico em circuito aberto | 35 |
| 4.4 | Resposta do transdutor piezoelétrico em circuito fechado..... | 38 |
| 5 | Captação experimental de energia das vibrações com um transdutor eletromagnético | 40 |
| 5.1 | Resposta do transdutor eletromagnético | 40 |
| 5.2 | Configurações da fonte de vibrações..... | 41 |
| 5.3 | Resposta do transdutor eletromagnético – Configuração nº1 | 42 |
| 5.4 | Resposta do transdutor eletromagnético - Configuração nº2..... | 50 |
| 5.5 | Resposta do transdutor eletromagnético - Configuração nº3..... | 52 |
| 5.6 | Resposta do transdutor eletromagnético - Configuração nº4..... | 56 |
| 6 | Gestão experimental da energia captada pelos transdutores..... | 59 |
| 6.1 | Introdução..... | 59 |
| 6.2 | A plataforma CBC EVAL-09..... | 59 |
| 6.3 | A plataforma LTC3588-1..... | 66 |
| 7 | Aplicação experimental com um transdutor eletromagnético..... | 69 |
| 7.1 | <i>Setup</i> da montagem | 69 |
| 7.2 | Captação e gestão da energia | 69 |
| 7.3 | Discussão de resultados | 70 |
| 8 | Conclusões e trabalho futuro | 71 |
| 8.1 | Sugestões de trabalho futuro..... | 72 |
| | Bibliografia..... | 73 |
| | ANEXOS..... | 78 |
| | ANEXO I - Tabela de custos | 79 |
| | ANEXO II – Diferentes estruturas de molas planares | 81 |
| | ANEXO III - Tabela de componentes | 83 |
| | ANEXO IV - LINEAR LTC3588-1 Datasheet | 85 |
| | ANEXO V - XIDAS VEG-50 Especificações..... | 89 |
| | ANEXO VI - LAIRD Sentrius BT510 Guia de utilizador..... | 95 |
| | ANEXO VII - Tabelas de transdutores para captação de energia das vibrações | 104 |
| | ANEXO VIII – Dimensões da fonte de vibrações (<i>Shaker</i>)..... | 107 |
| | ANEXO IX – Experiências realizadas com transdutores piezoelétricos e eletromagnéticos.. | 110 |
| | Experiência nº1: Captação de energia das vibrações do passo humano com transdutores piezoelétricos associados em paralelo..... | 111 |
| | Experiência nº2: Captação de energia de vibrações do passo humano com transdutores piezoelétricos associados em série | 116 |

Experiência nº3: Captação de energia das vibrações do passo humano com o transdutor eletromagnético 121

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1: Tendência de evolução do mercado de captação de energia nos EUA, por área de aplicação, em milhões de dólares [4]..... | 6 |
| Figura 2.2: Consumos de energia de pequenos dispositivos eletrónicos [4]..... | 7 |
| Figura 2.3: Distribuição dos consumos de energia num nó sensor sem fios [8]..... | 7 |
| Figura 2.4: Os 4 blocos base de um sistema típico de captação de energia para nós sensores sem fios..... | 8 |
| Figura 2.5: Evolução típica do consumo e da corrente gerada num nó sensor [9]. | 8 |
| Figura 2.6: Típico gerador híbrido eletromagnético – piezoelétrico [17]. | 11 |
| Figura 2.7: Captação de energia na ferrovia [19]..... | 12 |
| Figura 2.8: Transdutores de película fina [21]..... | 12 |
| Figura 2.9: Modelo de aplicação para a aviação [22]. | 13 |
| Figura 2.10: Geradores na escala macro e milimétrica [23]. | 13 |
| Figura 2.11: Geradores na escala micro e nano [23]. | 14 |
| Figura 2.12: Aplicações com nanosensores piezoelétricos para captação de energia [24]. | 14 |
| Figura 2.13: Aplicação de transdutores piezoelétricos com <i>machine learning</i> [25]. | 15 |
| Figura 2.14: Aplicação de captação de energia das vibrações juntamente com inteligência artificial [25]..... | 16 |
| Figura 2.15: Representação de um gerador eletromagnético [26]. | 17 |
| Figura 2.16: Frequência do gerador variando a espessura do cantilever e o material que o compõe [27]..... | 17 |
| Figura 2.17: Gerador eletromagnético proposto por Mallick et al. [28]. | 18 |
| Figura 2.18: Exemplo genérico de captação de energia através de um transdutor piezoelétrico [35]..... | 21 |
| Figura 2.19: Conversão piezoelétrica [4]..... | 22 |
| Figura 2.20: Transdutor piezoelétrico com sintonização de frequência [39]. | 23 |
| Figura 2.21: Frequência vs potência, modelado e experimentalmente, para o ar e em vácuo [40]. | 23 |
| Figura 2.22: Valor da carga vs potência, modelado e experimentalmente [40]. | 24 |
| Figura 2.23: Piezoelétricos bimorph [41]. | 24 |
| Figura 3.1: Orientação dos 3 eixos do acelerómetro colocado sobre o motor de automóvel..... | 26 |
| Figura 3.2: Espectro das frequências da vibração do motor de automóvel a 2700 rpm, no eixo Z..... | 26 |
| Figura 3.3: Orientação dos 3 eixos do acelerómetro colocado sobre o motor da bomba. | 27 |
| Figura 3.4: Espectro das frequências da vibração da bomba de água, segundo o eixo Z. | 27 |
| Figura 3.5: Orientação dos 3 eixos do acelerómetro colocado sobre o motor da furadeira. | 28 |
| Figura 3.6: Espectro das frequências da vibração da furadeira segundo o eixo Z..... | 28 |
| Figura 3.7: Orientação dos 3 eixos do acelerómetro colocado sobre a parte lateral da perna..... | 29 |
| Figura 3.8: Espectro das frequências da vibração do passo humano, segundo o eixo Y. | 29 |
| Figura 4.1: <i>Setup</i> para medição da resposta do transdutor piezoelétrico V22B em circuito aberto. | 31 |
| Figura 4.2: <i>Setup</i> para medição da resposta do transdutor piezoelétrico V22B em circuito fechado. | 32 |
| Figura 4.3: Transdutor piezoelétrico Volture V22B. | 32 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.4: Suporte construído para fixação do transdutor piezoelétrico V22B..... | 33 |
| Figura 4.5: Ventoinha com a massa de borracha agregada. | 33 |
| Figura 4.6: Transdutor piezoelétrico em captação, visto por cima. | 34 |
| Figura 4.7: Transdutor piezoelétrico em captação, vista lateral..... | 34 |
| Figura 4.8: Espectro de frequência sem colocação de massa de prova e com a tensão de alimentação da ventoinha de 3 V. | 36 |
| Figura 4.9: Espectro de frequência com massa de prova de 0.5 g e com a tensão de alimentação da ventoinha de 3 V. | 36 |
| Figura 4.10: Espectro de frequência com massa de prova de 2.0g e com a tensão de alimentação da ventoinha de 4.5 V. | 36 |
| Figura 4.11: Frequência em função da tensão da ventoinha e da massa de prova. | 37 |
| Figura 4.12: Tensão à saída do piezoelétrico em função da massa de prova e da tensão da ventoinha..... | 38 |
| Figura 5.1: <i>Setup</i> experimental para análise da resposta do transdutor em circuito aberto. | 40 |
| Figura 5.2: <i>Setup</i> experimental para análise da resposta do transdutor em circuito fechado. | 41 |
| Figura 5.3: As quatro configurações da fonte de vibrações. | 42 |
| Figura 5.4: Transdutor eletromagnético XIDAS VEG-50..... | 43 |
| Figura 5.5: Orientação do transdutor eletromagnético VEG-50..... | 43 |
| Figura 5.6: (a) Altifalante, (b) Dimensões do copo. | 44 |
| Figura 5.7: <i>Shaker</i> e transdutor eletromagnético. | 44 |
| Figura 5.8: Esquema elétrico do amplificador de potência com o integrado 45 | 45 |
| Figura 5.9: Implementação do amplificador de potência com o CI LM386N-4. | 46 |
| Figura 5.10: Esquema elétrico do amplificador de potência com o CI TDA2005. | 46 |
| Figura 5.11: Implementação do amplificador de potência com o CI TDA2005..... | 47 |
| Figura 5.12: Medição do valor de tensão à saída do transdutor..... | 47 |
| Figura 5.13: Tensão de saída do VEG-50, em função da frequência de excitação..... | 48 |
| Figura 5.14: Valor da potência máxima gerada em função da frequência de excitação. ... | 50 |
| Figura 5.15: Vista superior da montagem em plataforma horizontal para análise da resposta do VEG-50. | 51 |
| Figura 5.16: Vista lateral da montagem para análise da resposta do VEG-50..... | 51 |
| Figura 5.17: Vista superior da montagem em plataforma vertical, para análise da resposta do transdutor VEG-50..... | 52 |
| Figura 5.18: Vista frontal da montagem em plataforma vertical, para análise da resposta do transdutor VEG-50..... | 53 |
| Figura 5.19: Peça para fixação do braço (tubo) que se encontra ligado ao altifalante..... | 56 |
| Figura 6.1: Plataforma CBC EVAL-09 [46]. | 60 |
| Figura 6.2: Diagrama de Blocos da plataforma CBC-EVAL09. | 60 |
| Figura 6.3: Células Cymbet de filme fino de 50 μ Ah - 4.2 V..... | 63 |
| Figura 6.4: Montagem feita para verificar o desempenho da plataforma CBC Eval-09 na gestão de energia captada através do piezoelétrico V22B..... | 64 |
| Figura 6.5: Transdutor piezoelétrico V22B ligado à placa EVAL CBC-09. | 65 |
| Figura 6.6: Vista geral da montagem com a placa EVAL CBC-09 em funcionamento..... | 65 |
| Figura 6.7: Aplicação de captação e acondicionamento de energia, com o LTC3588-1 (Anexo III)..... | 67 |
| Figura 6.8: Implementação com o processador LTC3588-1. | 67 |
| Figura 6.9: Supercondensador (1 F, 5,5 V) utilizado no armazenamento da energia..... | 68 |
| Figura 6.10: <i>Setup</i> utilizado para verificar o funcionamento da plataforma LTC3588-1. ... | 68 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 7.1: Setup para alimentação de um nó sensor wireless com um transdutor eletromagnético..... | 69 |
| Figura 7.2: Implementação da plataforma de alimentação de um nó sensor <i>wireless</i>, através de captação de energia das vibrações com um transdutor eletromagnético. | 70 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1: Energia captada de diversas fontes disponíveis no ambiente [7]. | 6 |
| Tabela 2.2: Comparação entre transdutores [14]. | 9 |
| Tabela 4.1: Resposta do transdutor piezoelétrico em função da massa de prova e da tensão de alimentação da ventoinha. | 35 |
| Tabela 4.2: Valores de potência em função da massa de prova e tensão da ventoinha. | 39 |
| Tabela 5.1: Valores de resposta do transdutor eletromagnético VEG-50, em circuito aberto, para a configuração nº1. | 48 |
| Tabela 5.2: Valores da potência de saída do transdutor VEG-50, para a configuração nº1. | 49 |
| Tabela 5.3: Tabela da relação frequência-tensão, em circuito aberto, do transdutor eletromagnético VEG-50, em circuito aberto, para a configuração nº3. | 54 |
| Tabela 5.4: Valores da potência de saída do transdutor VEG-50, em circuito fechado, para a configuração nº3. | 55 |
| Tabela 5.5: Valores de resposta do transdutor eletromagnético VEG-50, em circuito aberto, para a configuração nº4. | 57 |
| Tabela 5.6: Potência à saída do transdutor eletromagnético VEG-50, em circuito fechado, para a configuração nº4. | 58 |
| Tabela 6.1: Configuração dos interruptores para seleção do transdutor piezoelétrico. | 61 |

Nomenclatura

Geral:

| | |
|-----------|---|
| A | Área, [m ²]; |
| \vec{a} | Aceleração, [m/s ²]; |
| B | Intensidade do campo magnético, [T]; |
| BeCu | Cobre Berílio; |
| Br | Magnetismo residual ou remanescente, [T]; |
| c | Taxa de amortecimento mecânico; |
| C_p | Capacitância do piezoelétrico, [F]; |
| d | Distância, [m]; |
| $F(x)$ | Força generalizada da mola, [N]; |
| h_p | Altura da camada piezoelétrica, [m]; |
| h_s | Altura da camada de substrato, [m]; |
| I | Corrente induzida; |
| k | Coeficiente de rigidez linear, [N/m]; |
| K_{ij} | Coeficiente de acoplamento piezoelétrico; |
| K_2 | Coeficiente de acoplamento eletromecânico; |
| K_n | Coeficiente de rigidez não linear, [N/m]; |
| L | Indutância, [H]; |
| m | Massa inercial de um corpo, [Kg]; |
| Q | Fator de qualidade; |
| R_C | Resistência da carga, [Ω]; |
| R_L | Resistência da bobina, [Ω]; |
| R_{in} | Resistência interna da fonte, [Ω]; |
| R | Resistência total, [Ω]; |
| Si | Silício; |
| SS | Stainless Steel; |

| | |
|------------|---|
| w_0 | Frequência de ressonância, [Hz]; |
| x | Valor do deslocamento entre a massa e a estrutura, [m]; |
| \dot{x} | Valor da velocidade segundo um eixo x, [m/s]; |
| \ddot{x} | Valor da aceleração segundo um eixo x, [m/s ²]; |

Simbologia grega:

| | |
|----------|---|
| Φ | Fluxo magnético, [Tm ²]; |
| ρ | Coefficiente de amortecimento mecânico; |
| γ | Coefficiente de acoplamento magnético; |

Acrónimos:

| | |
|--------|---|
| ADC | Analog Digital Converter; |
| AC | Alternating Current; |
| APAC | Asia – Pacific; |
| APP | Software Application; |
| IC | Integrated Circuit; |
| DC | Direct Current; |
| EC | EnerChip Charge; |
| EH | Energy Harvesting; |
| EM-VEH | Electro Magnetic Vibration Energy Harvesting; |
| EMF | Electromotive Force; |
| EUA | United States of America; |
| FFT | Fast Fourier Transformer; |
| FoMV | First order Mean Value; |
| HV | High Voltage; |
| I/O | Input/Output; |
| MCUs | Microcontrollers; |
| MEMS | Microelectromechanical systems; |

| | |
|--------|--|
| PENG | PiezoElectric NanoGenerator; |
| PZ-VEH | Piezoelectric Vibration Energy Harvesting; |
| PZT | Titanato Zirconato de chumbo; |
| RF | Radio frequency; |
| RoHS | Restriction of hazardous Substances Directive; |
| RoW | Rest of World; |
| SI | International System of Units; |
| UC | Universidade de Coimbra; |
| USB | Universal Serial Bus; |
| VEH | Vibration Energy Harvesting; |
| Vpp | Voltage peak-to-peak; |

Capítulo 1

1 Introdução

1.1 Captação de energia

A captação de energia (*energy harvesting*) é a extração de energia utilizável (geralmente convertida em elétrica energia) de energia de outra forma desperdiçada, que está disponível no ambiente.

Na escala macro (MegaWatts) isso inclui hidroeletricidade, energia das ondas, painéis solares e turbinas eólicas.

Para a alimentação de sensores sem fios (*wireless*), estamos a falar da captação de energia imediatamente disponível em determinados ambientes, como vibração mecânica, calor, luz e energia de rádio frequência (RF), na ordem dos miliWatts.

A energia assim captada do ambiente é instável, imprevisível e, às vezes, intermitente, e os componentes eletrónicos precisam de uma fonte de energia regulada para funcionar normalmente. A gestão desta energia, permite que seja utilizada para alimentar dispositivos de baixo consumo, assim como armazenar a energia que exceda o consumo em cada momento. Como a densidade de energia das baterias recarregáveis triplicou na última década, com custos cada vez mais baixos, torna-se cada vez mais viável a captação de energia [1].

Existe um número crescente de aplicações, nomeadamente:

- No setor da saúde para alimentação de dispositivos médicos colocados no corpo humano, por ex.: *pacemakers* (em desenvolvimento);
- Em aplicações no setor ferroviário para monitorização da via;
- Na indústria, em redes de sensores sem fios de grande dimensão, em que as instalações com fio ficam dispendiosas, assim como a substituição de baterias;
- Em aplicações no setor automóvel, nomeadamente na monitorização de pneus;

- No segmento residencial, na alimentação de certos dispositivos eletrônicos, como por exemplo, botões de campainhas sem fios.

1.2 Motivação para a dissertação

Com especial foco nas duas últimas décadas, podemos constatar que existiram diversos estudos centrados na procura de soluções para aumentar a banda de frequências de resposta, de vários transdutores, assim como estudos para o aumento da gama de acelerações a que o transdutor seja sensível. A produção de energia destes transdutores, por vezes diminuta, requer a utilização de plataformas de gestão de energia, que possibilitam o seu armazenamento e disponibilização.

Atualmente poderão já existir vários desenvolvimentos em transdutores para captação de energia das vibrações, que possibilitam a sua utilização num leque mais vasto de aplicações, seja pela sua resposta a várias frequências, como pela sua resposta a vários valores de aceleração.

Assim, procedemos ao estudo e implementação de protótipos demonstrativos da tecnologia de captação de energia de vibrações. Testei e fiz a caracterização dos geradores perante diversas condições de excitação (frequência, aceleração), por forma a determinar a sua exequibilidade.

1.3 Objetivos

Os objetivos principais deste trabalho são:

- Determinação da exequibilidade de transdutores piezoelétricos e eletromagnéticos na captação de energia das vibrações.
- Teste e caracterização de geradores perante diversas condições de excitação (captação de energia das vibrações).
- Teste perante diferentes valores de massa de prova (gerador piezoelétrico) e valores de resistência carga (piezoelétrico e eletromagnético).
- Estudo e implementação de protótipos demonstrativos da tecnologia de captação de energia de vibrações.

1.4 Trabalho desenvolvido

Nesta dissertação foi desenvolvido um conjunto de trabalhos que vão desde a construção de equipamentos de apoio até à implementação de soluções de captação de energia das vibrações, nomeadamente:

- Implementação de medidor de vibrações;
- Medição e caracterização de vibrações;
- Seleção e aquisição dos vários componentes para as montagens efetuadas;
- Implementação de gerador de sinal;
- Implementação dos amplificadores de potência;
- Desenvolvimento e implementação de *setup* para captação da energia das vibrações;
- Implementação dos circuitos de gestão de energia;
- Montagem da aplicação experimental para alimentação do nó sensor *wireless*;
- Foram também feitas três experiências de captação da energia das vibrações, descritas no Anexo VI.

1.5 Estrutura da dissertação

No capítulo 1 é feita uma abordagem à captação da energia das vibrações e sua aplicabilidade. São também apresentadas as motivações e objetivos da dissertação.

No capítulo 2 é abordada a energia das vibrações, desde a sua disponibilidade nos diversos ambientes, passando pelos transdutores para a sua captação e pela estrutura base para sua gestão.

No capítulo 3 é feita a caracterização de fontes de vibrações.

No capítulo 4 procedeu-se à captação experimental de energia das vibrações com um transdutor piezoelétrico.

No capítulo 5 procedeu-se à captação experimental de energia das vibrações com um transdutor eletromagnético.

No capítulo 6 temos a implementação/análise de sistemas para a conversão, armazenamento e gestão da energia captada das vibrações.

No capítulo 7 é implementada uma aplicação de captação de energia das vibrações para alimentação de um nó sensor *wireless* (sensor de temperatura, contato aberto/fechado e detetor de movimento/impacto).

No capítulo 8 são apresentadas as conclusões e trabalho futuro.

Capítulo 2

2 Energia das vibrações

2.1 Introdução

O progresso da eletrônica de baixa potência com consumos muito pequenos, a otimização de protocolos de comunicação e a utilização de técnicas sofisticadas de gestão de energia, permitem que redes de sensores, necessitem de menores quantidades de energia para funcionar e assim poderem contar com a captação de energia (*Energy Harvesting*), especialmente em condições em que não é prático substituir as baterias. [2].

Equipamentos portáteis de energia, como baterias de íões lítio, íões magnésio e chumbo-ácido têm uma vida útil curta e são mais sujeitos a danos. Pesquisas provaram que é possível aumentar a densidade de energia em baterias de íões lítio por meio de certas técnicas, no entanto, aumenta o risco de explosão se a temperatura subir acima do limite, em caso de sobrecarga [3].

As aplicações em edifícios constituem um dos principais usos da para captação de energia, nomeadamente em prédios comerciais onde grandes redes de interruptores sem fio (para iluminação) e sensores (presença, humidade e outros) estão instaladas. A redução do custo de instalação (ausência de fios) e o fato de precisarem de pouca ou nenhuma manutenção constituem vantagens da captação de energia. A empresa EnOcean (Alemanha) instalou vários interruptores sem fio com captação de energia, que economizam 40% do custo de energia ao controlar automaticamente a iluminação nos edifícios. Uma vez que não há necessidade de bateria adicional, nenhuma substituição ou manutenção é necessária. O mercado industrial será outra área-chave para a captação de energia, novamente com aplicações em sensores sem fio que são usados para monitorizar máquinas e processos. O facto de poder ser livre de manutenção também é um grande argumento para a captação de energia nas aplicações em que a acessibilidade às vezes é crítica (indústria de petróleo e gás, por exemplo). A empresa Perpetuum (Reino Unido) fabrica captadores de vibração eletrodinâmicos, que são usados na alimentação de sistemas e assim prolongarem a sua vida útil para 18 a 20 anos, devido à ausência de baterias [3].

Outras aplicações emergentes poderão utilizar massivamente a captação de energia para prolongar a vida de baterias em aplicações de sensores sem fio e contribuir para maiores volumes no mercado global da captação de energia: transporte (helicópteros, comboios, automóveis), ambiental, médico, entre outros. Na figura 2.1 poderemos ver a tendência de evolução do mercado de captação de energia nos EUA, por aplicação, tendo sido apresentados os valores em milhões de dólares de 2018 e 2019.

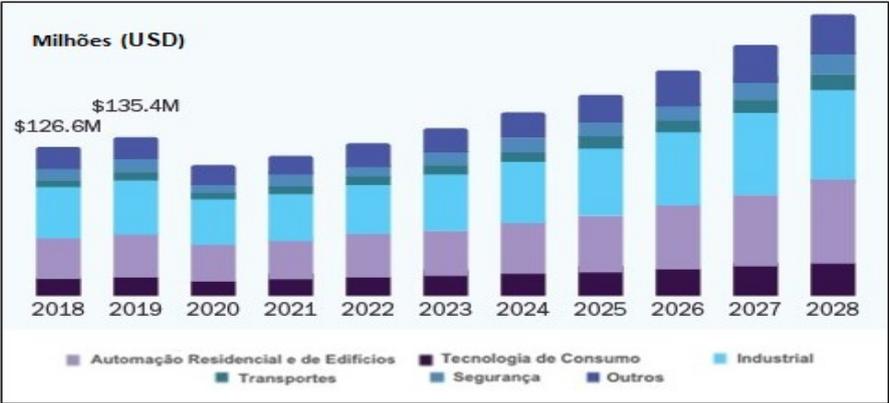


Figura 2.1: Tendência de evolução do mercado de captação de energia nos EUA, por área de aplicação, em milhões de dólares [4].

2.2 Fontes de energia existentes no ambiente e seu potencial

O ambiente que nos rodeia é rico em fontes de energia que cada vez mais urge aproveitar [5]. Se tivermos uma noção dos valores de energia que podemos obter de cada uma das fontes, poderemos responder melhor às necessidades de determinado equipamento. Alguns desses valores são apresentados na tabela 2.1, sendo que grande parte das vibrações existentes no ambiente têm uma frequência inferior a 200 Hz [6].

Tabela 2.1: Energia captada de diversas fontes disponíveis no ambiente [7].

| Fonte de energia | Energia captada |
|---------------------------------|-------------------------------|
| Vibrações/Movimento | |
| Humana | 4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ |
| Industrial | 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ |
| Diferença de temperatura | |
| Humana | 25 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ |
| Industrial | 1-10 mW/cm^2 |
| Luz | |
| Interior | 10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ |
| Exterior | 10 mW/cm^2 |
| Radiofrequência | |
| GSM | 0,1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ |
| WiFi | 0,001 mW/cm^2 |

2.3 Consumos de energia de equipamentos eletrónicos de pequena dimensão

A maior complexidade dos sistemas e a sua dimensão implica normalmente maiores necessidades energéticas, conforme podemos ver na figura 2.2. Na figura 2.3 vemos uma distribuição típica dos consumos de energia num nó sensor sem fios.

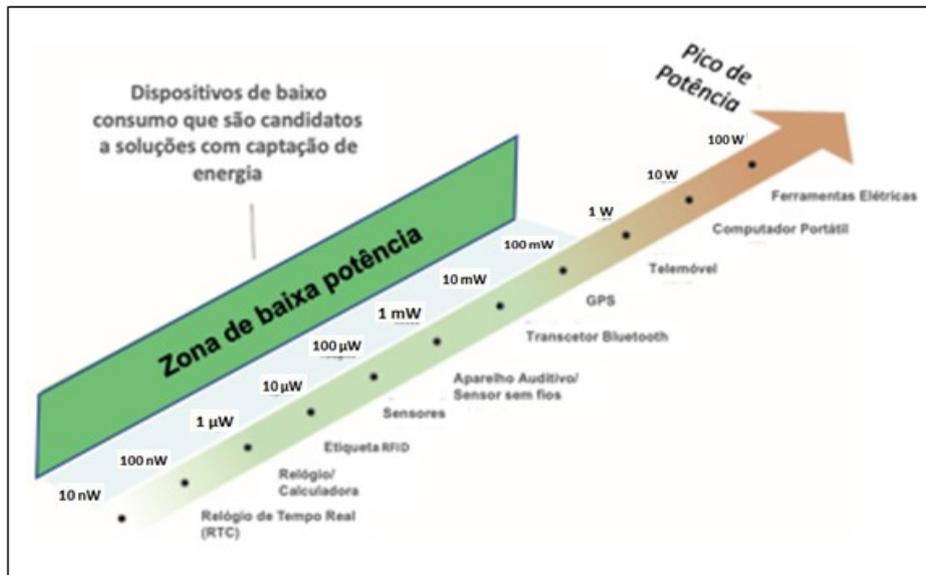


Figura 2.2: Consumos de energia de pequenos dispositivos eletrónicos [4].

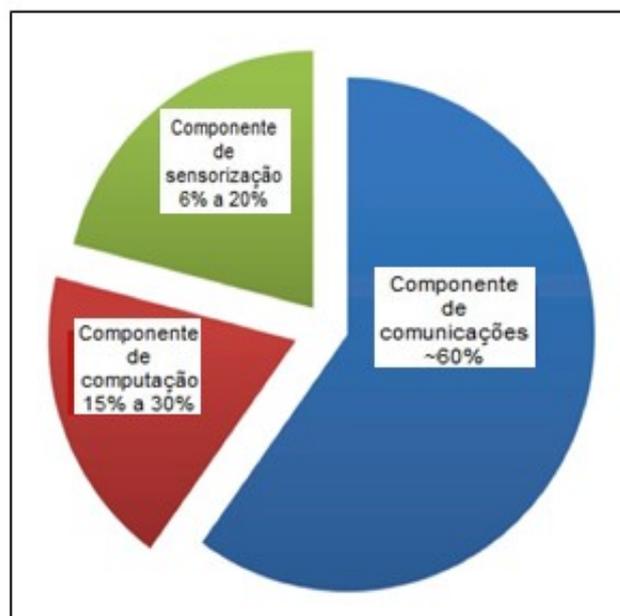


Figura 2.3: Distribuição dos consumos de energia num nó sensor sem fios [8].

2.4 Estrutura base de uma plataforma para captação de energia das vibrações

Na figura 2.4 poderemos visualizar os blocos base que poderão ser utilizados num sistema de captação de energia para nós sensores sem fios. Um sistema base para captação de energia tipicamente é constituído, no caso de um nó sensor sem fios, por 4 blocos básicos: a fonte de energia, a gestão de energia, o sistema sensorial e um dispositivo transmissor.

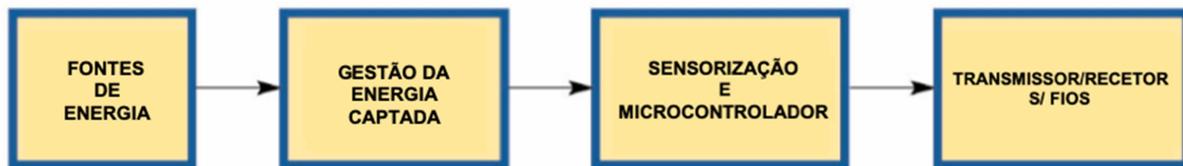


Figura 2.4: Os 4 blocos base de um sistema típico de captação de energia para nós sensores sem fios.

Na figura 2.5 temos um cenário típico da evolução do consumo de um nó sensor. Pode constatar-se que a maioria do consumo de energia deste tipo de sistemas é tipicamente durante as comunicações. Uma vez que a energia instantânea necessária nos instantes da receção e da transmissão (consumo) é superior à energia captada, torna-se necessária a utilização de armazenamento e gestão de energia, entre a captação e a saída [9].

Podemos observar que nos períodos de *stand by*, em que o valor da corrente à saída do gerador é superior ao valor de corrente que o nó sensor necessita.

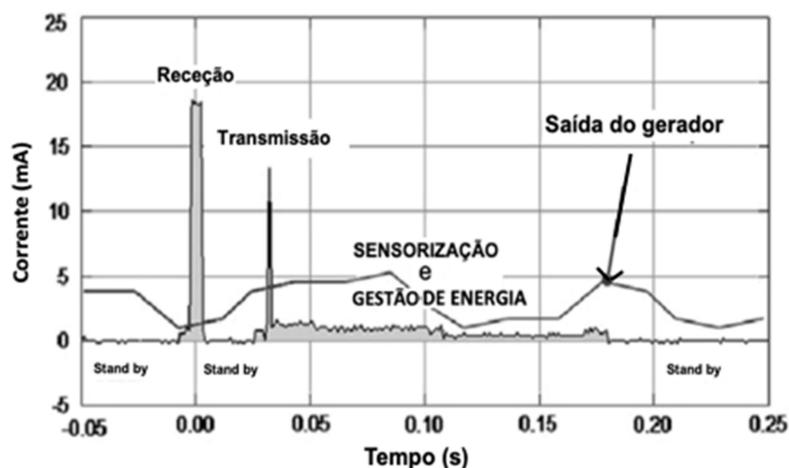


Figura 2.5: Evolução típica do consumo e da corrente gerada num nó sensor [9].

2.5 Tipos de transdutores utilizados na captação de energia das vibrações

A captação de energia das vibrações é uma técnica atraente para alimentar sensores sem fio e dispositivos de baixa potência. Embora a técnica pode ser empregue para captar a energia das vibrações, um requisito geral independente do mecanismo de transferência de energia é que a vibração do dispositivo de captação de energia operar em ressonância com a frequência de excitação [10].

A maior parte dos captadores de energia das vibrações são ressonantes e assim produzem maior potência de saída quando operam na frequência de ressonância [11]. Captadores de energia não ressonantes também têm ganho preponderância no mercado [12].

Temos os seguintes tipos de transdutores (ver ANEXO VII) utilizados na captação de energia das vibrações [13]:

- Eletromagnético.
- Piezoelétrico.
- Eletrostático.
- Triboelétrico;

As diversas técnicas de conversão de energia têm vantagens e desvantagens, como podemos constatar na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Comparação entre transdutores [14].

| | Transdutores Eletromagnéticos | Transdutores Piezoelétricos | Transdutores Eletrostáticos | Transdutores Triboelétricos |
|--------------|---|---|--|--|
| Vantagens | Correntes de saída elevadas; Longa duração; Boa eficiência em baixas frequências; | Tensões de saída elevadas; Não necessitam de uma fonte de alimentação externa; Implementação fácil, estruturas simples; | Tensões de saída elevadas; Redução no tamanho aumenta a capacitância; Construção de baixo custo; | Fáceis de fabricar; Pouco dispendiosos; Alta eficiência; |
| Desvantagens | Tensões de saída reduzidas; Difícil de desenvolver MEMS; | Material dispendioso; Material sofre fadiga; | Baixas capacitâncias; Baixas densidades de energia; Precisa de um circuito externo para a tensão de polarização; | Necessidade de várias matérias primas; Pouca durabilidade; |

2.6 Associação de transdutores: geradores de energia híbridos, de múltiplas fontes e integrados.

À medida que os geradores de energia individuais evoluem, a hibridização de diferentes mecanismos de captação de energia é uma das direções de pesquisas futuras. A hibridização não se limita apenas às configurações que combinam diferentes mecanismos de conversão de energia por meio de estruturas complexas. A captação de energia de múltiplas fontes com uma única peça de material multifuncional, seja composto ou novo material monolítico, deve receber atenção especial.

Pesquisas sobre esse assunto são relativamente escassas. No entanto, algumas perovskitas de haleto orgânico (por exemplo, $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{PbI}_3$) (Rakita et al., 2017) e filmes finos foto-ferroelétricos (por exemplo, BFCO ($\text{Bi}_2\text{FeCrO}_6$) (Nechache et al., 2015) e cerâmica (por exemplo, KBNNO ((K, Ba) (Ni, Nb) $\text{O}_3 - \delta$), KNBNNO ((K, Na, Ba) (Ni, Nb) $\text{O}_3 - \delta$)) (Bai et al., 2017), provaram ter efeito fotovoltaico considerável e ferroeletricidade forte. Novos geradores de energia de múltiplas fontes podem ser desenvolvidos com base nesses materiais, onde efeitos fotovoltaicos, piezoelétricos e piroelétricos podem ser exibidos simultaneamente para captar energia solar, cinética e térmica com apenas um material. Além disso, para melhor apoiar as aplicações industriais, mais sistemas autoalimentados e integrados com armazenadores de energia recarregáveis, precisam ser desenvolvidos. A viabilidade desses dispositivos será significativamente melhorada ao empregar geradores de energia híbridos ou de fontes múltiplas para aumentar sua eficiência [15].

Para incrementar a eficiência na conversão de energia e aumentar a densidade de potência de um captador de energia (*energy harvester*), os geradores híbridos usando simultaneamente a conversão piezoelétrica e eletromagnética receberam grande atenção [16]. Na figura 2.6 podemos ver um típico gerador híbrido eletromagnético – piezoelétrico para uma aplicação de captação de energia das vibrações.

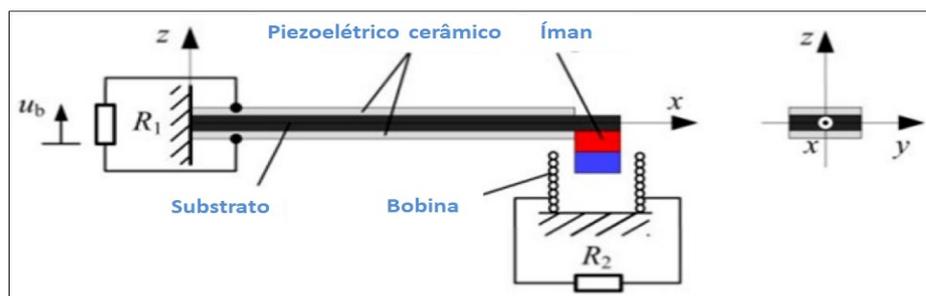


Figura 2.6: Típico gerador híbrido eletromagnético – piezoelétrico [17].

2.7 Estado da arte na captação de energia proveniente das vibrações

Atualmente, apesar de dispormos de baterias com maior densidade de energia e circuitos com menores necessidades energéticas, as fontes de energia para dispositivos implantáveis ainda requerem substituições frequentes da bateria. Como resultado, os pacientes são submetidos a múltiplos procedimentos cirúrgicos, com riscos para saúde (e altos custos, no caso de dispositivos implantáveis). A captação de energia de seres vivos, como um meio de recarregar uma bateria ou fornecer energia sem a necessidade de baterias, é uma solução promissora para este problema [18].

Captadores de energia estendem a flexibilidade de fontes vibracionais de baixa frequência que podem ser captadas, oferecendo a mais ampla faixa de amostragem de 10 a 100 Hz. É agora possível uma ampla faixa de amostragem, o que permite aproveitar, com mais produtividade, as fontes vibracionais do mundo real, apesar de sua irregularidade e aleatoriedade.

Nos pontos seguintes irão ser abordadas diferentes aplicações/implementações.

2.7.1 Captação de vibrações na ferrovia

Na figura 2.7 vemos possíveis aplicações para captação de vibrações na ferrovia.

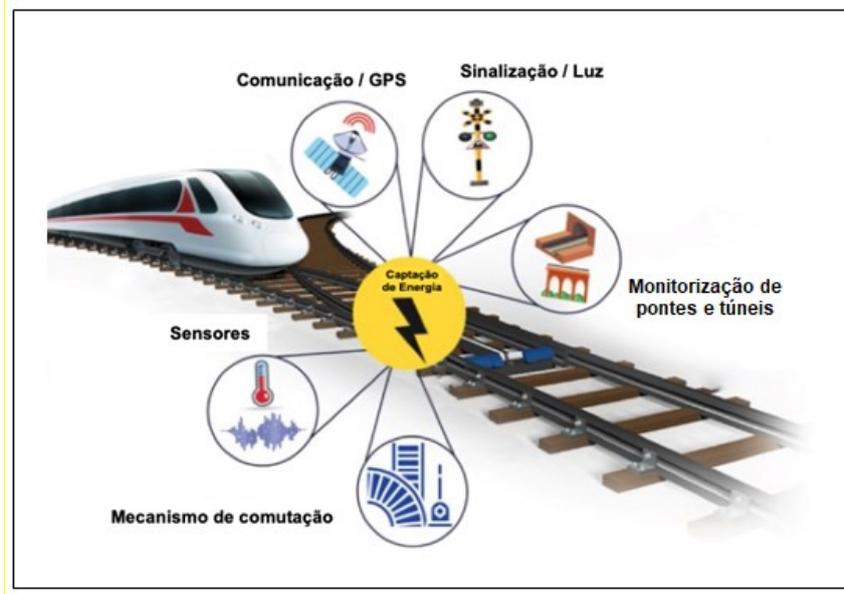


Figura 2.7: Captação de energia na ferrovia [19].

2.7.2 Transdutores de película fina

A empresa Meggitti Sensing Systems, através da sua derivada (Spin off), InSensor, já produz filmes de pequena espessura utilizando serigrafia. O seu foco passa por produzir dispositivos que podem operar com níveis de aceleração relativamente modestos, conseguindo valores entre 15-20 μW , com 0.5 g de aceleração [20]. Na figura 2.8 podemos ter uma ideia da dimensão do dispositivo.

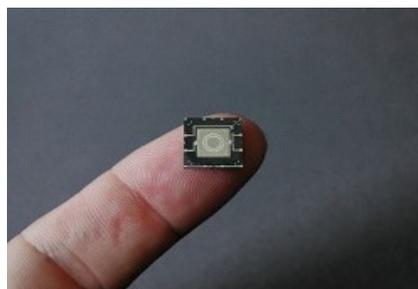


Figura 2.8: Transdutores de película fina [21].

2.7.3 Utilização na aviação para captação de energia e deteção de instabilidades

Na aviação é cada vez mais comum, a utilização de sensores sem fio. A captação de energia através de transdutores piezoelétricos, nesta área, possibilita a deteção, por

exemplo, da deflexão de um elemento estrutural para além de um determinado intervalo calibrado poderá ser usada para desencadear um aviso de segurança [22], ver figura 2.9.

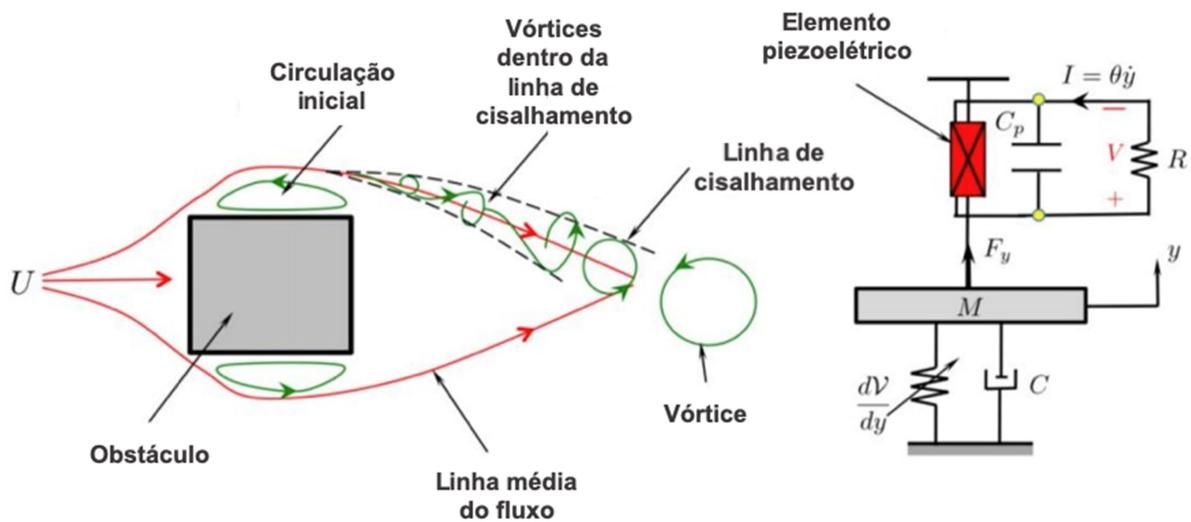


Figura 2.9: Modelo de aplicação para a aviação [22].

2.7.4 Implementação macro/milimétrica de geradores

Na figura 2.10 podemos ver vários tipos de geradores na escala macro e milimétrica.

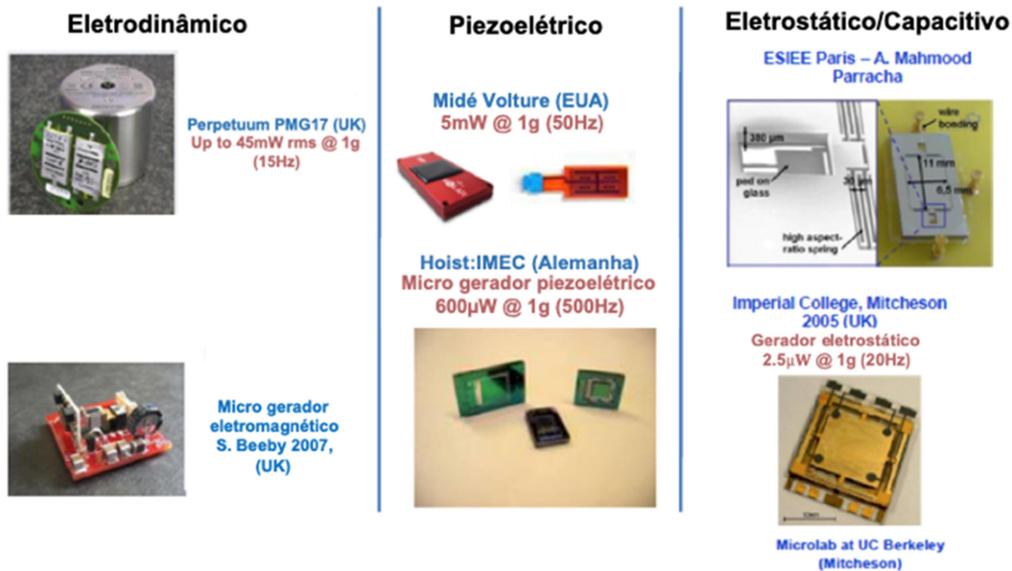
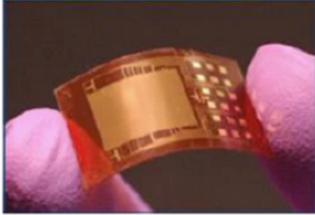


Figura 2.10: Geradores na escala macro e milimétrica [23].

2.7.5 Implementação micro/nano de geradores

Na figura 2.11 podemos ver vários tipos de geradores na escala micro e nano.

Nanofios de óxido de zinco (ZnO)

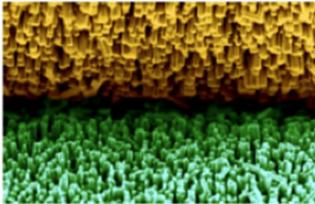


Zhong Lin Wang, Ph.D., Georgia Institute of Technology.

200 μ W @ 1.5g (150Hz) e carregamento de um condensador à tensão de 1.85V



University of Michigan (USA)



Nanogeradores que produzem corrente a partir do movimento de roedores



Figura 2.11: Geradores na escala micro e nano [23].

2.7.6 Aplicações com nanosensores

Na figura 2.12 podemos ver várias possibilidades de potenciais aplicações para captação de energia com nanosensores piezoelétricos, atuados pela atividade corporal.

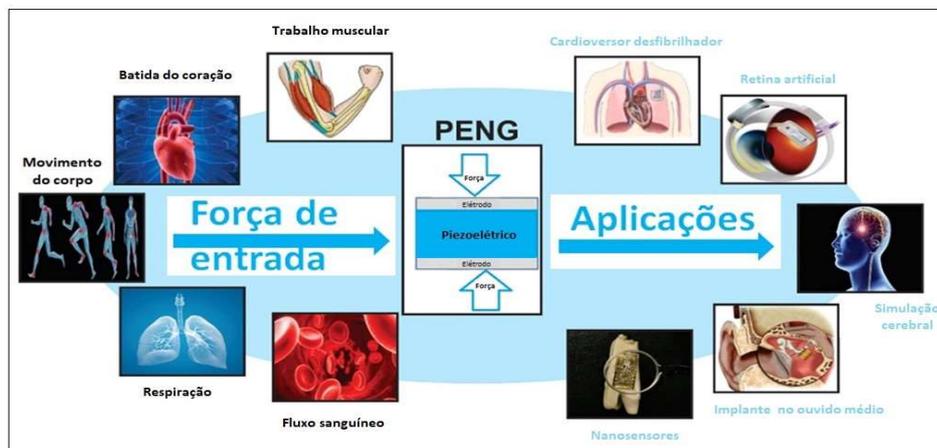


Figura 2.12: Aplicações com nanosensores piezoelétricos para captação de energia [24].

2.7.7 Aplicação com transdutores piezoelétricos utilizando *machine learning*

Na figura 2.13 podemos ver uma aplicação de um sensor de posição de marcha com utilização de aprendizagem de máquina (*machine learning*). Recorrendo a transdutores piezoelétricos, que ao serem utilizados como geração de energia de vibração, possibilitam um sistema com sensores sem fios, integrado na infraestrutura. É esperado que a utilização da infraestrutura de transporte pode ser analisada a partir do sinal de marcha.

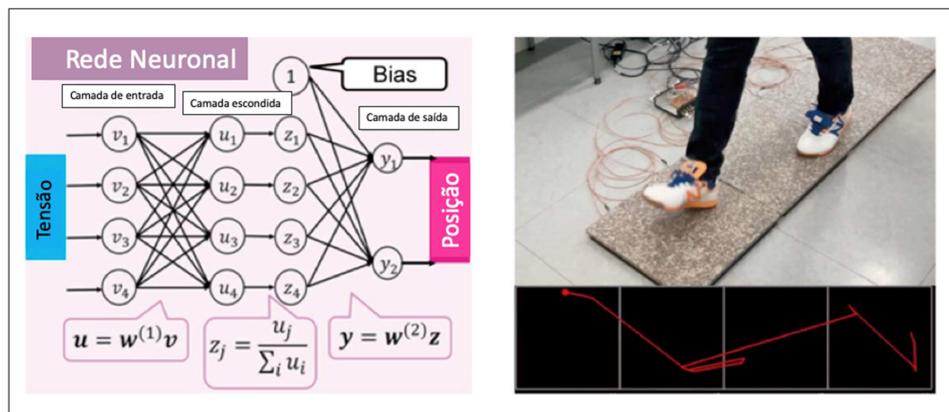


Figura 2.13: Aplicação de transdutores piezoelétricos com *machine learning* [25].

2.7.8 Aplicação com inteligência artificial

Neste ponto, temos a integração da captação de energia de vibrações, com a inteligência artificial (AI). A inteligência artificial implementada num robô, com função motora, aprende perceptualmente o movimento do braço como informação visual, usando a captação de energia vibracional e luz do *LED* instalado no robô, conforme podemos ver na figura 2.14. Assim a inteligência artificial adquire o conhecimento físico e sensorial.

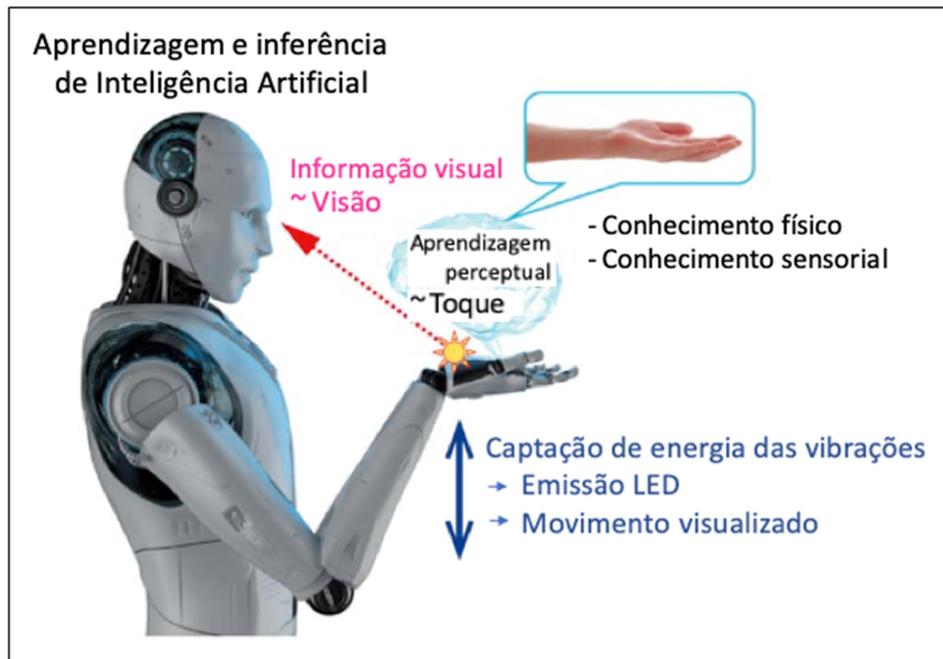


Figura 2.14: Aplicação de captação de energia das vibrações juntamente com inteligência artificial [25].

2.8 Princípio de funcionamento de transdutores eletromagnéticos

O eletromagnetismo, conforme definido pela lei da indução de Faraday, constitui os princípios de funcionamento de um transdutor eletromagnético. Quando uma bobina de material eletricamente condutor é movida em relação a um campo magnético (ou vice-versa), uma força eletromotriz (EMF) será induzida na bobina e uma corrente fluí numa carga a que a bobine esteja ligada. O movimento mecânico da bobina ou do campo magnético (íman) é assim convertido em corrente elétrica. A título de exemplo, a figura 2.15 mostra uma representação esquemática de um gerador eletromagnético, no qual foram montados ímanes junto à extremidade livre da base de apoio (cantilever). Neste gerador, o campo magnético (ímanes) move-se em relação a uma bobine que se encontra fixa a um suporte vertical. Este movimento do campo magnético é originado pela vibração da base de apoio (cantilever), à qual se encontram fixos os ímanes [26].

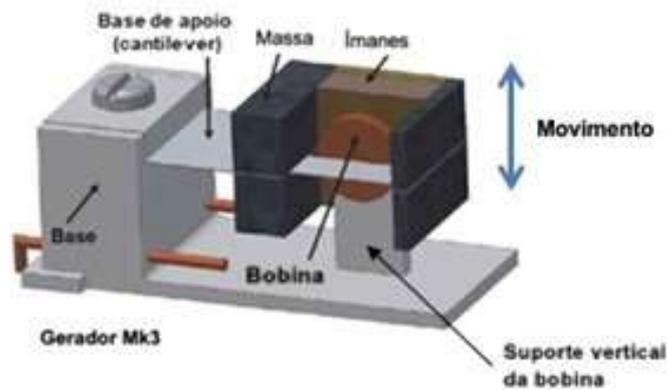


Figura 2.15: Representação de um gerador eletromagnético [26].

Uma das características mais importantes deste tipo de gerador, é a frequência de ressonância, que pode ser mudada, alterando a espessura da base de apoio (cantilever) e o material que a compõe [27], conforme podemos ver na figura 2.16.

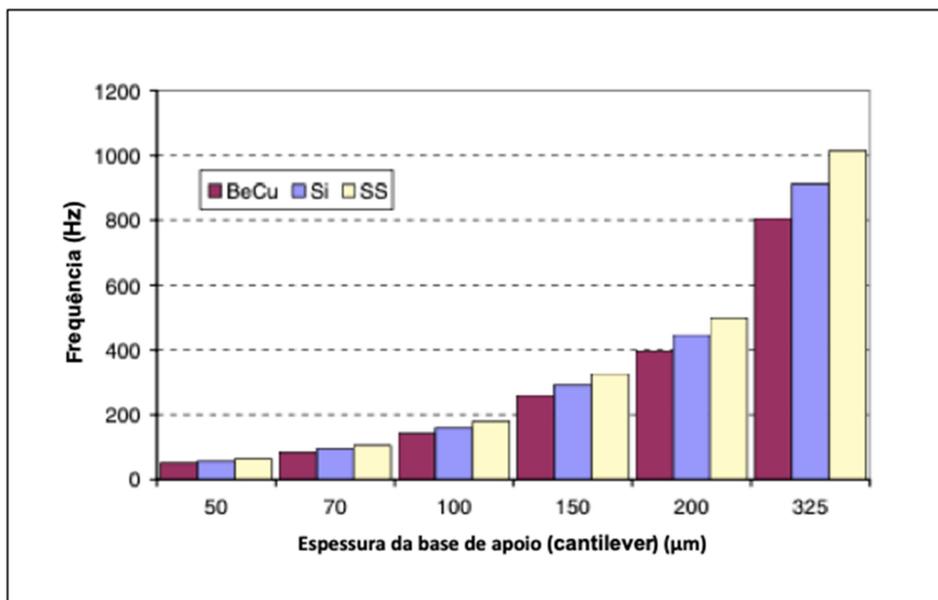


Figura 2.16: Frequência do gerador variando a espessura do cantilever e o material que o compõe [27].

A frequência das vibrações mecânicas é uma das características mais importantes, em muitos campos de aplicação as frequências são baixas, o que coloca diversos entraves ao desenvolvimento de geradores de pequenas dimensões, uma vez que baixar a frequência significa aumentar as suas dimensões. O uso de materiais poliméricos veio permitir baixar a

frequência de ressonância e tendo um comportamento não linear, permite grande amplitude das oscilações [25].

2.8.1 Gerador eletromagnético com mola planar

Nesta secção é apresentado um gerador eletromagnético que se baseia na utilização de uma mola planar, possibilitando o fabrico de dispositivos de pequenas dimensões.

A configuração do dispositivo utilizada foi proposta por Mallick et al. [28]. Ele consiste em quatro partes principais: mola, ímanes, bobina de cobre e estrutura. Os ímanes estão presos na parte superior central da estrutura da mola enquanto a bobina é montada na lâmina de vidro da moldura, que é separado da mola pelos espaçadores, conforme mostrado na Figura 2.17. Quando os ímanes se movem para cima e para baixo por ação de vibração externa no gerador, a distância entre a bobina e os ímanes varia, e uma f.e.m. é induzida na bobina de acordo com a lei de indução de Faraday.

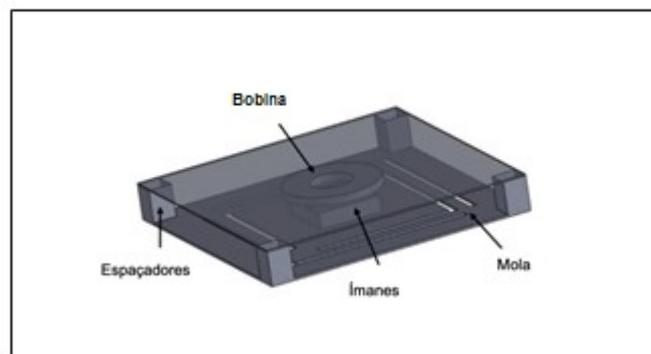


Figura 2.17: Gerador eletromagnético proposto por Mallick *et al.* [28].

As molas planares podem ter diferentes estruturas conforme podemos observar no anexo II.

2.8.2 Modelo

O gerador de energia pode ser modelado como um sistema de amortecimento de massa de mola com excitação de base [29].

A equação diferencial do sistema eletromecânico é dada por:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + F(x) + \gamma I = -m\ddot{z} \quad (1)$$

onde m é a massa inercial, x é o deslocamento relativo entre a massa e a estrutura, \dot{x} é o valor da velocidade segundo um eixo x , [m/s], \ddot{x} é o valor da aceleração segundo um eixo x , [m/s²], c é a taxa de amortecimento mecânico, $F(x)$ é a força generalizada da mola, γ é o coeficiente de acoplamento eletromagnético, I é a corrente induzida e z é a amplitude de oscilação da vibração de entrada. Para um gerador linear, a força armazenada é proporcional ao deslocamento:

$$F(x) = kx \quad (2)$$

onde k é o coeficiente de rigidez linear. No caso da captação não linear, isso foi mostrado no estudo de Mallick et al. [27] que a força de armazenamento pode ser modelada como a força da mola não linear semelhante ao oscilador Duffing de mola de endurecimento,

$$F(x) = kx + K_n x^3 \quad (3)$$

onde k_n é o coeficiente de rigidez não linear. Então, a equação (1) pode ser reescrita como

$$m\ddot{x} + 2m\rho\omega_0\dot{x} + kx + K_n x^3 + \gamma I = -m\ddot{z} \quad (4)$$

onde ρ é o coeficiente de amortecimento mecânico e ω_0 é a frequência de ressonância. Para o sistema linear, o termo com a rigidez não linear será ignorado. A corrente induzida pode ser modelada no seguinte circuito elétrico:

$$L\dot{I} + RI - \gamma \dot{x} = 0 \quad (5)$$

onde L é a indutância eletromagnética e R é a resistência total, combinando a resistência da bobina R_C e a resistência de carga R_L . Podemos negligenciar a indutância da bobina, que é geralmente aceita para baixas frequências. A equação seguinte pode ser derivada das equações (4) e (5):

$$m\ddot{x} + 2m\rho\omega_0\dot{x} + \frac{\gamma^2}{R}\dot{x} + kx + K_n x^3 = -m\ddot{z} \quad (6)$$

A tensão e a potência numa resistência de carga R_L , sendo V_C a tensão na bobina, são dados por:

$$V_L(t) = V_C \left(\frac{R_L}{R_L + R_C} \right) = \gamma \dot{x} \left(\frac{R_L}{R_L + R_C} \right) \quad (7)$$

e

$$P_L(t) = \frac{V_L(t)^2}{R_L} \quad (8)$$

2.8.3 Fator de qualidade Q

Em aplicações de captação de energia, o fator de qualidade (fator Q) é outro parâmetro importante que reflete o desempenho da geração de energia. O fator Q é definido como a razão entre a frequência de ressonância (e a largura do pico ressonante em sua metade da altura (f), ou seja, $Q = f_r / f$. Basicamente, os geradores de energia com um fator Q mais alto terão uma deflexão maior. A potência gerada é proporcional à deflexão máxima, portanto, conseqüentemente, proporcional ao fator Q [30].

2.9 Princípio de funcionamento de transdutores piezoelétricos

Num transdutor piezoelétrico (PE-VEH, PiezoElectric Vibration Harvester), um material piezoelétrico é depositado numa base de apoio (*cantilever*).

Estão disponíveis vários materiais piezoelétricos. A seleção de um determinado material piezoelétrico depende de um conjunto de critérios, como constante dielétrica, temperatura de Curie ou módulo de elasticidade do material. Por exemplo, para vibrações com aceleração alta, os materiais piezoelétricos (titanato de chumbo e óxido de alumínio), podem ser a escolha desejável. No entanto, para aplicações de alta temperatura, o óxido de alumínio é o material escolhido. O titanato de zirconato de lantânio de chumbo tem uma constante dielétrica de valor muito alto, portanto, espera-se que funcione muito bem em ambientes de vibração com baixa aceleração. Devido à facilidade de fabrico no local de Titanato de Zirconato de Chumbo (PZT) e à fácil integração do fabrico de PZT com os outros processos de micro fabrico, o PZT é amplamente utilizado como material de transdução. Com base na arquitetura do dispositivo, os PE-VEHs relatados podem ser classificados em base de apoio unimorfa [31] e base de apoio bimorfa [32].

2.9.1 Princípio de operação

Um transdutor piezoelétrico depende do efeito piezoelétrico direto, pelo qual ao exercer uma tensão mecânica no material piezoelétrico depositado na base de apoio, irá induzir carga elétrica na capacitância piezoelétrica e, assim, uma tensão (ou campo elétrico) é desenvolvida através dos terminais do dispositivo [33].

Por outro lado, um transdutor piezoelétrico experimentará uma força mecânica ou tensão quando uma tensão é aplicada nos terminais do dispositivo.

Normalmente, um gerador de energia piezoelétrico compreende uma base de apoio (cantilever), com uma ou duas camadas (unimorfa ou bimorfa) de material piezoelétrico depositado, como titanato de zirconato de chumbo (mais comumente conhecido como PZT) e uma massa sísmica anexada à extremidade livre da base de apoio [34].

Na figura 2.18 temos um exemplo genérico de captação de energia através de um transdutor piezoelétrico.

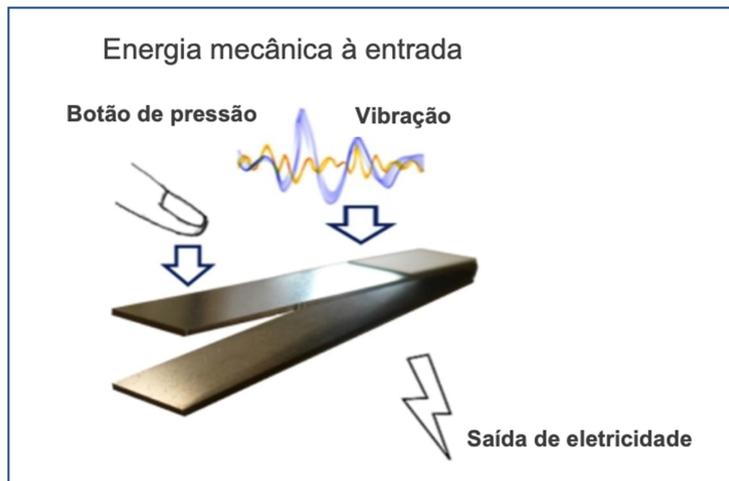


Figura 2.18: Exemplo genérico de captação de energia através de um transdutor piezoelétrico [35].

A conversão de energia mecânica em energia elétrica depende do coeficiente de acoplamento piezoelétrico, k_{ij} , e da capacitância do material piezoelétrico, C_p . Os subscritos i e j no coeficiente de acoplamento representam a polarização do material no espaço tridimensional. Existem dois modos para materiais piezoelétricos, ou seja, modo 33 e modo 31. Os materiais piezoelétricos são normalmente usados no modo 33 porque tem um coeficiente de acoplamento mais alto do que no modo 31 [36].

No modo 33, tanto a deformação aplicada quanto o campo elétrico estão na mesma direção. No modo 31, a deformação atua na direção 3 e o campo elétrico desenvolvido através do dispositivo está no plano ortogonal, ou seja, na direção 1 [37].

2.9.2 Conversão piezoelétrica

Na figura 2.19 temos o modelo de conversão mecânica – elétrica para transdutores piezoelétricos.

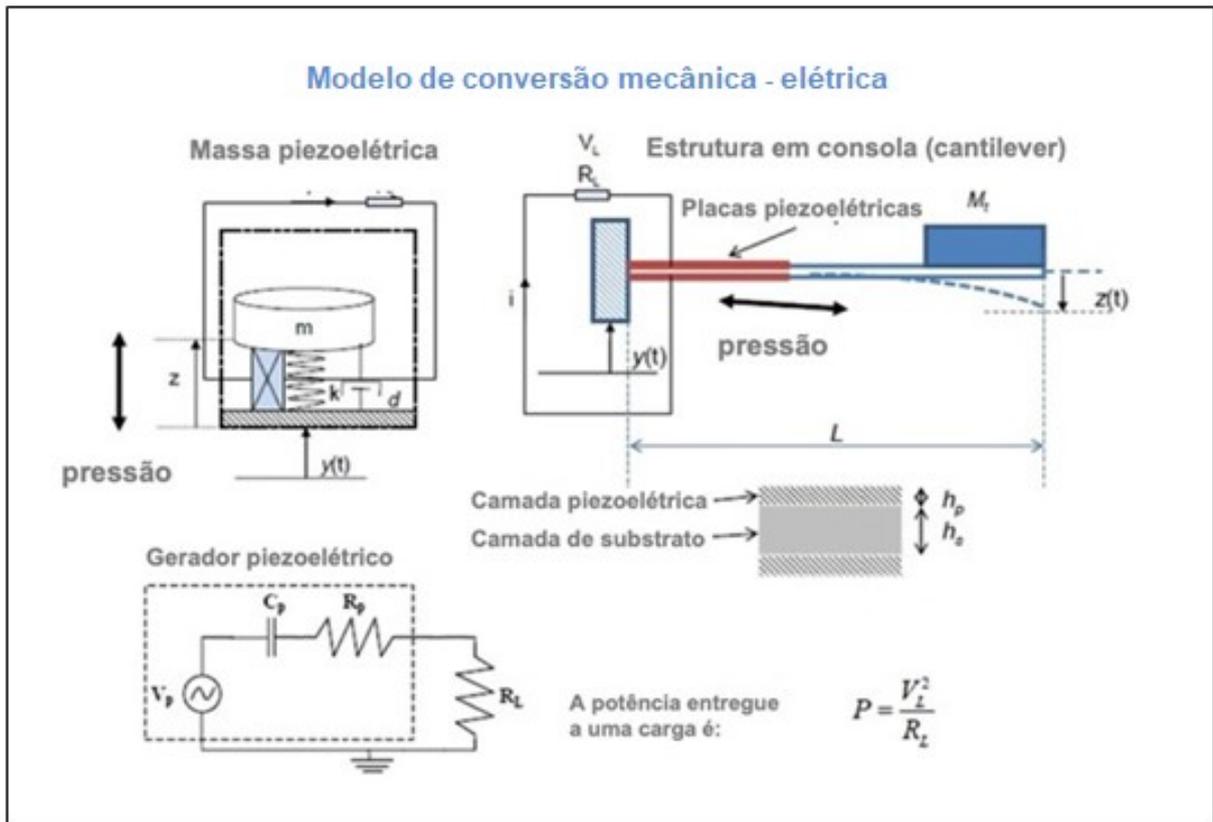


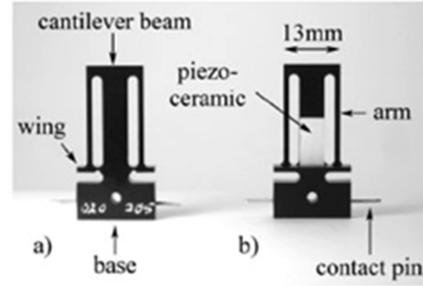
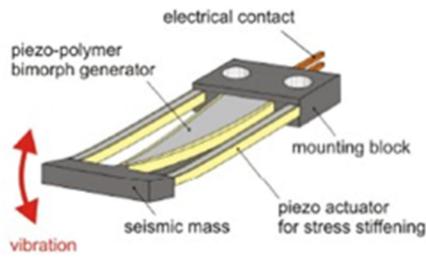
Figura 2.19: Conversão piezoelétrica [4].

A massa de prova, algumas vezes designada como massa sísmica (em acelerómetros), designada na figura 2.21 como M_t , é uma massa que é fixada à extremidade livre do transdutor piezoelétrico com a finalidade de diminuir a frequência natural da estrutura para aplicações de baixa frequência de operação [38].

2.9.3 Largura de banda

A maioria dos dispositivos de captação de energia desenvolvidos até o momento têm uma frequência de ressonância base única e recentemente têm sido feitos esforços para ampliar a faixa de frequência de captação de energia.

Na figura 2.20 podemos ver um gerador piezoelétrico sintonizável na frequência.



Princípio:

- A força que atua nos braços do piezoelétrico vai fortalecer o feixe ressonante e assim alterará sua frequência de ressonância.
- **Faixa de frequência maior (22%).**
- **Diminuição do fator Q com o aumento da força nos braços do piezoelétrico.**

C. Eichhorn *et al.*, *Proc. PowerMEMS 2008*, Sendai, Japan, 309-312.

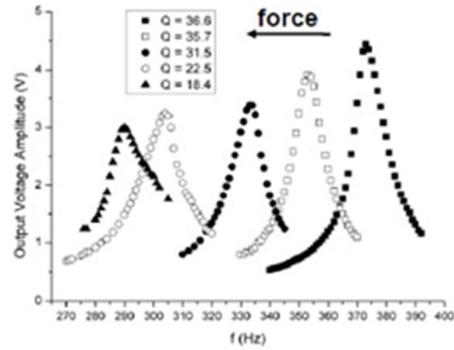


Figura 2.20: Transdutor piezoelétrico com sintonização de frequência [39].

2.9.4 Exemplo da influência da frequência das vibrações e da resistência da carga, na potência de saída, experimental e modelada

Na figura 2.21 temos um exemplo de evolução da potência em função da frequência num transdutor piezoelétrico.

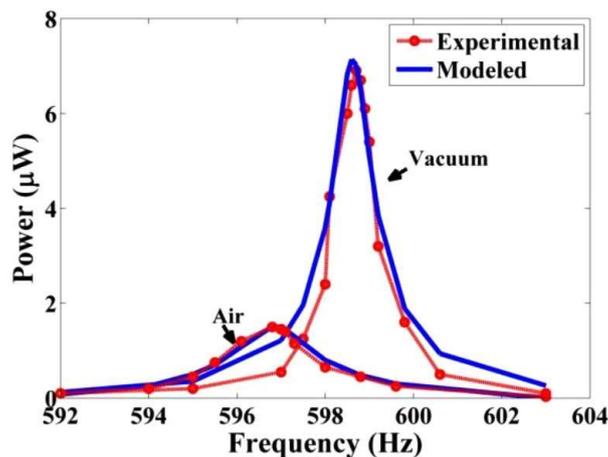


Figura 2.21: Frequência vs potência, modelado e experimentalmente, para o ar e em vácuo [40].

Na figura 2.22 temos um exemplo de evolução da potência de saída em função do valor de uma carga, num transdutor piezoelétrico.

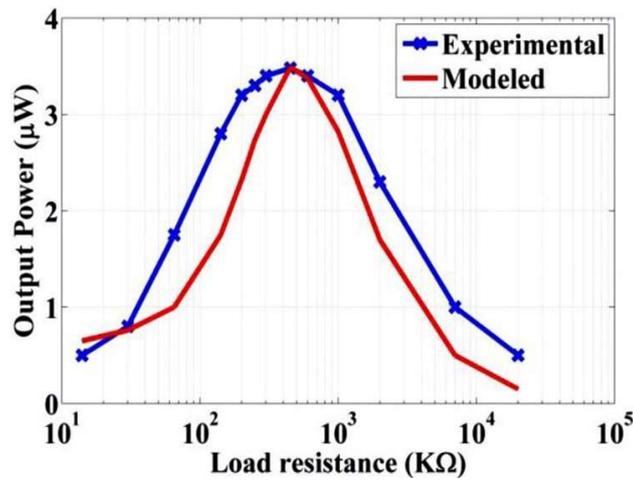


Figura 2.22: Valor da carga vs potência, modelado e experimentalmente [40].

2.9.5 Piezoelétrico com duas camadas

Na figura 2.23, podemos ver vários tipos de geradores piezoelétricos com camada superior e camada inferior (bimorph):

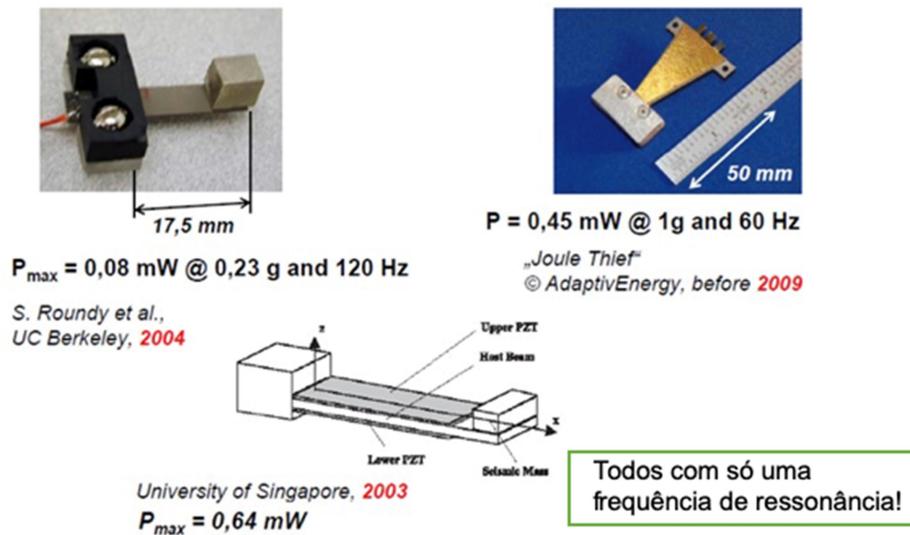


Figura 2.23: Piezoelétricos bimorph [41].

Capítulo 3

3 Caracterização experimental de fontes de vibrações

3.1 Introdução

Procedeu-se à análise de 4 fontes acessíveis de energia de vibrações: motor de automóvel, motor de bomba de água, motor de furadeira e vibrações do passo humano.

Para tal foi utilizado o acelerómetro de um telemóvel (marca Samsung, modelo Galaxy S8), usando a aplicação de *software* (app), myFrequency, Versão 2.1, da empresa Apptodate.

O peso do telemóvel c/ capa de proteção é de aproximadamente 185 g.

As características do sensor utilizado para a medição da aceleração são:

Nome: LSM6DSL Acceleration Sensor

Produtor: STM

Máxima taxa de amostragem: 500 Hz

Gama do sensor: +/- 78.4532 m/s²

Resolução: 2.3942018 mm/s²

Para cada medição a seguir apresentada foram consideradas as vibrações segundo o eixo que coincidia com a perpendicular ao suporte aonde o sensor de vibrações foi colocado, perpendicular ao ecrã do telemóvel.

3.2 Motor de automóvel

Procedeu-se à caracterização de vibrações em um automóvel, utilizando a medição de vibração no motor de um automóvel, marca Audi A4 1800 a gasolina, 92 kW (figura 3.1), nas 2700 rpm (45 Hz) aproximadamente, com o acelerómetro LSM6DSL.

O eixo considerado foi o eixo Z (perpendicular à superfície do motor).



Figura 3.1: Orientação dos 3 eixos do acelerómetro colocado sobre o motor de automóvel.

Na figura 3.2 vemos o espectro de frequência da vibração do motor testado, segundo o eixo Z.



Figura 3.2: Espectro das frequências da vibração do motor de automóvel a 2700 rpm, no eixo Z.

Verificamos que a frequência com maior aceleração é a de 44,85 Hz, com uma aceleração de $4,63 \text{ m/s}^2$. As vibrações segundo os outros eixos eram menores que as do eixo Z.

3.3 Motor de bomba de água

Procedeu-se à caracterização de vibrações em uma bomba de água de superfície, de marca STERWINS, modelo 1300 W AUTO (figura 3.3), utilizando a medição de vibração na bomba, com o acelerómetro LSM6DSL.

O eixo considerado foi o eixo do Z (perpendicular à superfície do motor).



Figura 3.3: Orientação dos 3 eixos do acelerómetro colocado sobre o motor da bomba.

Na figura 3.4 vemos o espectro das frequências da vibração do motor, segundo o eixo Z.



Figura 3.4: Espectro das frequências da vibração da bomba de água, segundo o eixo Z.

Verificamos que a frequência com maior aceleração é a de 48,6 Hz, com uma aceleração de 0,178 m/s².

3.4 Motor de furadeira

Procedeu-se à caracterização de vibrações em uma furadeira, de marca BOYE, modelo ZJ4113 Drill Press, de 350 W, utilizando a medição de vibração no motor, com o acelerómetro LSM6DSL (figura 3.5).

O eixo considerado foi o eixo Z (perpendicular à superfície da furadeira).



Figura 3.5: Orientação dos 3 eixos do acelerómetro colocado sobre o motor da furadeira.

Na figura 3.6 vemos o espectro das frequências da vibração da furadeira, segundo o eixo Z.



Figura 3.6: Espectro das frequências da vibração da furadeira segundo o eixo Z.

Verificamos que a frequência com maior aceleração é a de 100,43 Hz, com uma aceleração de 0,854 m/s².

3.5 Passo humano

Procedeu-se à caracterização de vibrações do passo humano, utilizando a medição de vibração junto ao pé, com o acelerómetro LSM6DSL (figura 3.7).

O eixo considerado foi o eixo do Y (na direção da perna).



Figura 3.7: Orientação dos 3 eixos do acelerómetro colocado sobre a parte lateral da perna.

Na figura 3.8 vemos o espectro das frequências da vibração do passo humano, segundo o eixo Z.

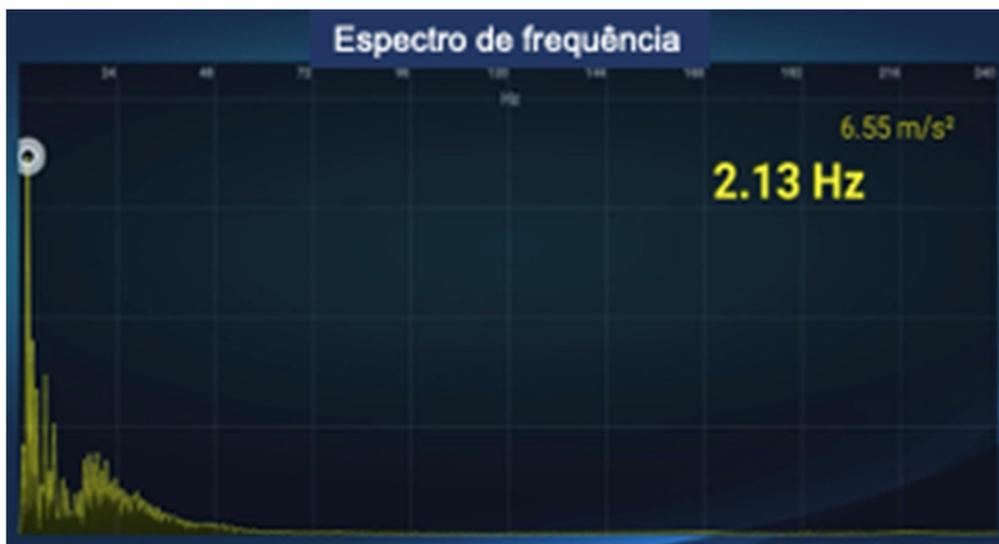


Figura 3.8: Espectro das frequências da vibração do passo humano, segundo o eixo Y. Verificamos que a frequência com maior aceleração é a de 2.13 Hz, com uma aceleração de $6,55 \text{ m/s}^2$.

3.6 Discussão

Das fontes analisadas, aquela que apresentava maior aceleração é a obtida com o passo humano. Os motores elétricos revelaram ter vibrações muito inferiores às do motor de combustão, embora tendo também uma potência muito inferior.

Apesar de as vibrações do passo humano terem maior aceleração, como são produzidas a uma frequência muito mais baixa que a das outras fontes de vibrações, a energia gerada também será inferior às outras.

Capítulo 4

4 Captação experimental de energia das vibrações com um transdutor piezoelétrico

Por forma a caracterizar o desempenho de um transdutor piezoelétrico, foram implementados dois *setups*, o *setup* da figura 4.1 para medição da resposta do transdutor eletromagnético em circuito aberto e o *setup* da figura 4.2 para medição da resposta do transdutor eletromagnético em circuito fechado (resistência de carga ligada à saída do transdutor). Estes *setups* permitem a medição da resposta do transdutor de acordo com alterações em variáveis do sistema, tais como: a frequência da vibração, aceleração, valor da massa de prova e valor da resistência de carga.

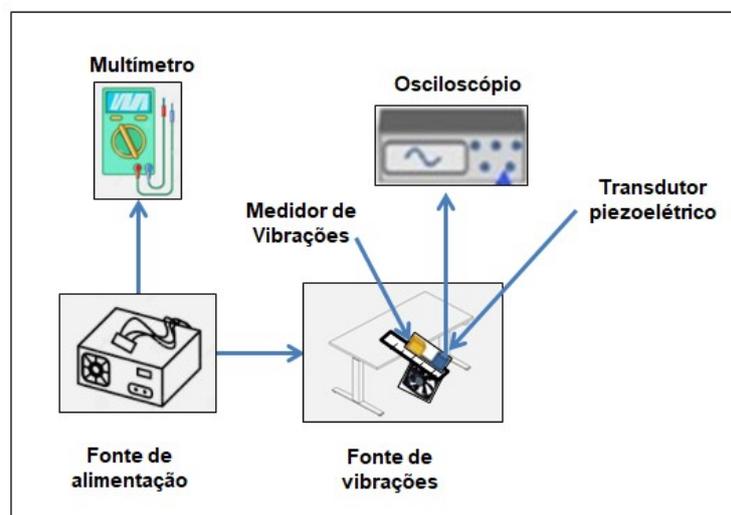


Figura 4.1: *Setup* para medição da resposta do transdutor piezoelétrico V22B em circuito aberto.

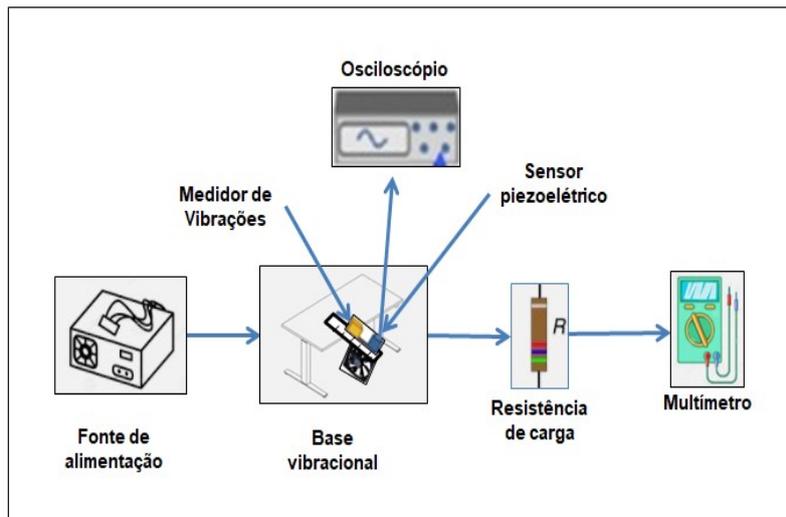


Figura 4.2: *Setup* para medição da resposta do transdutor piezoelétrico V22B em circuito fechado.

A lista de todos os componentes utilizados está disponível no ANEXO III.

4.1 Transdutor piezoelétrico Volture V22B

Estão disponíveis várias configurações de transdutores piezoelétricos. O transdutor Volture contém duas *wafers* (placas) piezoelétricas com pinos de saída individuais. Estes são mais comumente ligados em paralelo com o dobro da corrente de saída, mas uma ligação em série pode ser utilizada para duplicar a tensão e reduzir a capacitância na saída.

O transdutor V22B do fabricante Midé Technology, tem uma potência que pode variar de 0,02 mW (0,25 g de aceleração, 110 Hz, 0 g de massa de prova, 2 V), a 1,84 mW (1 g de aceleração, 30 Hz, 2 g de massa de prova, 20 V).

Na figura 4.3, vemos as dimensões do transdutor em polegadas.

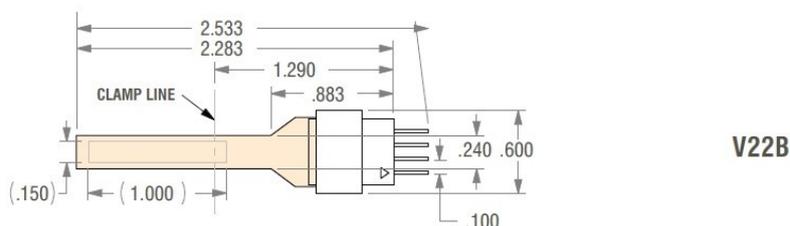


Figura 4.3: Transdutor piezoelétrico Volture V22B.

O suporte para o transdutor pode ser visto na figura 4.4.

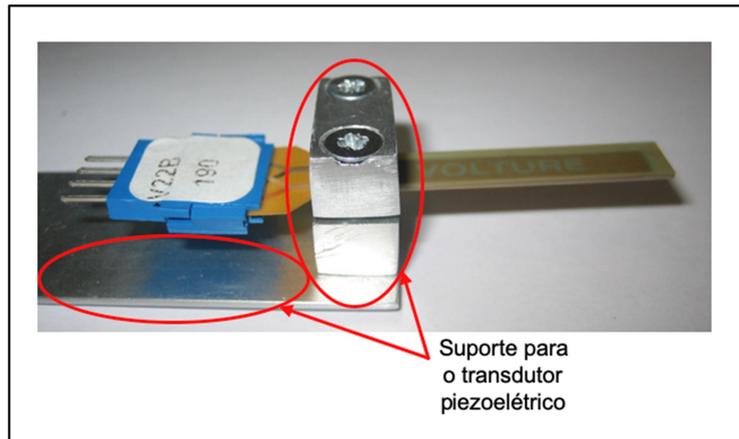


Figura 4.4: Suporte construído para fixação do transdutor piezoelétrico V22B.

4.2 Configuração da fonte de vibrações com o transdutor piezoelétrico V22B

A lista de todos os componentes utilizados está disponível no ANEXO III.

Foi utilizado um acelerómetro para a medição de vibrações que se encontra incorporado no telemóvel marca Samsung, modelo Galaxy S8, à semelhança das experiências do capítulo anterior. A app utilizada foi a myFrequency, Versão 2.1, da empresa Apptodate.

A ventoinha com a massa de borracha agregada (por forma a provocar desequilíbrio) e o suporte do transdutor, utilizados, podem ser vistos nas figuras 4. 4 e 4.5.

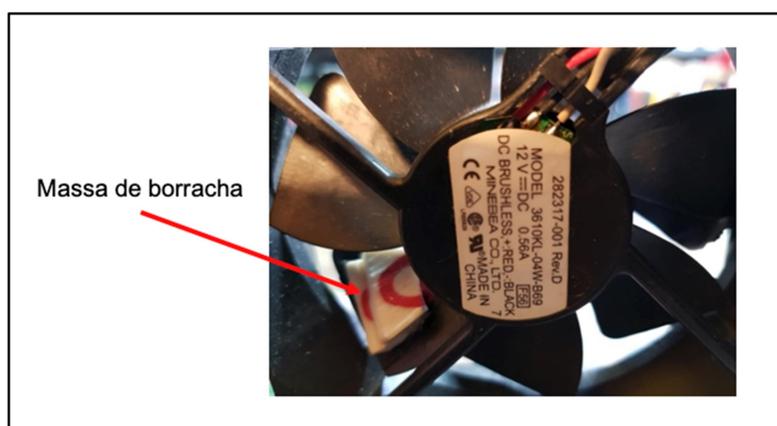


Figura 4.5: Ventoinha com a massa de borracha agregada.

Nas figuras 4.6 e 4.7, podemos ver várias perspetivas da montagem do transdutor piezoelétrico na fonte de vibrações (régua fixa ao tampo de uma mesa) e ligações elétricas. Procedeu-se à ligação das *wafers* em série.

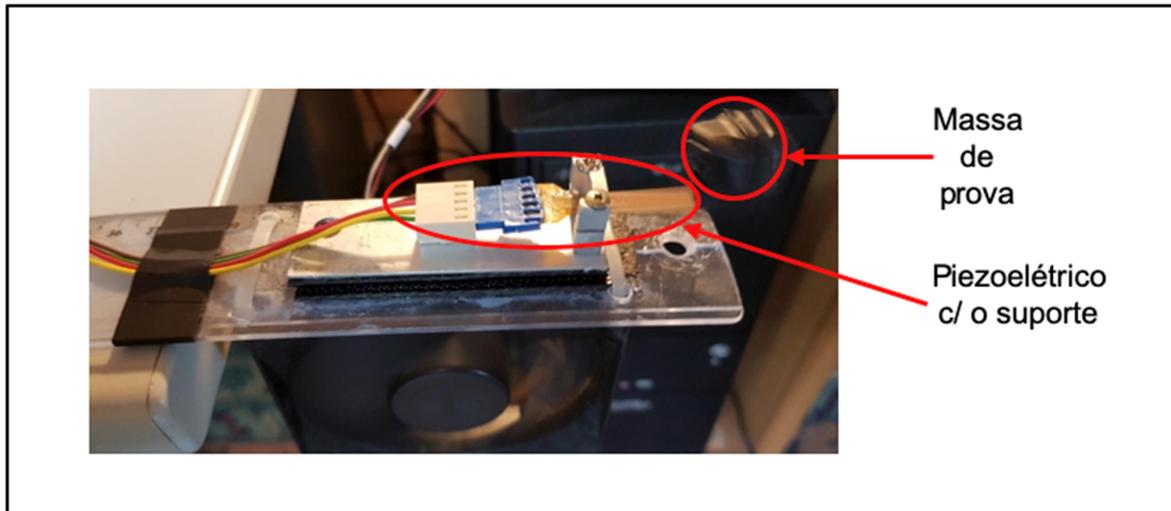


Figura 4.6: Transdutor piezoelétrico em captação, visto por cima.

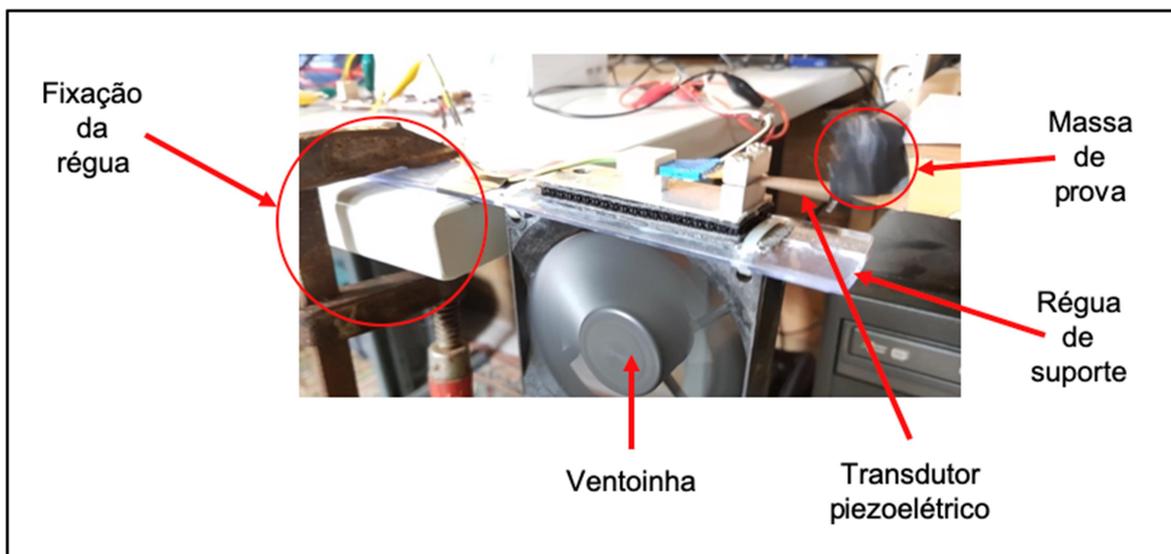


Figura 4.7: Transdutor piezoelétrico em captação, vista lateral.

4.3 Resposta do transdutor piezoelétrico em circuito aberto

Na tabela 4.1 temos a resposta do transdutor piezoelétrico em função da massa de prova e da tensão de alimentação da ventoinha.

Tabela 4.1: Resposta do transdutor piezoelétrico em função da massa de prova e da tensão de alimentação da ventoinha.

| Massa de prova (g) | Tensão da ventoinha (V) | Frequência de excitação (Hz) | Eixo do X | | Eixo do Y | | Eixo do Z | | Tensão AC em circuito aberto (V) |
|--------------------|-------------------------|------------------------------|--|-------------------------|--|-------------------------|--|-------------------------|----------------------------------|
| | | | Amplitude máxima da aceleração (m/s ²) | RMS (m/s ²) | Amplitude máxima da aceleração (m/s ²) | RMS (m/s ²) | Amplitude máxima da aceleração (m/s ²) | RMS (m/s ²) | |
| 0 | 3,0 | 20,81 | 0,532 | 0,378 | 0,121 | 0,031 | 2,240 | 1,573 | 0,2 |
| 0 | 4,5 | 29,80 | 1,132 | 0,668 | 0,313 | 0,148 | 5,821 | 3,617 | 0,4 |
| 0 | 6,0 | 37,73 | 2,329 | 1,775 | 1,109 | 0,432 | 6,745 | 4,590 | 0,8 |
| 0 | 7,5 | 42,62 | 3,461 | 2,818 | 1,222 | 0,689 | 7,712 | 4,625 | 1,0 |
| 0.5 | 3,0 | 21,05 | 0,557 | 0,357 | 0,074 | 0,031 | 2,318 | 1,658 | 0,8 |
| 0.5 | 4,5 | 30,05 | 0,895 | 0,589 | 0,302 | 0,134 | 5,543 | 3,005 | 1,4 |
| 0.5 | 6,0 | 36,73 | 2,438 | 1,823 | 1,053 | 0,334 | 7,613 | 4,101 | 3,9 |
| 0.5 | 7,5 | 41,73 | 3,799 | 1,910 | 1,340 | 0,591 | 8,838 | 4,541 | 9,8 |
| 1,0 | 3,0 | 21,48 | 0,603 | 0,380 | 0,253 | 0,051 | 3,220 | 1,710 | 0,9 |
| 1,0 | 4,5 | 29,97 | 0,964 | 0,713 | 0,253 | 0,111 | 6,228 | 3,819 | 3,8 |
| 1,0 | 6,0 | 36,93 | 2,658 | 1,815 | 1,485 | 0,663 | 6,228 | 3,980 | 5,4 |
| 1,0 | 7,5 | 42,95 | 3,998 | 1,917 | 2,931 | 1,263 | 9,300 | 5,246 | 10,2 |
| 2,0 | 3,0 | 21,57 | 0,713 | 0,384 | 0,073 | 0,026 | 1,124 | 0,845 | 1,9 |
| 2,0 | 4,5 | 29,57 | 0,853 | 0,641 | 0,192 | 0,084 | 5,472 | 3,156 | 3,9 |
| 2,0 | 6,0 | 37,44 | 2,532 | 1,353 | 0,935 | 0,577 | 8,472 | 4,913 | 9,0 |
| 2,0 | 7,5 | 43,41 | 2,436 | 1,783 | 0,641 | 0,427 | 9,550 | 5,470 | 13,1 |

Nas figuras 4.8, 4.9 e 4.10, podemos observar os espectros de frequência para vários valores de massa de prova, sendo mostrado o valor da aceleração para cada frequência mencionada.

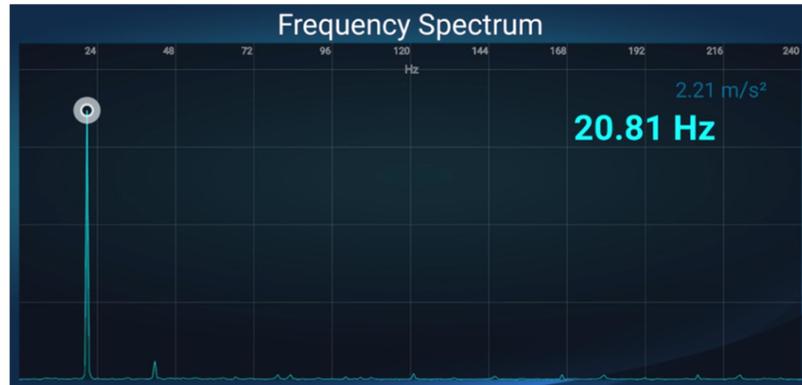


Figura 4.8: Espectro de frequência sem colocação de massa de prova e com a tensão de alimentação da ventoinha de 3 V.

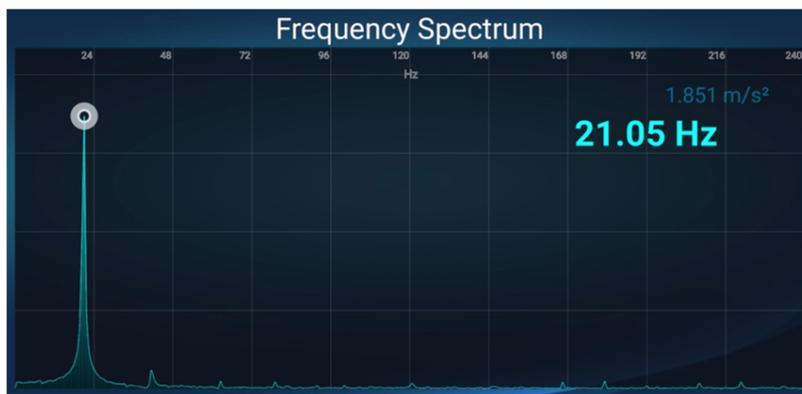


Figura 4.9: Espectro de frequência com massa de prova de 0.5 g e com a tensão de alimentação da ventoinha de 3 V.

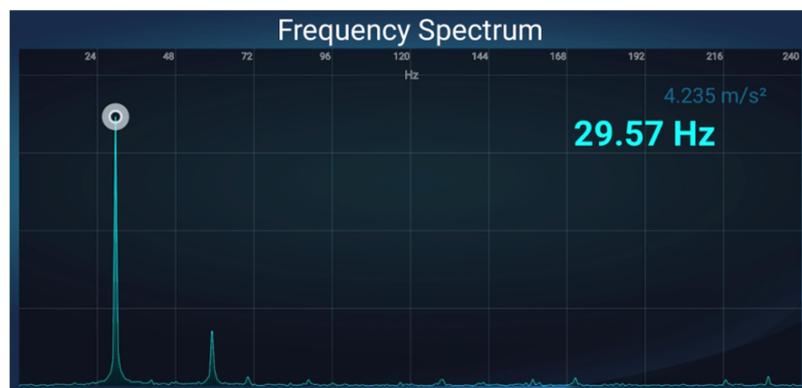


Figura 4.10: Espectro de frequência com massa de prova de 2.0g e com a tensão de alimentação da ventoinha de 4.5 V.

Na figura 4.11 vemos a frequência do sistema em função da tensão da ventoinha e da massa de prova.

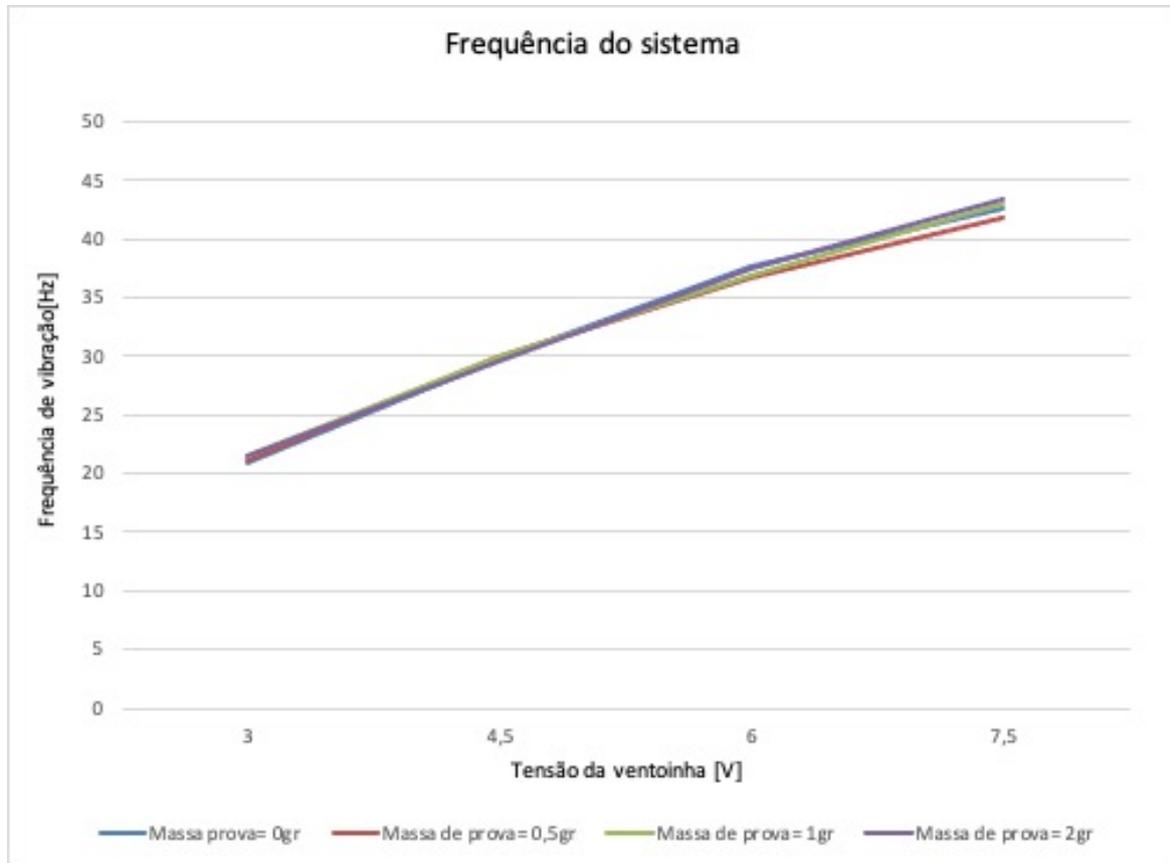


Figura 4.11: Frequência em função da tensão da ventoinha e da massa de prova.

Dos resultados obtidos podemos considerar que o valor da frequência de vibração do sistema, constituído pela fonte de vibrações, transdutor piezoelétrico e massa de prova é quase diretamente proporcional ao valor da tensão de alimentação da ventoinha. O aumento da tensão de alimentação da ventoinha, provoca o aumento da frequência de vibração do sistema e o aumento da sua aceleração (tabela 4.1). A massa de prova, que varia entre 0 e 2 g, altera pouco a frequência de vibração do sistema (vibração da ventoinha), uma vez que a massa do sistema, constituído pela fonte de vibrações, estrutura de suporte e transdutor tem um valor de aproximadamente 155 g que é consideravelmente maior.

Na figura 4.12 é apresentada a tensão à saída do piezoelétrico em função da massa de prova e da tensão da ventoinha.

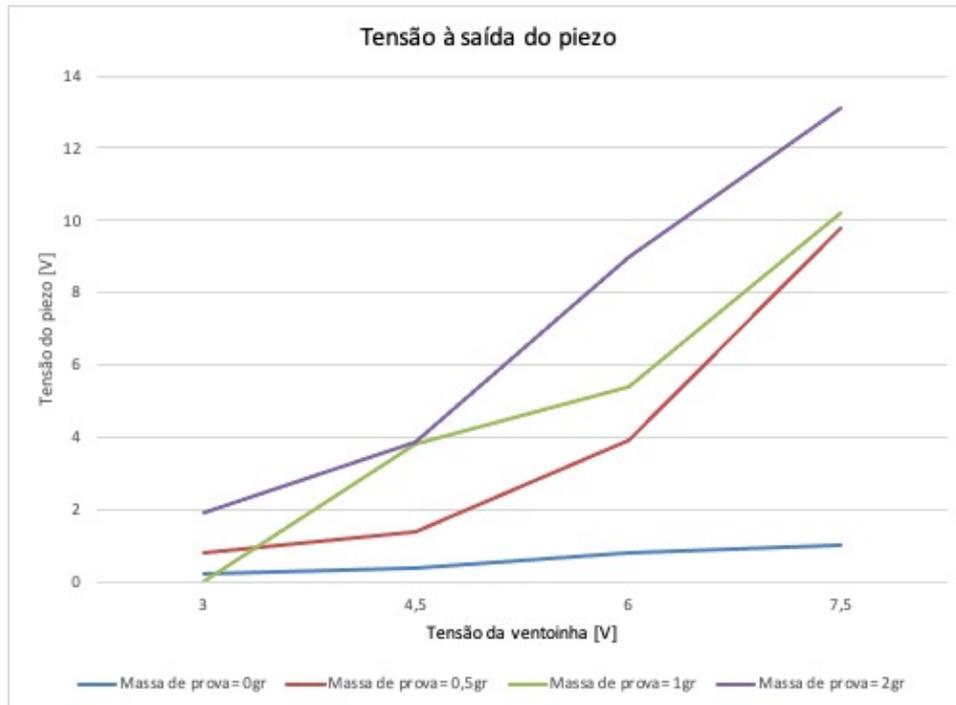


Figura 4.12: Tensão à saída do piezoelétrico em função da massa de prova e da tensão da ventoinha.

Dos resultados obtidos podemos considerar que o valor da tensão do transdutor piezoelétrico, em vazio, não é bem diretamente proporcional à tensão da ventoinha, dependendo bastante do valor da massa de prova.

4.4 Resposta do transdutor piezoelétrico em circuito fechado

Numa 2ª fase, foi utilizada uma resistência de carga de 4,8 k Ω , que possibilitou a obtenção de valores de corrente e potência. Na tabela 4.2 apresentam-se os valores de potência obtidos, sendo que variaram num intervalo de 0,0002 a 0,7605 mW. O valor da resistência de carga foi escolhido de acordo com o menor valor indicado pelo fabricante, para resistência interna do transdutor piezoelétrico.

Tabela 4.2: Valores de potência em função da massa de prova e tensão da ventoinha.

| Massa de prova (g) | Tensão da ventoinha (V) | Frequência de excitação (Hz) | Resistência de carga (k Ω) | Corrente (μ A) | Tensão (V) | Potência (mW) |
|--------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------------|---------------------|------------|---------------|
| 0 | 3,0 | 20,81 | 4,8 | 5,2 | 0,03 | 0,0002 |
| 0 | 4,5 | 29,80 | 4,8 | 10,4 | 0,05 | 0,0005 |
| 0 | 6,0 | 37,73 | 4,8 | 31,2 | 0,15 | 0,0045 |
| 0 | 7,5 | 42,62 | 4,8 | 47,9 | 0,23 | 0,0080 |
| 0.5 | 3,0 | 21,05 | 4,8 | 29,1 | 0,14 | 0,0045 |
| 0.5 | 4,5 | 30,05 | 4,8 | 58,3 | 0,28 | 0,0180 |
| 0.5 | 6,0 | 36,73 | 4,8 | 156,2 | 0,75 | 0,1280 |
| 0.5 | 7,5 | 41,73 | 4,8 | 352,1 | 1,69 | 0,6125 |
| 1 | 3,0 | 21,48 | 4,8 | 43,8 | 0,21 | 0,0080 |
| 1 | 4,5 | 29,97 | 4,8 | 160,4 | 0,77 | 0,1125 |
| 1 | 6,0 | 36,93 | 4,8 | 168,8 | 0,81 | 0,1805 |
| 1 | 7,5 | 42,95 | 4,8 | 360,4 | 1,73 | 0,6480 |
| 2 | 3,0 | 21,57 | 4,8 | 70,8 | 0,34 | 0,0245 |
| 2 | 4,5 | 29,57 | 4,8 | 164,6 | 0,79 | 0,1280 |
| 2 | 6,0 | 37,44 | 4,8 | 339,6 | 1,63 | 0,5445 |
| 2 | 7,5 | 43,41 | 4,8 | 381,3 | 1,83 | 0,7605 |

4.4.1 Análise da resposta do transdutor piezoelétrico V22B

O valor da massa de prova, entre 0 e 2 g, o valor da tensão, entre 3 e 7,5 V, e o valor da frequência de excitação entre 20,81 e 43,41 Hz, constituem os intervalos de valores para cada variável do sistema. Verifica-se que o aumento do valor de cada uma destas variáveis contribui para um aumento da potência gerada. Quando o valor da massa de prova aumenta é acompanhado por um aumento da potência gerada, uma vez que a massa de prova é colocada na extremidade livre do piezoelétrico, contribuindo para maiores tensões mecânicas e assim incrementando o efeito piezoelétrico. O aumento da tensão de alimentação da ventoinha, provoca um aumento das vibrações do sistema, em frequência e amplitude. O aumento da frequência do sistema acompanhado por um aumento da aceleração também contribui para o aumento da potência gerada.

Capítulo 5

5 Captação experimental de energia das vibrações com um transdutor eletromagnético

5.1 Resposta do transdutor eletromagnético

Foram implementadas quatro configurações, baseadas no *setup* da figura 5.1 para medição da resposta do transdutor eletromagnético em circuito aberto e no *setup* da figura 5.2 para medição da resposta do transdutor eletromagnético em circuito fechado (resistência de carga ligada à saída do transdutor). A diferenciação das quatro montagens assenta no amplificador de potência utilizado e/ou na estrutura da fonte de vibrações utilizada.

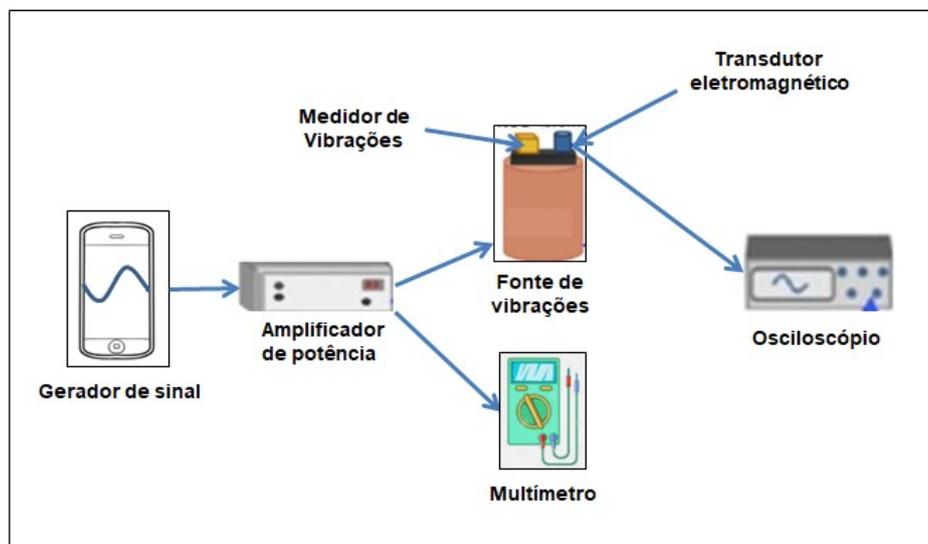


Figura 5.1: *Setup* experimental para análise da resposta do transdutor em circuito aberto.

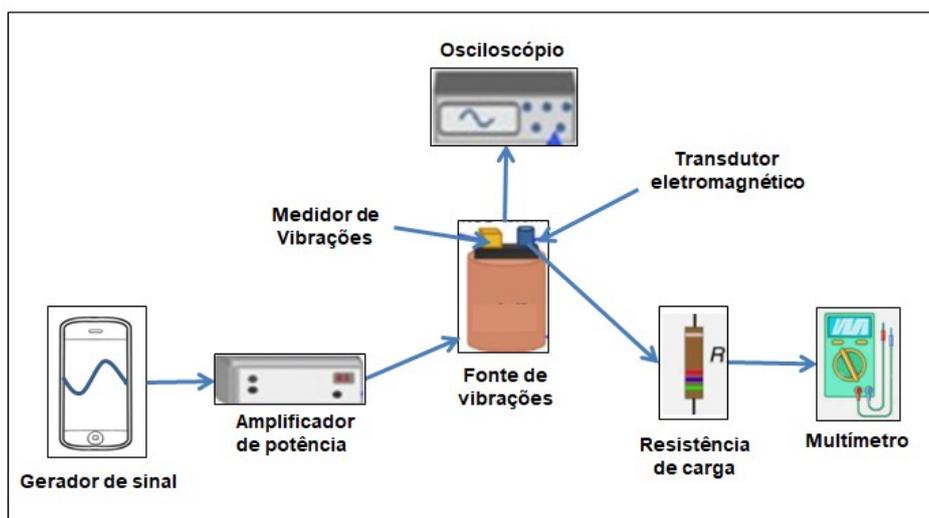


Figura 5.2: *Setup* experimental para análise da resposta do transdutor em circuito fechado.

5.2 Configurações da fonte de vibrações

Por forma a diminuir a influência da presença do medidor de vibrações na estrutura do shaker e a ter diferentes frequências de vibração do sistema, a estrutura da fonte de vibrações evoluiu em 4 configurações.

A configuração nº1 com uma massa móvel de 119 g (copo + transdutor), proporciona uma frequência de ressonância do sistema de aproximadamente 76 Hz.

A configuração nº2 por razões de segurança em relação à integridade do transdutor não pode ser utilizada, conforme veremos mais à frente (ponto 5.4).

A configuração nº3 com uma massa móvel de 228 g (estrutura + transdutor), proporciona uma frequência de ressonância do sistema de aproximadamente 62-63 Hz.

A configuração nº4, que só difere da nº3 na inclusão da peça de fixação, permite um acoplamento indireto, relativamente à vibração da membrana do altifalante e o transdutor, o que possibilita que a frequência de ressonância do sistema não se encontre dentro do intervalo de frequências utilizado para a medição e que seja a frequência de ressonância do transdutor (50 Hz) a que possibilita maior valor de potência à saída.

Como a configuração nº1 apresentação uma frequência de ressonância do sistema para a frequência de 76 Hz, conseguiu-se com a configuração nº3, uma frequência de ressonância de cerca de 62-63 Hz que se situa a cerca de 50% do intervalo [50 Hz – 76 Hz] e por último,

com a configuração nº4 conseguiu-se que o sistema não vibrasse na sua frequência de ressonância, para o intervalo de frequências selecionado [40 Hz – 60 Hz].

Na figura 5.3, podemos ver as quatro configurações da fonte de vibrações.

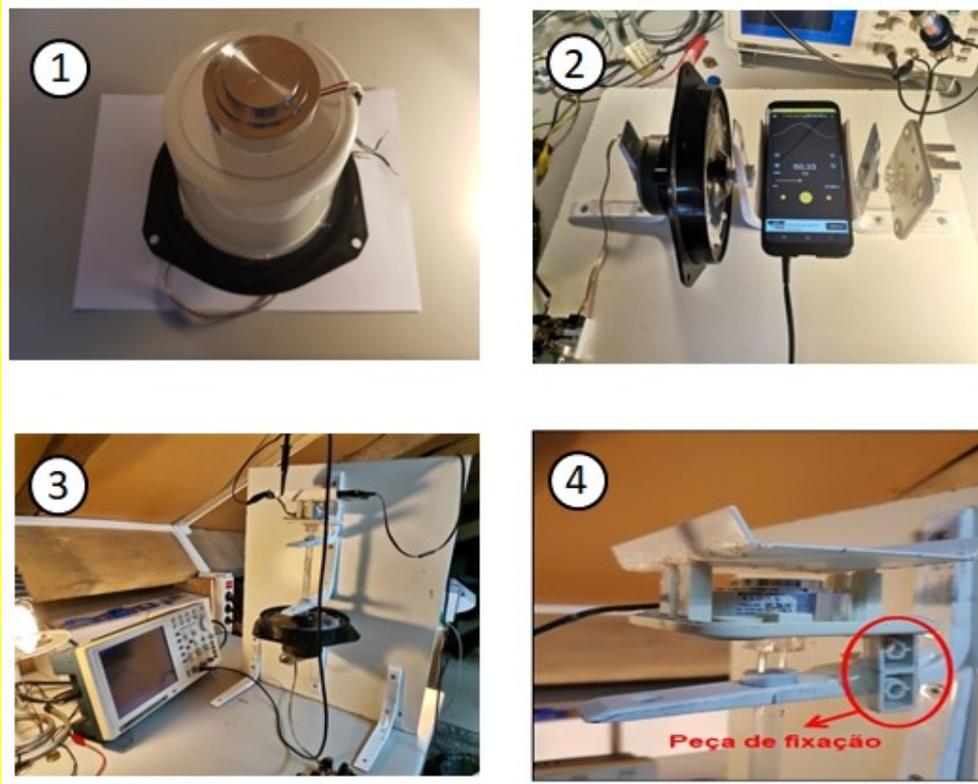


Figura 5.3: As quatro configurações da fonte de vibrações.

5.3 Resposta do transdutor eletromagnético – Configuração nº1

Procedeu-se à análise da resposta do transdutor eletromagnético VEG-50, variando a frequência de vibração, a aceleração e o valor da resistência de carga.

A lista de todos os componentes utilizados está disponível no ANEXO III.

5.3.1 Transdutor eletromagnético utilizado

Fabricante: XIDAS

Modelo: VEG-50

Na figura 5.4 temos uma imagem do transdutor eletromagnético VEG-50, podendo observar a sua escala e na figura 5.5 vemos a orientação do VEG-50 em relação à direção das vibrações.



Figura 5.4: Transdutor eletromagnético XIDAS VEG-50.

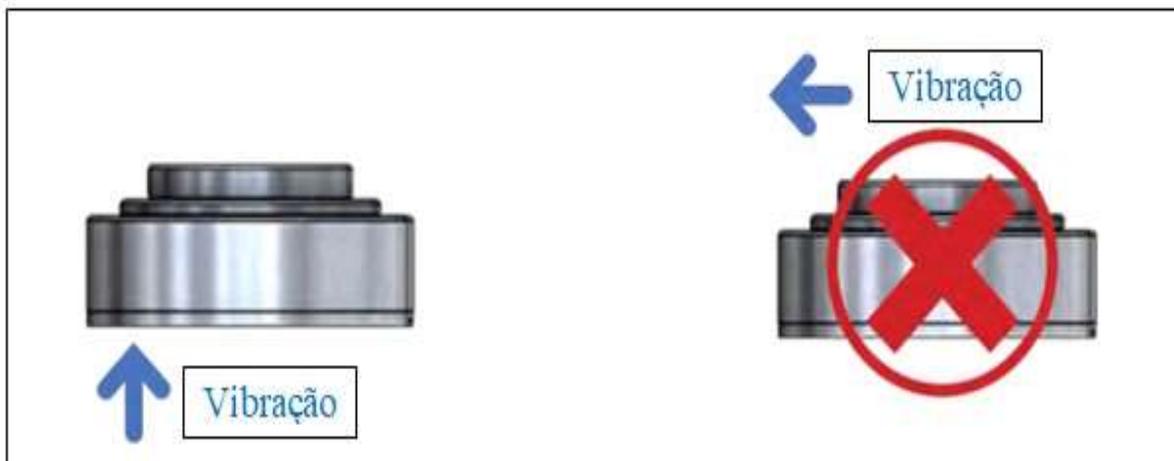


Figura 5.5: Orientação do transdutor eletromagnético VEG-50.

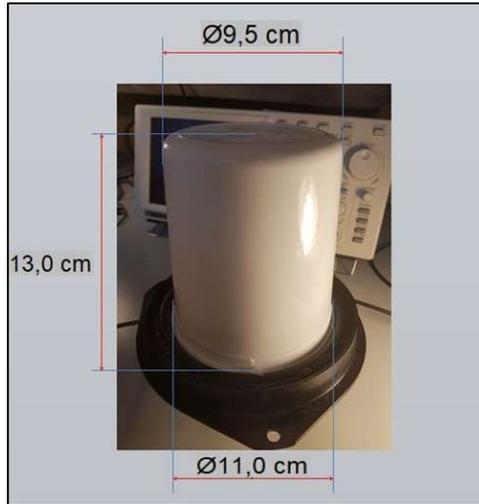
5.3.2 Shaker (fonte de vibrações)

Altifalante FAITAL F13027, 6", 4 Ω , ver figura 5.6a.

Copo plástico de suporte, L1=9,5 cm, L2=11 cm, h=13 cm, ver figura 5.6b.



(a)



(b)

Figura 5.6: (a) Altifalante, (b) Dimensões do copo.

5.3.3 *Shaker* c/ integração do transdutor eletromagnético

Na figura 5.7 temos o *shaker* (altifalante + copo), com a integração do transdutor eletromagnético.

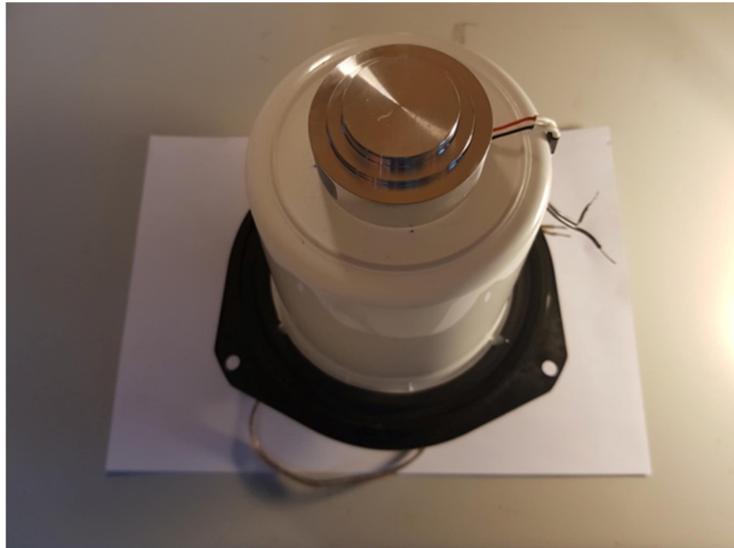


Figura 5.7: *Shaker* e transdutor eletromagnético.

5.3.4 Gerador de sinal

Interface: APP para telemóvel.

Nome: Frequency Generator app.

Empresa: LuxDeLux.

Fonte: Google Play.

A aplicação Frequency Generator permite:

- Escolher um valor para a frequência entre 1Hz – 22.000Hz.
- Selecionar o tipo de onda desejado (Sinusoidal, quadrada, dente de serra ou triangular), para todos os testes efetuados, o tipo de onda utilizado foi o sinusoidal.
- Escolher o ganho, entre 0 e 100%, sendo que o ganho utilizado foi o de 100%, salvo indicação em contrário.
- Executar a aplicação em 2º plano.

5.3.5 Amplificador de potência (LM386) utilizado nas configurações nº1 e nº2

O amplificador de potência com o CI LM386 tem uma potência de saída de cerca de 1 W.

Na figura 5.8 temos o esquema elétrico de implementação do amplificador de potência com o integrado LM386 e na figura 5.9 temos a vista superior da respectiva montagem.

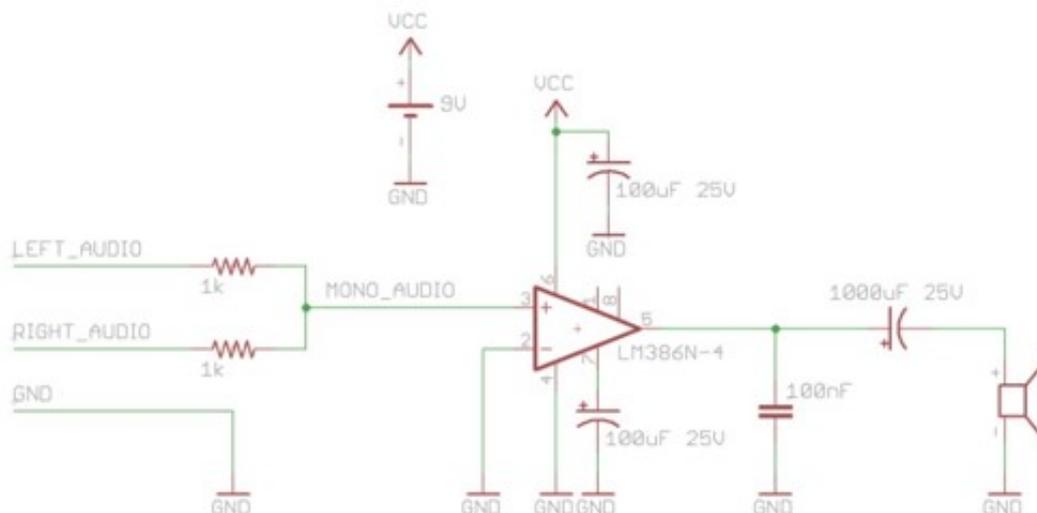


Figura 5.8: Esquema elétrico do amplificador de potência com o integrado LM386.

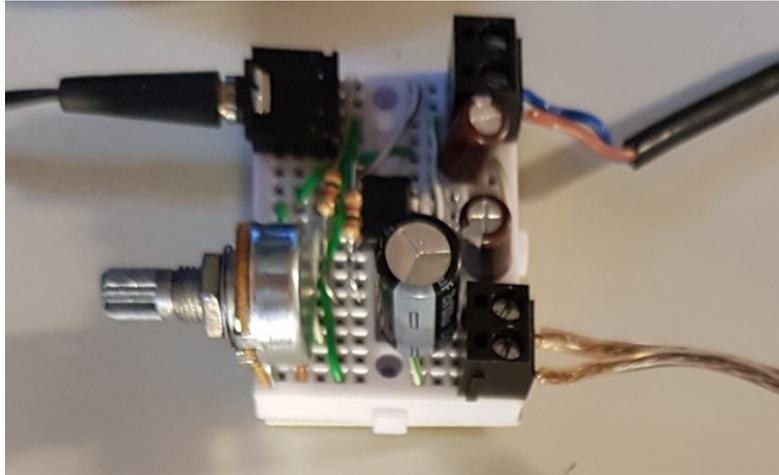


Figura 5.9: Implementação do amplificador de potência com o CI LM386N-4.

5.3.6 Amplificador de potência (TDA2005) utilizado nas configurações nº3 e nº4

O amplificador de potência com o CI TDA2005 tem uma potência de saída de cerca de 10 W. Com a sua utilização conseguimos ter um sinal com maior amplitude na entrada do *shaker*, conseguindo assim maiores acelerações.

Na figura 5.10 temos o esquema elétrico de implementação do amplificador de potência com o integrado LTC2005 (tendo sido utilizada apenas uma das duas saídas disponíveis) e na figura 5.11 temos a vista superior da respetiva montagem.

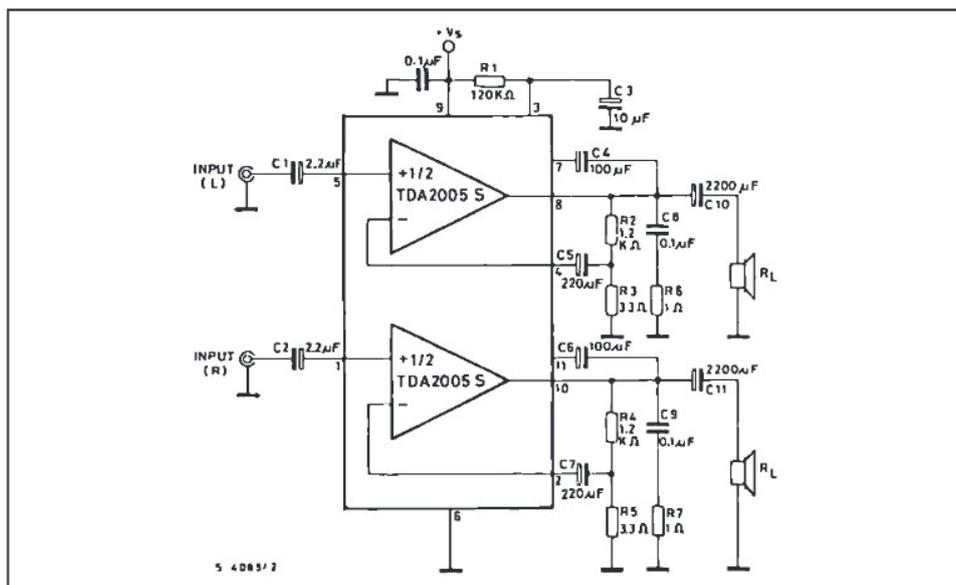


Figura 5.10: Esquema elétrico do amplificador de potência com o CI TDA2005.

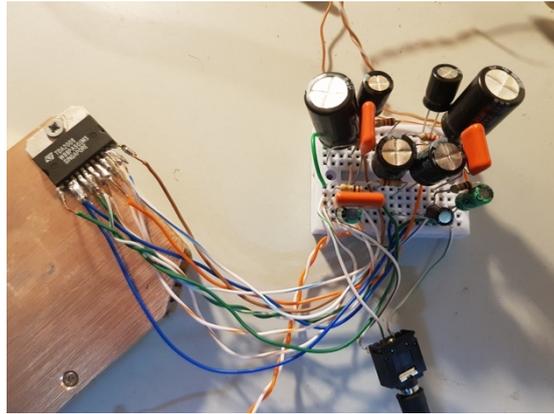


Figura 5.11: Implementação do amplificador de potência com o CI TDA2005.

5.3.7 Resposta do transdutor VEG-50 em circuito aberto - Configuração nº1

Procedeu-se à medição da resposta do transdutor eletromagnético a diferentes valores de frequência de excitação, utilizando o gerador de sinal, amplificador de potência e *shaker*, conforme podemos ver na figura 5.12.

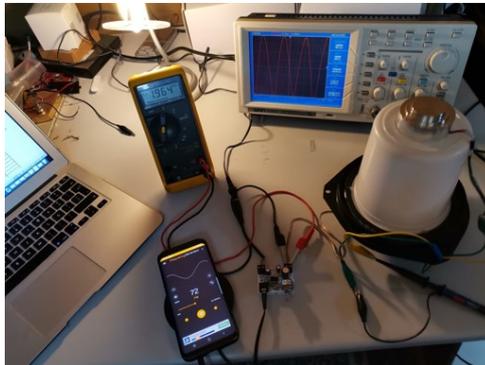


Figura 5.12: Medição do valor de tensão à saída do transdutor.

Na tabela 5.1 poderemos ver os valores de tensão de saída do transdutor eletromagnético VEG-50, para uma gama de valores de frequência de excitação, entre 50 Hz e 110 Hz. Após várias medições verificou-se que o valor máximo de tensão de saída correspondia a uma frequência de excitação de 76 Hz e assim se justifica que tivessem sido medidas as saídas correspondentes a valores de frequência próximas dos 76 Hz. Tem de se ter em conta que os valores obtidos nas várias medições não são puramente sinusoidais.

Tabela 5.1: Valores de resposta do transdutor eletromagnético VEG-50, em circuito aberto, para a configuração nº1.

| Frequência de excitação (Hz) | Tensão à saída do amplificador de potência (V) | Tensão de saída (Pico a pico) (V) | Tensão de saída (RMS) (V) |
|------------------------------|--|-----------------------------------|---------------------------|
| 50 | 1,45 | 4,50 | 1,06 |
| 55 | 1,50 | 4,70 | 1,30 |
| 60 | 1,55 | 6,30 | 1,70 |
| 65 | 1,66 | 8,50 | 2,59 |
| 70 | 1,88 | 14,80 | 4,81 |
| 74 | 1,93 | 16,24 | 5,40 |
| 75 | 1,90 | 17,04 | 5,75 |
| 76 | 1,76 | 17,68 | 5,93 |
| 77 | 1,71 | 16,72 | 5,54 |
| 80 | 1,78 | 13,70 | 4,51 |
| 85 | 1,72 | 10,30 | 3,13 |
| 90 | 1,71 | 8,40 | 2,55 |
| 100 | 1,85 | 5,92 | 2,02 |
| 110 | 1,75 | 5,60 | 1,95 |

Podemos ver os resultados em modo gráfico na figura 5.13.

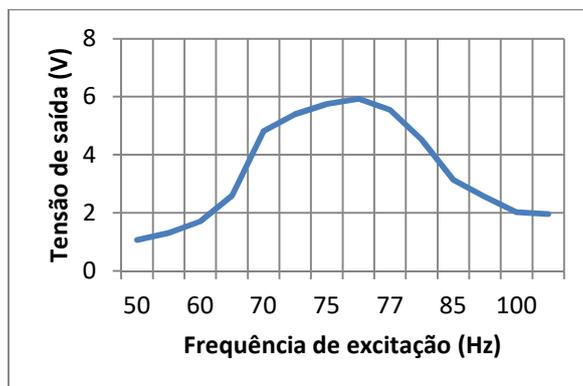


Figura 5.13: Tensão de saída do VEG-50, em função da frequência de excitação.

5.3.8 Resposta do transdutor VEG-50 em circuito fechado - Configuração nº1

Numa 2ª fase, foi utilizada uma resistência de carga variável, que possibilitou a obtenção de valores de corrente e potência. Ao variarmos o valor da resistência de carga, conseguimos encontrar a carga ótima e a potência máxima para cada frequência (tabela 5.2).

Tabela 5.2: Valores da potência de saída do transdutor VEG-50, para a configuração nº1.

| Frequência (Hz) | Valor da resistência de carga (Ω) | Corrente (mA) | Tensão de saída (Pico-Pico) (V) | Tensão de saída (RMS) (V) | Potência (mW) |
|-----------------|--|---------------|---------------------------------|---------------------------|---------------|
| 50 | 260 | 1,25 | 1,46 | 0,39 | 0,48 |
| | 350 | 1,19 | 1,68 | 0,45 | 0,53 |
| | 440 | 1,01 | 2,00 | 0,49 | 0,50 |
| | 470 | 0,94 | 2,24 | 0,57 | 0,54 |
| | 530 | 0,83 | 2,24 | 0,62 | 0,52 |
| 55 | 260 | 1,56 | 1,76 | 0,52 | 0,81 |
| | 350 | 1,48 | 2,08 | 0,62 | 0,92 |
| | 440 | 1,30 | 2,80 | 0,66 | 0,86 |
| | 470 | 1,23 | 2,72 | 0,73 | 0,90 |
| | 530 | 1,05 | 2,88 | 0,80 | 0,84 |
| 60 | 260 | 2,18 | 2,32 | 0,68 | 1,48 |
| | 350 | 2,14 | 2,64 | 0,80 | 1,72 |
| | 440 | 1,80 | 3,10 | 0,94 | 1,69 |
| | 470 | 1,80 | 3,20 | 1,00 | 1,80 |
| | 530 | 1,63 | 3,52 | 1,06 | 1,72 |
| 65 | 260 | 3,57 | 3,20 | 1,04 | 3,73 |
| | 350 | 3,50 | 3,68 | 1,25 | 4,39 |
| | 440 | 3,11 | 4,32 | 1,39 | 4,32 |
| | 470 | 2,93 | 4,56 | 1,57 | 4,60 |
| | 530 | 2,67 | 4,96 | 1,63 | 4,35 |
| 70 | 260 | 5,60 | 4,72 | 1,51 | 8,45 |
| | 350 | 4,95 | 5,60 | 1,77 | 8,76 |
| | 440 | 4,53 | 6,40 | 2,12 | 9,60 |
| | 470 | 4,42 | 6,80 | 2,44 | 10,78 |
| | 530 | 4,10 | 7,52 | 2,60 | 10,66 |
| 76 | 260 | 6,31 | 5,28 | 1,76 | 11,14 |
| | 350 | 5,50 | 6,40 | 2,03 | 11,19 |
| | 440 | 5,61 | 7,44 | 2,59 | 14,52 |
| | 530 | 4,97 | 8,56 | 2,76 | 13,71 |
| | 620 | 4,60 | 8,72 | 2,96 | 13,61 |
| 80 | 260 | 5,09 | 4,32 | 1,39 | 7,07 |
| | 350 | 4,37 | 5,28 | 1,64 | 7,16 |
| | 440 | 4,30 | 6,08 | 1,89 | 8,12 |
| | 470 | 3,90 | 6,72 | 2,10 | 8,19 |
| | 530 | 3,55 | 6,96 | 2,25 | 7,98 |
| 133 | 260 | 4,11 | 3,92 | 1,10 | 4,53 |
| | 350 | 3,60 | 4,72 | 1,31 | 4,71 |
| | 440 | 4,00 | 6,00 | 1,85 | 7,40 |
| | 470 | 3,70 | 6,72 | 2,04 | 7,54 |
| | 530 | 3,07 | 6,00 | 2,04 | 6,26 |

Na figura 5.14 podemos observar o valor da potência em função da frequência de excitação, para o valor ideal de resistência de carga.

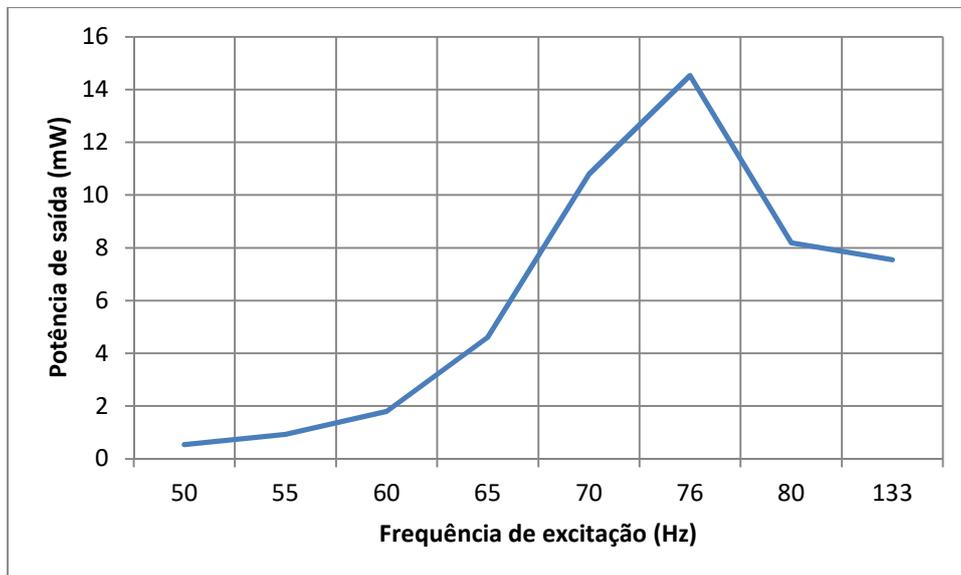


Figura 5.14: Valor da potência máxima gerada em função da frequência de excitação.

5.3.9 Análise da resposta do transdutor VEG-50 – Configuração nº1

Verificou-se que apesar de a frequência de ressonância do transdutor eletromagnético ser 50 Hz, o transdutor apresentou um valor máximo de tensão à saída (14,52 V) para a frequência de excitação de 76 Hz. Este facto está relacionado com a frequência de ressonância do *shaker* que proporciona maior amplitude às vibrações. O facto de a saída do amplificador de potência utilizado, apresentar valores de tensão à saída que são variáveis (entre 1,45 V e 1,9 V), devido à resposta deficitária do amplificador para baixas frequências, também condiciona a análise.

5.4 Resposta do transdutor eletromagnético - Configuração nº2

Procedeu-se à montagem da configuração nº2, com orientação horizontal por forma a medir a resposta do VEG-50, a frequência do sistema e aceleração. Esta estrutura horizontal foi escolhida para minimizar a influência da introdução do medidor de vibrações no sistema.

As dimensões para a configuração nº2, nº3 e nº4, estão disponíveis no anexo VIII.

Nas figuras 5.15 e 5.16 podemos observar o pormenor da montagem em plataforma horizontal.

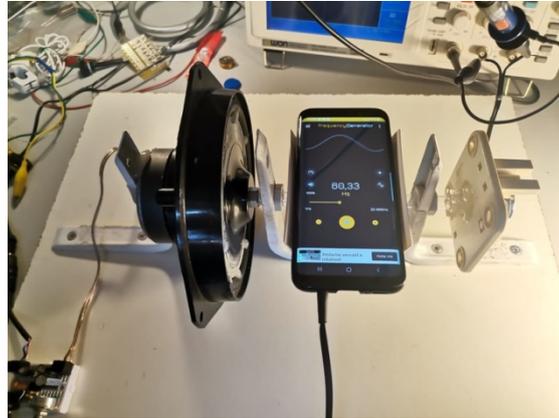


Figura 5.15: Vista superior da montagem em plataforma horizontal para análise da resposta do VEG-50.

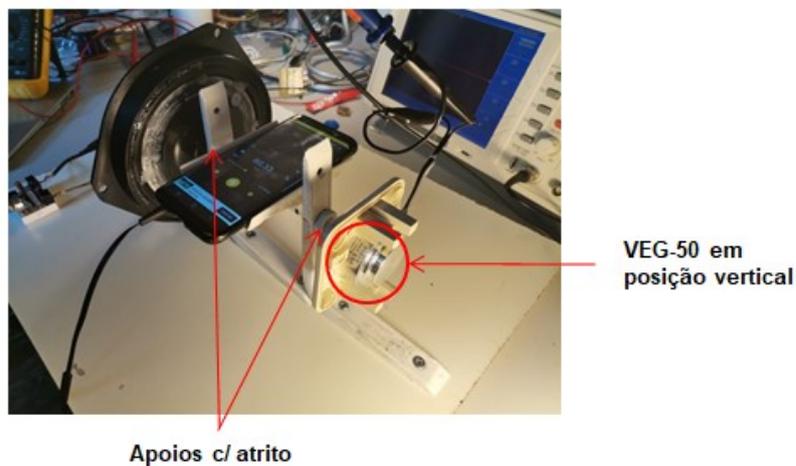


Figura 5.16: Vista lateral da montagem para análise da resposta do VEG-50.

5.4.1 Análise dos Resultados da resposta do transdutor VEG-50 – Configuração nº2

Verificou-se a existência de atritos na estrutura de suporte, e ruídos associados à posição vertical do VEG-50 que poderiam colocar em causa a integridade do transdutor, tendo sido colocada de lado a possibilidade de utilizar esta plataforma.

5.5 Resposta do transdutor eletromagnético - Configuração nº3

Procedeu-se à montagem da plataforma 3, com orientação vertical por forma a medir a resposta do VEG-50 (colocado na posição horizontal e estando perpendicular ao sentido das vibrações), variando a frequência do sistema e a aceleração. Esta estrutura vertical foi escolhida para minimizar os atritos verificados na configuração nº2 e também permitir a utilização do transdutor na sua posição nativa (horizontal).

Nas figuras 5.17 e 5.18 podemos observar o pormenor da montagem em plataforma vertical.



Figura 5.17: Vista superior da montagem em plataforma vertical, para análise da resposta do transdutor VEG-50.



Figura 5.18: Vista frontal da montagem em plataforma vertical, para análise da resposta do transdutor VEG-50.

5.5.1 Resposta do transdutor VEG-50 em circuito aberto - Configuração nº3

Procedeu-se à medição da resposta do transdutor eletromagnético a diferentes valores de frequência de excitação, utilizando o gerador de sinal, amplificador de potência e o *shaker*. Na tabela 5.3 temos os valores obtidos para a tensão no VEG-50, com e sem medidor de vibrações incluído. A inclusão do medidor de vibrações serviu para confirmar a frequência de excitação do sistema e constatar a influência de uma massa de 185 g, sendo que se verificou uma variação de 1 Hz, de 62 Hz para 63 Hz, no valor da frequência que proporciona maior potência à saída do transdutor.

Tabela 5.3: Tabela da relação frequência-tensão, em circuito aberto, do transdutor eletromagnético VEG-50, em circuito aberto, para a configuração nº3.

| Frequência de excitação (Hz) | s/ medidor de vibrações | | | | c/ medidor de vibrações (+185 g) | | | |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| | V saída amplif. (RMS) (V) | Frequência (saída do transdutor) (Hz) | Tensão de saída (Pico a pico) (V) | Tensão de saída (RMS) (V) | V saída amplif. (RMS) (V) | Frequência (saída do transdutor) (Hz) | Tensão de saída (Pico a pico) (V) | Tensão de saída (RMS) (V) |
| 10,0 | 2,4 | 23* | 3,4* | 0,6* | 2,4 | 10 | 2,2 | 0,4 |
| 20,0 | 2,9 | 26* | 4,6* | 0,9* | 2,8 | 31 | 2,4 | 0,4 |
| 30,0 | 3,1 | 35* | 4,8* | 0,9* | 3,1 | 46 | 2,5 | 0,5 |
| 40,0 | 3,2 | 42* | 5,0* | 1,3* | 3,2 | 20 | 2,6 | 0,5 |
| 45,0 | 3,2 | 45* | 5,2* | 1,4* | 3,3 | 45 | 2,8 | 0,6 |
| 49,0 | 3,3 | 49 | 5,2 | 1,8 | 3,3 | 49 | 4,4 | 1,1 |
| 50,0 | 3,3 | 50 | 5,8 | 1,8 | 3,3 | 50 | 6,2 | 1,9 |
| 51,0 | 3,3 | 51 | 5,2 | 1,7 | 3,3 | 51 | 4,8 | 1,5 |
| 55,0 | 3,3 | 55 | 7,2 | 2,2 | 3,3 | 52 | 2,8 | 0,6 |
| 59,0 | 3,3 | 59 | 12,1 | 4,1 | 3,3 | 55 | 2,6 | 0,6 |
| 60,0 | 3,4 | 60 | 14,4 | 4,9 | 3,3 | 56 | 1,8 | 0,4 |
| 61,0 | 3,3 | 61 | 18,2 | 6,0 | 3,3 | 31 | 2,0 | 0,3 |
| 62,0 | 3,3 | 62 | 21,6 | 6,5 | 3,3 | 55 | 2,4 | 0,5 |
| 63,0 | 3,3 | 63 | 19,8 | 6,3 | 3,4 | 63 | 13,6 | 3,4 |
| 65,0 | 3,4 | 65 | 13,6 | 4,5 | 3,3 | 32 | 2,0 | 0,3 |
| 70,0 | 3,5 | 70 | 6,4 | 2,0 | 3,4 | 68 | 2,2 | 0,4 |
| 75,0 | 3,6 | 71* | 5,8* | 1,9* | 3,4 | 75 | 3,2 | 0,7 |
| 80,0 | 3,5 | 81* | 5,6* | 1,6* | 3,5 | 80 | 4,2 | 1,2 |

*Valores médios (considerou-se o valor central do intervalo de valores medidos)

5.5.2 Resposta do transdutor VEG-50 em circuito fechado - Configuração nº3

Foi utilizada uma resistência de carga variável, para a obtenção de valores de corrente e potência, conseguimos encontrar a carga ótima e a potência máxima para cada frequência (tabela 5.4)

Tabela 5.4: Valores da potência de saída do transdutor VEG-50, em circuito fechado, para a configuração nº3.

| Frequência de excitação (Hz) | R=220 Ω | | | R=440 Ω | | | R=880 Ω | | | R=1.760 Ω | | |
|------------------------------|------------------------|-------------------------|---------------|------------------------|-------------------------|---------------|------------------------|-------------------------|---------------|------------------------|-------------------------|---------------|
| | V _{carga} (V) | I _{carga} (mA) | Potência (mW) | V _{carga} (V) | I _{carga} (mA) | Potência (mW) | V _{carga} (V) | I _{carga} (mA) | Potência (mW) | V _{carga} (V) | I _{carga} (mA) | Potência (mW) |
| 10 | 0,20 | 0,91 | 0,18 | 0,2 | 0,45 | 0,09 | 0,3 | 0,34 | 0,10 | 0,4 | 0,02 | 0,09 |
| 20 | 0,35 | 1,59 | 0,56 | 0,6 | 1,36 | 0,82 | 0,8 | 0,91 | 0,73 | 0,9 | 0,05 | 0,46 |
| 30 | 0,28 | 1,27 | 0,36 | 0,4 | 0,91 | 0,36 | 0,5 | 0,57 | 0,28 | 0,7 | 0,04 | 0,28 |
| 40 | 0,40 | 1,82 | 0,73 | 0,6 | 1,36 | 0,82 | 0,8 | 0,91 | 0,73 | 1,0 | 0,06 | 0,57 |
| 45 | 0,45 | 2,05 | 0,92 | 0,7 | 1,59 | 1,11 | 0,9 | 1,02 | 0,92 | 1,1 | 0,06 | 0,69 |
| 49 | 0,49 | 2,23 | 1,09 | 0,6 | 1,36 | 0,82 | 1,1 | 1,25 | 1,38 | 1,0 | 0,06 | 0,57 |
| 50 | 0,52 | 2,36 | 1,23 | 0,7 | 1,59 | 1,11 | 1,2 | 1,36 | 1,64 | 1,0 | 0,06 | 0,57 |
| 51 | 0,52 | 2,36 | 1,23 | 0,7 | 1,59 | 1,11 | 1,1 | 1,25 | 1,38 | 1,2 | 0,07 | 0,82 |
| 55 | 0,66 | 3,00 | 1,98 | 1,0 | 2,27 | 2,27 | 1,3 | 1,48 | 1,92 | 1,6 | 0,09 | 1,45 |
| 59 | 1,00 | 4,55 | 4,55 | 1,5 | 3,41 | 5,11 | 2,0 | 2,27 | 4,55 | 2,8 | 0,16 | 4,45 |
| 60 | 1,13 | 5,14 | 5,80 | 1,8 | 4,09 | 7,36 | 2,4 | 2,73 | 6,55 | 3,1 | 0,18 | 5,46 |
| 61 | 1,20 | 5,45 | 6,55 | 2,0 | 4,55 | 9,09 | 2,7 | 3,07 | 8,28 | 3,7 | 0,21 | 7,78 |
| 62 | 1,40 | 6,36 | 8,91 | 2,1 | 4,77 | 10,02 | 2,9 | 3,30 | 9,56 | 3,9 | 0,22 | 8,64 |
| 63 | 1,35 | 6,14 | 8,28 | 2,0 | 4,55 | 9,09 | 2,7 | 3,07 | 8,28 | 3,7 | 0,21 | 7,78 |
| 65 | 1,10 | 5,00 | 5,50 | 1,7 | 3,86 | 6,57 | 2,6 | 2,95 | 7,68 | 2,9 | 0,16 | 4,78 |
| 70 | 0,63 | 2,86 | 1,80 | 0,9 | 2,05 | 1,84 | 1,3 | 1,48 | 1,92 | 1,6 | 0,09 | 1,45 |
| 75 | 0,53 | 2,41 | 1,28 | 0,8 | 1,82 | 1,45 | 1,0 | 1,14 | 1,14 | 1,4 | 0,08 | 1,11 |
| 80 | 0,48 | 2,18 | 1,05 | 0,7 | 1,59 | 1,11 | 1,0 | 1,14 | 1,14 | 1,2 | 0,07 | 0,82 |

5.5.3 Análise da resposta do transdutor VEG-50 em circuito fechado – Configuração nº3

Com esta montagem o transdutor VEG-50 apresenta uma potência de saída com valores apreciáveis para aplicações de sensores wireless, nomeadamente numa gama de frequências de excitação que vai dos 40 Hz aos 80 Hz (de 0,57 mW a 10,02 mW). A

frequência que origina maior potência de saída é a de 62 Hz, este facto está relacionado com a frequência de ressonância do *shaker* que proporciona maior amplitude às vibrações.

5.6 Resposta do transdutor eletromagnético - Configuração nº4

Procedeu-se à montagem da configuração nº4, que só difere da configuração nº3, na imobilização do braço móvel que se encontra fixo à superfície do altifalante. Na figura 5.18 podemos ver a peça de fixação, responsável pela imobilização do braço (Anexo VI).

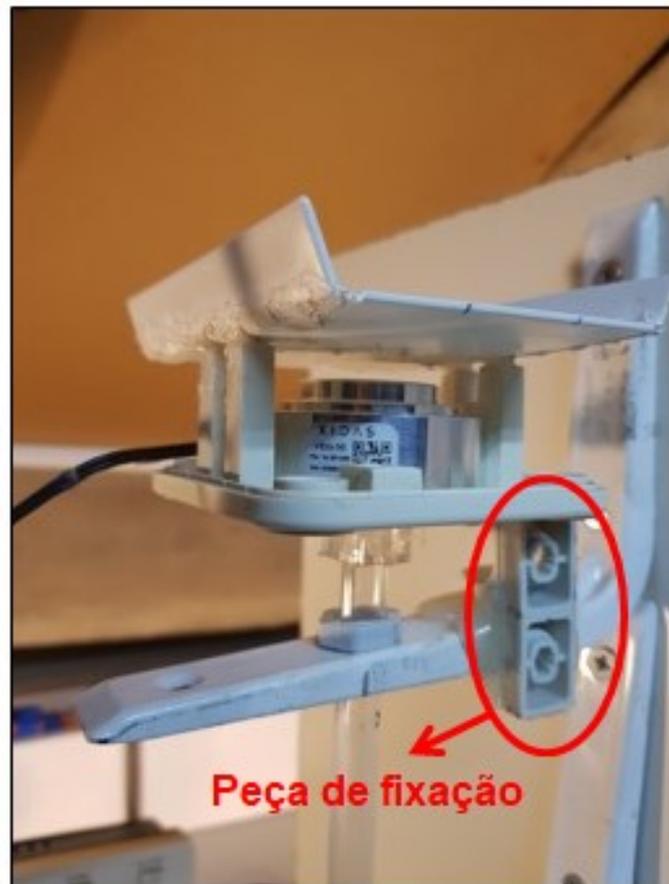


Figura 5.19: Peça para fixação do braço (tubo) que se encontra ligado ao altifalante.

5.6.1 Resposta do transdutor VEG-50 em circuito aberto - Configuração nº4

Procedemos às medições para a configuração nº4, em circuito aberto, dos valores de resposta do transdutor VEG-50, ver tabela 5.5.

Tabela 5.5: Valores de resposta do transdutor eletromagnético VEG-50, em circuito aberto, para a configuração nº4.

| Frequência de excitação (Hz) | V saída amplif. (RMS) (V) | Frequência (saída do transdutor) (Hz) | Tensão de saída (Pico a pico) (V) | Tensão de saída (RMS) (V) |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 40 | 2,8 | 40 | 3,0 | 0,6 |
| 45 | 2,9 | 45 | 4,8 | 1,2 |
| 49 | 3,0 | 49 | 13,1 | 4,3 |
| 50 | 3,0 | 50 | 13,4 | 4,4 |
| 51 | 3,1 | 51 | 8,9 | 2,6 |
| 55 | 3,1 | 55 | 4,4 | 1,2 |
| 60 | 3,1 | 60 | 3,8 | 1,0 |

5.6.2 Resposta do transdutor VEG-50 em circuito fechado - Configuração nº4

Utilizando uma resistência de carga variável, para a obtenção de valores de corrente e potência, conseguimos encontrar a carga ótima e a potência máxima para cada frequência (tabela5.6).

Tabela 5.6: Potência à saída do transdutor eletromagnético VEG-50, em circuito fechado, para a configuração nº4.

| Frequência de excitação (Hz) | Rcarga 220 Ω | | | Rcarga 440 Ω | | | Rcarga 880 Ω | | | Rcarga 1.760 Ω | | | Rcarga 3.520 Ω | | |
|------------------------------|---------------------|-------------|---------------|---------------------|-------------|---------------|---------------------|-------------|---------------|-----------------------|-------------|---------------|-----------------------|-------------|---------------|
| | Vcarga (V) | Icarga (mA) | Potência (mW) | Vcarga (V) | Icarga (mA) | Potência (mW) | Vcarga (V) | Icarga (mA) | Potência (mW) | Vcarga (V) | Icarga (mA) | Potência (mW) | Vcarga (V) | Icarga (mA) | Potência (mW) |
| 40 | 0,20 | 0,80 | 0,18 | 0,3 | 0,7 | 0,20 | 0,4 | 0,5 | 0,18 | 0,4 | 0,2 | 0,09 | 0,2 | 0,1 | 0,01 |
| 45 | 0,28 | 1,43 | 0,36 | 0,4 | 1,1 | 0,36 | 0,6 | 0,8 | 0,41 | 0,8 | 0,4 | 0,36 | 0,6 | 0,2 | 0,10 |
| 49 | 0,90 | 3,80 | 3,68 | 1,4 | 3,2 | 4,45 | 2,1 | 2,5 | 5,01 | 3,0 | 1,7 | 5,11 | 3,4 | 0,9 | 3,28 |
| 50 | 1,00 | 4,43 | 4,55 | 1,5 | 3,5 | 5,11 | 2,4 | 2,6 | 6,55 | 3,1 | 1,8 | 5,46 | 3,6 | 1,0 | 3,68 |
| 51 | 0,60 | 3,10 | 1,64 | 1,1 | 2,5 | 2,75 | 1,2 | 1,9 | 1,64 | 1,9 | 1,2 | 2,05 | 1,9 | 0,6 | 1,03 |
| 55 | 0,30 | 1,75 | 0,41 | 0,5 | 1,4 | 0,57 | 0,8 | 0,9 | 0,73 | 0,9 | 0,5 | 0,46 | 1,0 | 0,3 | 0,28 |
| 60 | 0,20 | 1,30 | 0,18 | 0,4 | 1,0 | 0,36 | 0,6 | 0,7 | 0,41 | 0,7 | 0,4 | 0,28 | 0,8 | 0,2 | 0,18 |

5.6.3 Análise da resposta do transdutor VEG-50 em circuito fechado – Configuração nº4

Na configuração nº4, obteve-se os maiores valores de potência para a frequência de 50 Hz, que corresponde à frequência de ressonância do transdutor eletromagnético VEG-50.

Com esta montagem o transdutor VEG-50 apresenta uma potência de saída com valores apreciáveis para aplicações de sensores wireless, para valores de carga entre 220 Ω e 3.520 Ω , nomeadamente numa gama de frequências de excitação que vai dos 49 Hz aos 51 Hz, com valores de potência entre 1,03 mW e 6,55 mW).

Capítulo 6

6 Gestão experimental da energia captada pelos transdutores

6.1 Introdução

A energia captada pelos transdutores, piezoelétricos e eletromagnéticos, precisa de ser convertida, armazenada e gerida. Para que tal seja possível recorre-se a circuitos com gestão de energia, que possibilitam a utilização da energia captada, para alimentação de dispositivos *wireless*.

Neste capítulo é feita a abordagem a duas plataformas de gestão de energia que foram implementadas. No caso do transdutor piezoelétrico, V22B, a plataforma CBC EVAL-09 da empresa Cymbet e no caso do transdutor, VEG-50, a plataforma LTC3588-1 da empresa Linear Technology.

6.2 A plataforma CBC EVAL-09

6.2.1 Introdução

A plataforma CBC EVAL-09 possibilita a captação de energia, combinando qualquer um dos vários transdutores de captação de energia, com o Processador de Energia EnerChip CBC915-ACA e o módulo de baterias de estado sólido EnerChip CBC51100 de 100 μAh , que tem duas baterias de estado sólido ligadas em paralelo, a Enerchip CBC050 e a Enerchip CBC3150. Na figura 6.1 podemos ver a EVAL-09. O objetivo desta plataforma é permitir o desenvolvimento de aplicações para a captação de energia [42].

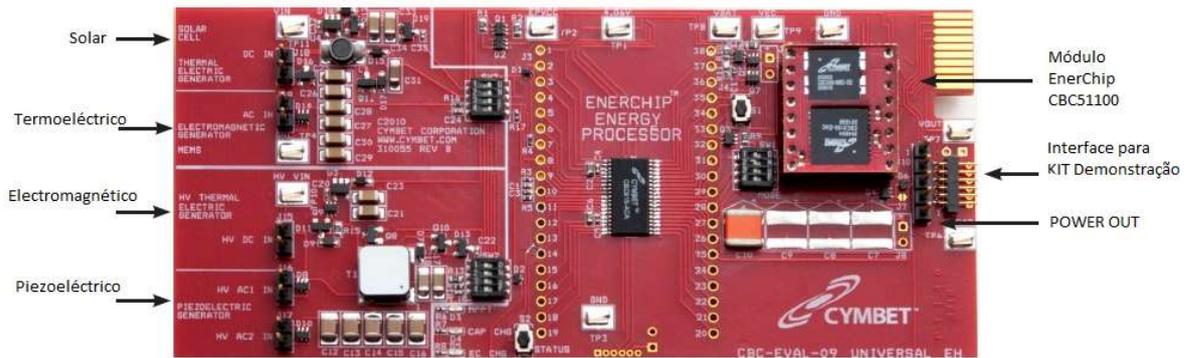


Figura 6.1: Plataforma CBC EVAL-09 [46].

6.2.2 Descrição

Existem muitos avanços tecnológicos na Plataforma EVAL-09, desde a capacidade de poder utilizar qualquer tipo de transdutor de captação de energia, passando pela utilização de um processador de energia que utiliza algoritmos altamente eficientes de busca do máximo valor de energia, até às baterias de estado sólido para o armazenamento de energia quando o transdutor de captação de energia está inativo. Na figura 6.2 temos o diagrama de blocos da plataforma CBC-EVAL09.

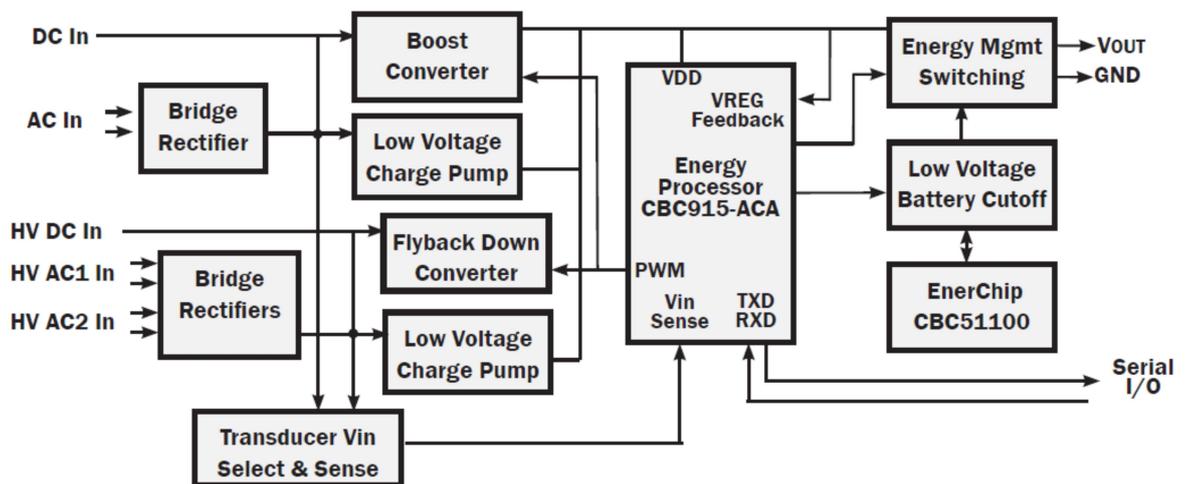


Figura 6.2: Diagrama de Blocos da plataforma CBC-EVAL09.

Descrição dos blocos:

DC IN – Entrada para um transdutor abaixo de 4.06 V DC, normalmente uma célula fotovoltaica.

AC IN – Entrada para um transdutor abaixo de 4.06 V AC, poderá ser um transdutor eletromagnético.

HV DC IN – Entrada para um transdutor de 4.06 V DC a 20 V DC, que pode ser um gerador termoelétrico de alta voltagem.

HV AC1 IN and HV AC2 IN - Entrada para um transdutor de 4.06 V AC a 20 V AC, que pode ser um piezoelétrico e se dois piezoelétricos estiverem mecanicamente juntos no mesmo transdutor, as suas saídas podem ser conectadas a HV AC1 e a HV AC2.

Bridge Rectifiers – Retifica de AC para DC, para as entradas AC In ou HV AC In.

Boost Converter – Sobe a tensão da entrada DC In ou da entrada AC In para 4.06 V.

Low Voltage Charge Pumps – Utilizados para o arranque do processador de energia CBC915.

Flyback Down Converter – Baixa a tensão da entrada HV DC In ou da entrada HV AC1 In/HV AC2 In para 4.06 V.

Energy Processor – Enerchip EP CBC915 encontra o máximo pico de energia proveniente da entrada do transdutor para captação de energia.

Transdutor Input Voltage Select e Sense Switch's – Monitorizam todas as voltagens de entrada e faz a conexão com o processador de energia.

Enerchip CBC51100 – Módulo de Baterias do estado Sólido – Duas Baterias do estado sólido EnerChip 50 μ Ah (CBC3150 e CBC050) para armazenamento de energia.

Low Voltage Cut-off – Desliga as Baterias quando a sua voltagem desce abaixo dos 3.0 V DC.

Energy Managment Switching Matrix – Controla a entrada a ser ligada à saída. Utilizando mini interruptores podemos selecionar o transdutor de entrada que fornecerá a voltagem de saída.

Serial I/O – Estas 2 linhas de comunicação permitem a ligação do processador de energia a outro microcontrolador como o TI MSP430 MCU incluído no KIT de demonstração *wireless* eZ430-RF2500, que poderá ser ligado ao conector J9.

6.2.3 Configurações dos interruptores para o transdutor de entrada

Existem 3 interruptores deslizantes sobre o EVAL-09 para utilização na seleção do transdutor. Só pode haver um transdutor EH anexado ao EVAL-09 a qualquer momento. Combinar as entradas do transdutor não é suportado. Na tabela 6.1 podemos ver as configurações dos interruptores para utilização do transdutor piezoelétrico.

Tabela 6.1: Configuração dos interruptores para seleção do transdutor piezoelétrico.

| SW3 | | | SW2 | | | SW1 | | |
|---------|-----|----|---------|-----|----|---------|-----|----|
| Slide # | OFF | ON | Slide # | OFF | ON | Slide # | OFF | ON |
| 1 | X | | 1 | | X | 1 | X | |
| 2 | X | | 2 | | X | 2 | X | |
| 3 | X | | 3 | | X | 3 | X | |
| 4 | X | | 4 | | X | 4 | | X |

6.2.4 Leds indicadores de estado

Led MPPT - Rastreamento de potência de pico máximo - indica que o processador de energia está a ajustar a impedância de entrada para corresponder à impedância do transdutor.

Led de carga de retenção de saída - indica que o condensador usado para reter a carga de saída da carga alvo está sendo carregado. O *Led* acenderá momentaneamente toda vez que o processador de energia entrar neste estado ou quando o botão for pressionado.

O led *EnerChip Charge* - Indica que os dispositivos *EnerChip* estão sendo carregados. O *led* acenderá momentaneamente toda vez que o processador de energia entrar neste estado ou quando o botão for pressionado.

6.2.5 Descrição do processador de energia CBC915

O processador de energia CBC915 desempenha de forma eficiente a conversão de energia proveniente de um transdutor para uma tensão que é utilizável por aplicações típicas, tais como sensores remotos sem fios. O CBC915 executa esta função ajustando dinamicamente a sua impedância de entrada à impedância de saída do transdutor. Neste jogo de impedâncias, consegue-se extrair a máxima quantidade de energia a partir do transdutor.

- Pode usar qualquer tipo de transdutor para captação de energia: Luz, Vibração, térmica, RF;
- Busca de potência máxima com algoritmos para conversão de alta eficiência energética;
- Interface de comunicação para o sistema *MCU*;
- Indicadores de estado de energia da entrada e de níveis de energia e de armazenamento;
- Controle de carga para as *EnerChip Film CBC050*;
- Proteção interna de armazenamento de energia;
- Tensão de comutação ajustável;
- Baixo consumo em *Stand by*;

- Faixa de temperatura de operação de -20 °C a +70 °C ou - 40 °C a 85 °C;
- Em conformidade com RoHS.

6.2.6 Armazenamento de energia: EnerChip CBC050 e EnerChip CBC3150

Luz ambiente, gradientes térmicos, a radiação vibração/movimento, ou eletromagnética podem ser captadas para a alimentação de dispositivos eletrônicos. Ao mesmo tempo, todos os sistemas de captação de energia precisam de ter armazenamento de energia para momentos em que a energia não pode ser captada (por exemplo, à noite, para sistemas de energia solar). As baterias recarregáveis são utilizadas para armazenamento da energia. Na figura 6.3 vemos as células Cymbet de filme fino de 50 μ Ah - 4.2 V.



Figura 6.3: Células Cymbet de filme fino de 50 μ Ah - 4.2 V.

É possível acoplar a bateria com um condensador, quando um pulso de corrente elevada for necessário, por exemplo para alimentar um transmissor de rádio em um sensor sem fio.

Dependendo da energia produzida, as demandas de carga, e várias outras considerações de projeto do sistema, há muitas opções para uma solução de bateria de armazenamento. Taxas de descarga de alta, baixa, autodescarga, alta densidade energética, e outras características de desempenho são muito diferentes entre os químicos celulares secundários disponíveis atualmente. Combinando características da bateria para a entrada de energia e perfis de saída vai melhorar o desempenho do sistema na recolha de energia. Consultar sempre as especificações do fabricante para otimizar o desempenho e aumentar a vida útil da bateria.

6.2.7 Testes à plataforma CBC Eval-09

Neste capítulo iremos encontrar um conjunto de testes feitos à plataforma CBC Eval-09, utilizando o transdutor piezoelétrico V22B, que vão desde a componente de captação de energia, passando pela gestão da energia, seu armazenamento e utilização [48].

Na figura 6.4 podemos ver o esquemático da montagem.

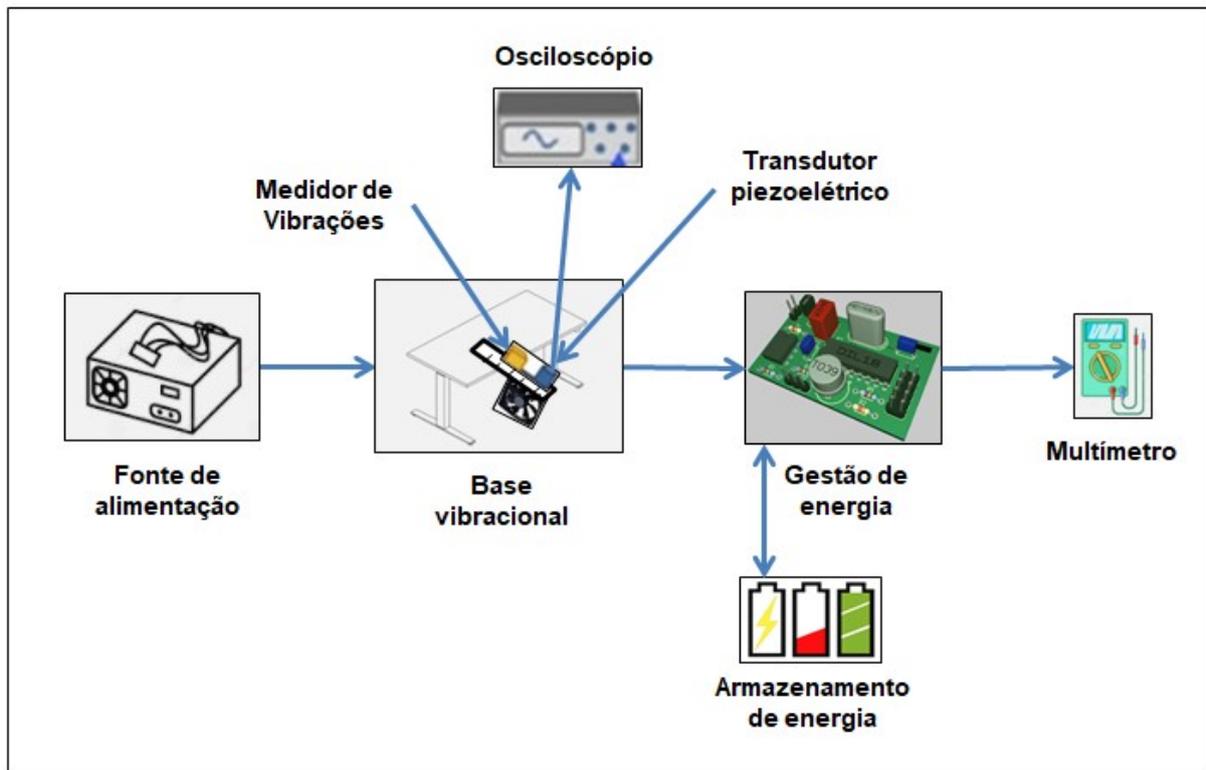


Figura 6.4: Montagem feita para verificar o desempenho da plataforma CBC Eval-09 na gestão de energia captada através do piezoelétrico V22B.

6.2.8 Transdutor piezoelétrico V22B ligado à placa EVAL CBC-09

Nas figuras 6.5 e 6.6, podemos observar a ligação do transdutor piezoelétrico V22B à placa EVAL CBC-09 e a montagem em funcionamento com a fonte de vibrações acoplada ao piezoelétrico.

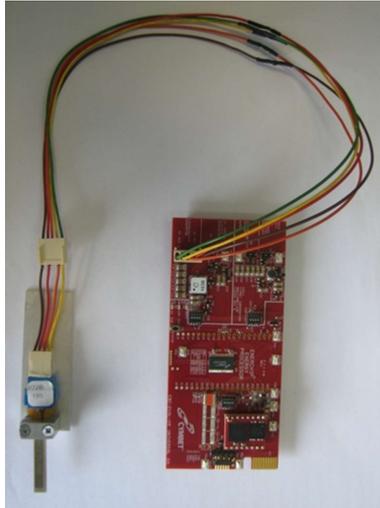


Figura 6.5: Transdutor piezoelétrico V22B ligado à placa EVAL CBC-09.

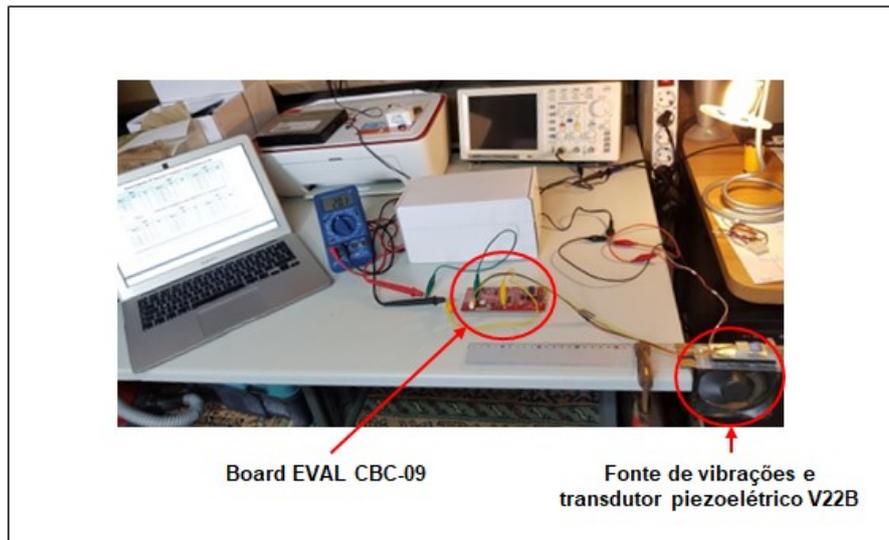


Figura 6.6: Vista geral da montagem com a placa EVAL CBC-09 em funcionamento.

6.2.9 Carregamento das baterias de filme fino da EnerChip

O arranque do processador de energia CBC915 foi proporcionado pela carga acumulada nos condensadores CPOUT, carregados através de um conversor DC-DC. O valor de tensão à entrada do processador de energia, será de 2,5 V durante alguns segundos, e quando existiu energia suficiente proporcionou o arranque do CBC915 e a tensão na linha elevou-se para 3,5 V. Nesta fase o led MPPT piscou, indicando que o processador estava a entrar no estado de sintonização do máximo pico de energia e de seguida carregou as baterias.

6.2.10 Curto-circuito da saída

Quando o condensador de saída ao descarregar fica com menos de 3.0 V, o circuito de desconexão, desconecta as *EnerChips*. Isto previne que as *EnerChips* sofram uma grande descarga. Assim que o condensador seja recarregado, as *EnerChips* serão novamente conectadas.

6.2.11 Resposta a um impulso de corrente maior

O banco de condensadores de saída poderá ser dimensionado para suportar impulsos de corrente maiores.

6.2.12 Tempo de autonomia da CBC EVAL-09 na ausência de captação de vibrações

Depende da carga que seja ligada à saída, sendo que as *Enerchips* fornecem 100 μ Ah.

6.3 A plataforma LTC3588-1

A plataforma implementada, integra o processador de energia LTC3588-1 que permite que a energia captada através de diversas fontes, como a piezoelétrica, eletromagnética, possa ser acondicionada para uma forma otimizada. Dentro do LTC3331, a energia captada é retificada através de uma ponte retificadora com baixas perdas, passando por um elevador de tensão DC/DC, para depois ser armazenada numa célula recarregável, externa. Quando não existe captação de energia o andar elevador de tensão é desligado, reduzindo a corrente necessária no modo *Stand by* (Anexo III).

6.3.1 Descrição

O LTC3588-1 integra uma fonte de alimentação de captação de energia com um *buck-boost* DC/DC, para criar uma fonte de saída única para aplicações de energia alternativa. A fonte

de energia para captação de energia, que consiste numa ponte retificadora de onda completa integrada e um *buck* DC/DC de alta tensão, capta energia de fontes piezoelétricas, solares ou eletromagnéticas. O *buck* opera quando a energia captada está disponível, reduzindo o consumo de corrente quiescente da bateria. O *buck-boost* fornece V_{OUT} apenas quando a energia captada não está disponível.

Na figura 6.7 podemos ver uma aplicação de captação e acondicionamento de energia, com o LTC3588-1.

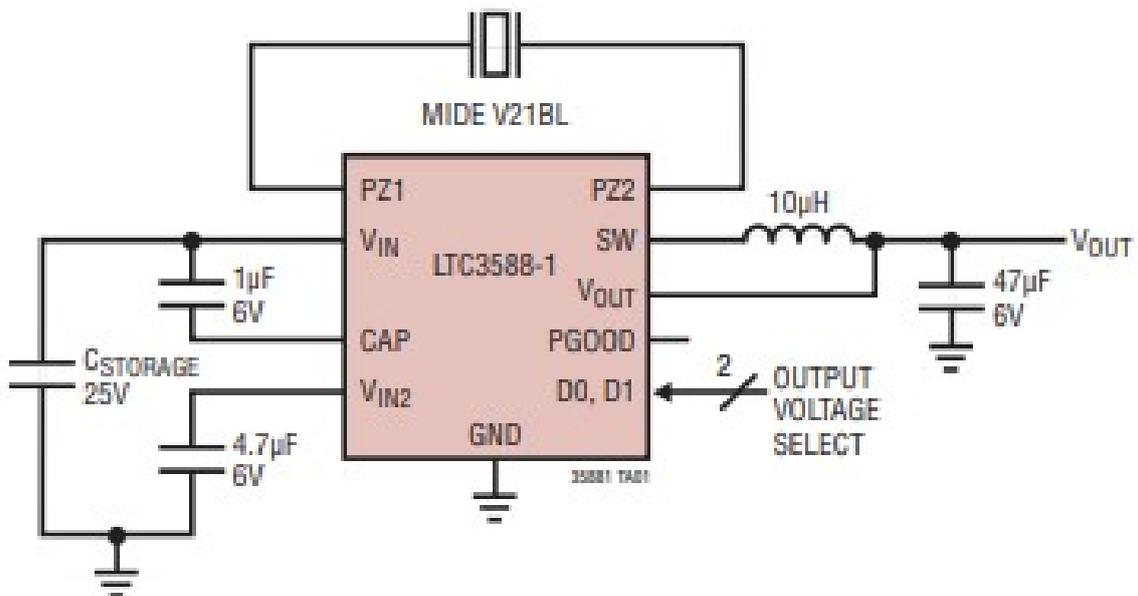


Figura 6.7: Aplicação de captação e acondicionamento de energia, com o LTC3588-1 (Anexo III).

Na figura 6.8 podemos ver a implementação com o processador LTC3588-1.

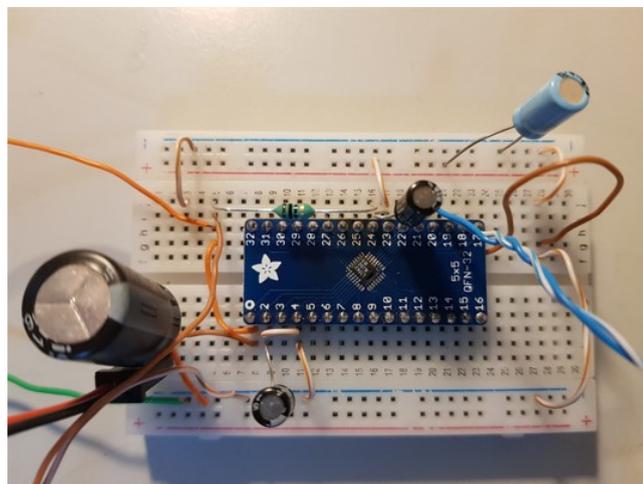


Figura 6.8: Implementação com o processador LTC3588-1.

Supercondensador

Capacidade: 1 F – 5,5 V

Na figura 6.9 podemos ver o supercondensador de 1 F que foi utilizado no armazenamento externo de energia.

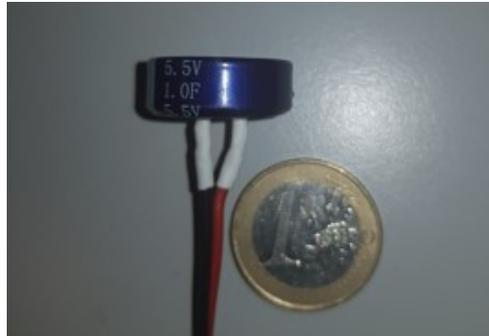


Figura 6.9: Supercondensador (1 F, 5,5 V) utilizado no armazenamento da energia.

6.3.2 *Setup* utilizado para verificar o funcionamento da plataforma LTC3588-1

Na figura 6.10 temos o *setup* utilizado para verificar o funcionamento da plataforma LTC3588-1.

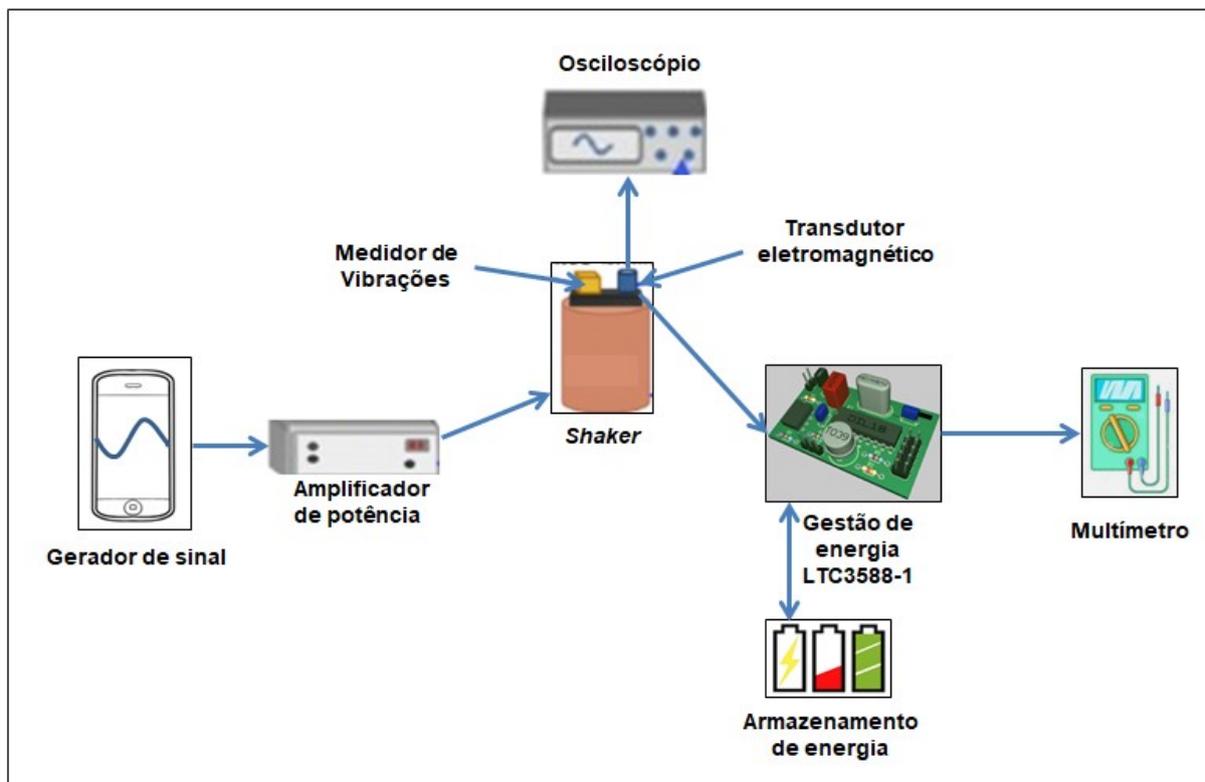


Figura 6.10: *Setup* utilizado para verificar o funcionamento da plataforma LTC3588-1.

Capítulo 7

7 Aplicação experimental com um transdutor eletromagnético

Procedeu-se à montagem experimental de uma plataforma de captação e gestão de energia, para alimentação de um nó sensor *wireless*, BT 510.

7.1 Setup da montagem

Na figura 7.1, podemos ver o *setup* da plataforma de captação de energia com o nó sensor *wireless*.

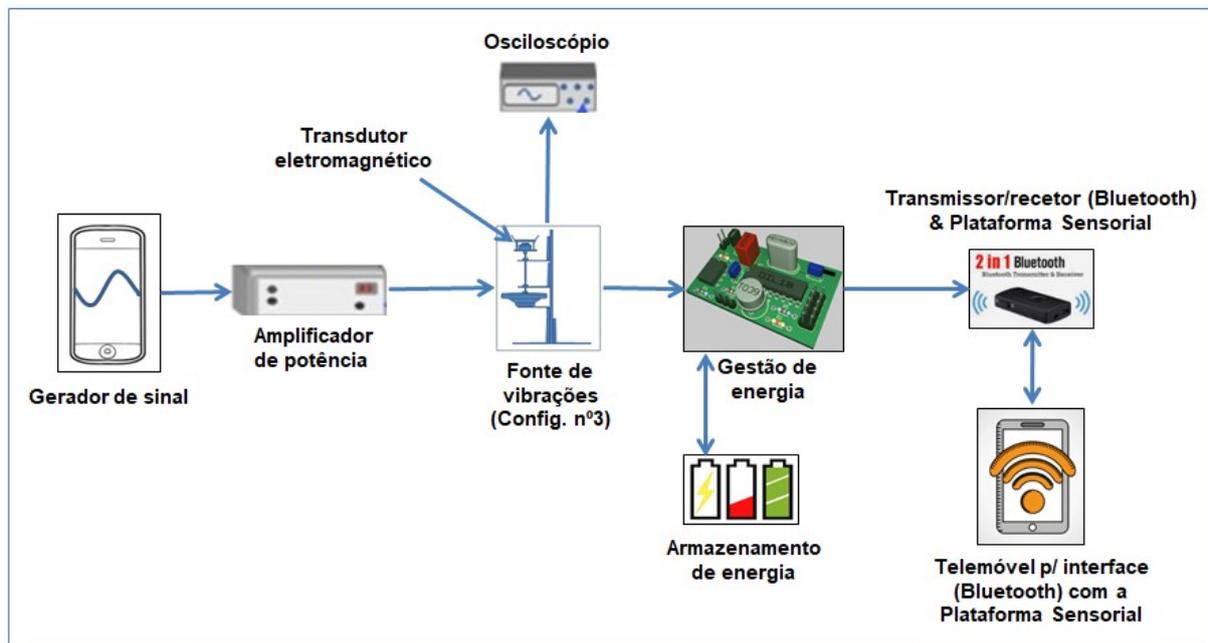


Figura 7.1: Setup para alimentação de um nó sensor wireless com um transdutor eletromagnético.

7.2 Captação e gestão da energia

Foi utilizada a plataforma de gestão de energia LTC3588-1 com o transdutor eletromagnético VEG-50. Para fonte de vibrações foi utilizado o shaker da configuração nº4.

Na figura 7.2 podemos ver a montagem com os componentes instalados. Na figura não são visíveis o gerador de sinal, o medidor de vibrações e a *app* para visualização dos dados sensoriais captados pelo nó sensor, BT 510.

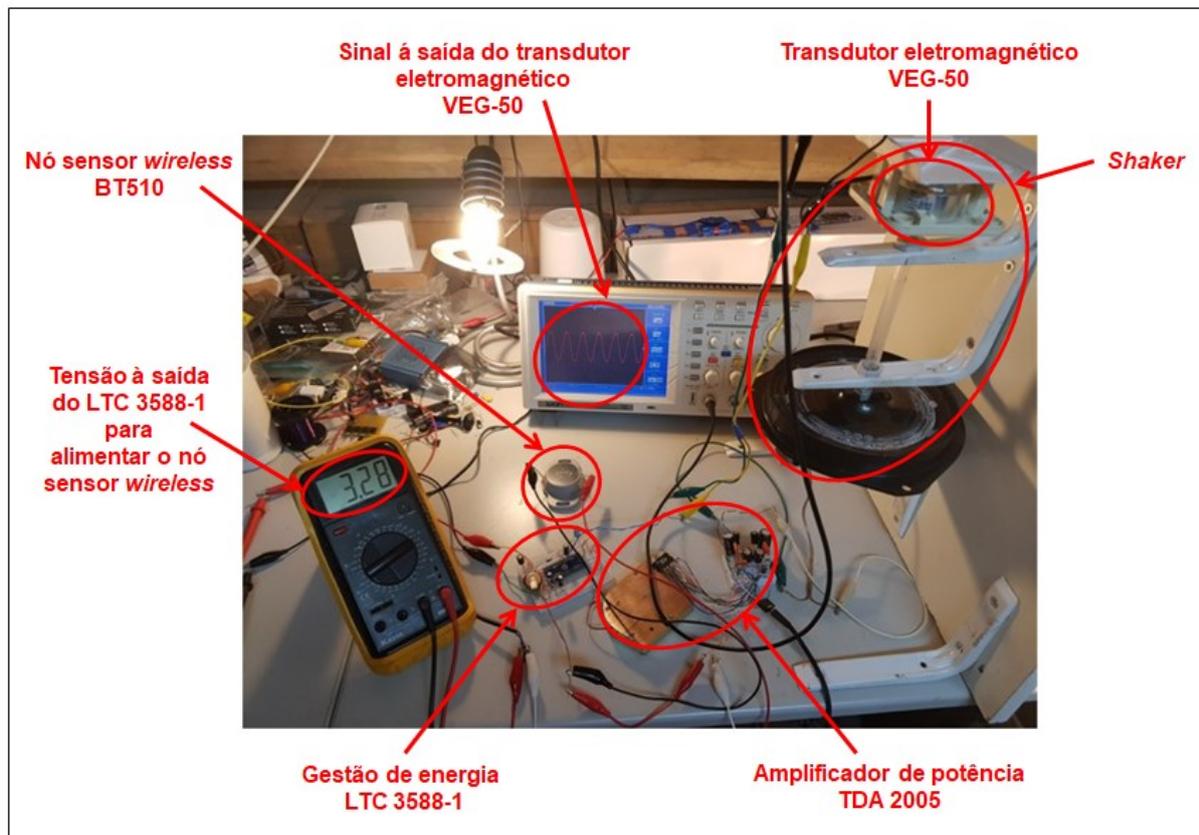


Figura 7.2: Implementação da plataforma de alimentação de um nó sensor *wireless*, através de captação de energia das vibrações com um transdutor eletromagnético.

7.3 Discussão de resultados

Depois de configurado o setup, a plataforma de captação de energia LTC 3588-1 iniciou o processamento da energia captada pelo transdutor eletromagnético, VEG-50, acoplado ao *shaker*. Depois de armazenar uma quantidade inicial de energia que permitia o funcionamento de toda a plataforma, pode iniciar o processo para disponibilizar cerca de 3,3V DC, na sua saída (*Vout*) e assim começando a armazenar energia nos supercondensadores colocados à saída por forma a alimentar o nó sensor *wireless* em períodos de presença e ausência de captação de vibrações. Estes ensaios foram feitos em laboratório, recolhendo a energia das vibrações com origem no *shaker*, num ensaio que possa ser feito num motor elétrico por exe., não se coloca a necessidade de alimentar o gerador de funções ou o amplificador de potência, uma vez que as vibrações já estão disponíveis

Capítulo 8

8 Conclusões e trabalho futuro

A captação de energia das vibrações é importante para a alimentação de sensores sem fios, nomeadamente os de difícil acesso. Tendo em conta a previsão de um aumento exponencial do nº de sensores nas mais diversas áreas, os custos de manutenção de nós sensores com captação de energia serão muito baixos. Com o aumento da potência de saída dos transdutores na captação de energia das vibrações e a diminuição do consumo de energia dos dispositivos a alimentar, é possível usar cada vez mais a captação de energia para aplicações de baixa potência.

Os resultados obtidos mostraram que o transdutor eletromagnético VEG-50, consegue responder a uma gama de frequências de excitação considerável, que vai dos 40 Hz aos 80 Hz, com valores de potência de 0,57 mW a 10 mW, para valores de carga entre 220 Ω e 3.520 Ω , o que permite alimentar dispositivos *wireless*.

Concluiu-se que a aceleração dos sistemas testados condiciona o seu desempenho, contribuindo com o seu aumento para um aumento da potência de saída e também para o aumento da largura de banda da faixa de frequências.

Pelos resultados obtidos concluiu-se que uma diminuição dos valores da aceleração afeta menos os valores de saída, para a frequência de ressonância do transdutor, do que para as outras frequências.

Comprovou-se que a relação entre impedâncias também é um fator importante, verificando-se melhor desempenho quando existe proximidade de valores entre a impedância do transdutor e a impedância da carga, o que possibilita a máxima transferência de potência.

Foi feita com sucesso a implementação de uma aplicação prática para captação de energia das vibrações, demonstrando a capacidade da plataforma LTC3588-1 para alimentar um nó sensor *wireless* (BT510).

Ambos os transdutores, piezoelétrico e eletromagnéticos mostraram eficiência no seu funcionamento, limitados pelas suas características de fabrico.

Concluiu-se que existe grande performance dos transdutores que estejam instalados em equipamentos que possam estar a vibrar com frequências próximas da sua frequência natural (de ressonância).

8.1 Sugestões de trabalho futuro

Uma primeira sugestão será a implementação de sistemas não ressonantes, que permitam uma largura de banda alargada, aumentando a faixa de frequências de captação de energia.

Uma segunda sugestão será a implementação de configurações que combinem diferentes mecanismos de conversão de energia num só dispositivo, por exemplo o princípio eletromagnético com o efeito piezoelétrico, ou com o princípio eletrostático.

Outra sugestão será a captação de energia de múltiplas fontes com uma peça de material multifuncional, seja composto ou um novo material monolítico. Algumas perovskitas de haleto orgânico, filmes finos foto-ferroelétricos e cerâmica provaram ter efeito fotovoltaico considerável e ferroeletricidade forte [15].

Bibliografia

- [1] Moyer B. (2021). Energy Harvesting Shows New Signs Of Life. *SemiconductorEngineering*. Acedido em 24 de setembro de 2021, em: <https://semienengineering.com/energy-harvesting-shows-new-signs-of-life/>
- [2] Kompis, C. and Aliwell, S. (2008). *Energy Harvesting Technologies to enable remote and wireless sensing*. Sensors and Instrumentation KTN Report.
- [3] Markets and Markets (2020). *Energy Harvesting System Market*. Acedido em 4 de maio de 2021, em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/energy-harvesting-market-734.html>
- [4] Grand View Research (2020). *Energy Harvesting System Market Size, Share & Trends Analysis Report By Technology (Thermal, Vibration), By Component (Industrial, Consumer Technology), By Region, And Segment Forecasts, 2020 – 2027*. Acedido em 4 de agosto de 2021, em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/energy-harvesting-systems-market>
- [5] Beeby S. P., Tudor M. J. and White N. M. (2006). Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology*. **17**: 175-195.
- [6] Roundy S., Wright P. K. and Rabaey J. (2002). A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Elsevier, Computer Communications*. 26 (2003): 1131-1144. Acedido a 3 de março de 2021, em: <https://iss.mech.utah.edu/wp-content/uploads/sites/103/2012/10/ComputerCommunications-Roundy-2003.pdf>
- [7] Raju M. (2008). Energy Harvesting Technologies. *MCU Strategic Marketing, Texas Instruments*. Acedido 30 de Agosto de 2021 em: https://cdn.weka-fachmedien.de/whitepaper/files/071_tti_cc430_energy_harvesting_whitepaper.pdf
- [8] Nechibvute, A., Chawanda, A. and Luhanga, P. (2012). Piezoelectric Energy Harvesting Devices: An Alternative Energy Source for Wireless Sensors. *Smart Materials Research*, 2012, Artigo 853481. Acedido em 5 de junho de 2021, em: <https://doi.org/10.1155/2012/853481>

- [9] Vullers R.J.M., Shaijk R., Doms I., Hoof C. and Mertens R. (2009). Micro power energy harvesting. *Solid-state electronics*. **53**: 684-693.
- [10] Vullers, R. (2011). *Piezoelectrics for Energy Harvesting*. IMEC/Holst Centre.
- [11] Boisseau S., Despesse G., Ricart T., Defay E. and Sylvestre A. (2011). Cantilever-based electret energy harvesters. *IOPScience, Smart Materials and Structures* **20**, Artigo 105013. Acedido a 15 de maio de 2021 em: <http://iopscience.iop.org/0964-1726/20/10/105013>
- [12] Spreemann D., Folkmer B., Mintenbeck D. and Manoli Y. (2005). Novel non-resonant vibration transducer for energy harvesting. The Fifth International Workshop on Micro and nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (*PowerMEMS 2005*). Acedido a 10 de maio de 2021, em: https://www.researchgate.net/profile/Bernd-Folkmer/publication/228517913_Novel_non-resonant_vibration_transducer_for_energy_harvesting/links/00b4952cec657ecb77000000/Novel-non-resonant-vibration-transducer-for-energy-harvesting.pdf
- [13] Khan F. U. and Ahmad I. (2015). Review of Energy Harvesters Utilizing Bridge Vibrations. *Hindawi*. **2016**, Artigo 1340402. Acedido a 3 de março de 2021, em: <https://doi.org/10.1155/2016/1340402>
- [14] Bonifácio J. A. (2018). *Transdutores Eletromagnéticos na recolha de Energia Cinética das Vibrações*. Tese de Mestrado. Universidade da Beira Interior (UBI), Covilhã. 89 pp.
- [15] Bai Y., Jantunen H. and Juuti J. (2006). Hybrid, Multi-Source, and Integrated Energy Harvesters. *Frontiers in Materials: Rising Stars*. Acedido a 25 de maio de 2021, em: <https://doi.org/10.3389/fmats.2018.00065>
- [16] Jiang J., Liu S., Feng L. and Zhao D. (2021). A review of Piezoelectric Vibration Energy Harvesting with Magnetic Coupling Based on Different Structural Characteristics. *Micromachines* **12(4)**: 436. Acedido a 17 de julho de 2021, em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/12/4/436/html#B205-micromachines-12-00436>

- [17] Xu Z., Shan X., Yang H., Wang W. and Xie T. (2017) Parametric analysis and experimental verification of a hybrid vibration energy harvester combining piezoelectric and electromagnetic mechanisms. *Micromachines* **8**: 2377-2384. Acedido a 18 de maio de 2021, em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/8/6/189>
- [18] Dagdeviren C., Li Z. and Wang Z. L. (2017). Energy Harvesting from the Animal/Human body for Self-Powered Electronics. *Annual Review of Biomedical Engineering*. 19: 85-108. Acedido a 10 de julho de 2021, em: <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-bioeng-071516-044517>
- [19] Hosseinkhani A., Younesian D., Eghbali P., Moayedizadeh A. and Fassih A. (2021). Sound and vibration energy harvesting for railway applications: A review on linear and nonlinear techniques. *Energy Reports* (11/ 2021). **7**: 852-874
- [20] Kok S. L. (2011). Energy Harvesting Technologies: Thick-Film Piezoelectric Microgenerator. *Sustainable Energy Harvesting Technologies - Past, Present and Future*. Acedido 8 de Junho de 2021 em: https://www.researchgate.net/publication/221921592_Energy_Harvesting_Technologies_Thick-Film_Piezoelectric_Microgenerator
- [21] Meggitt. *InSensor™ thick film*. Acedido a 7 de Junho de 2021, em: <https://www.meggittferroperm.com/product/insensor-thick-film/>
- [22] Bashir M., Rajendran P. and Khan S.A. (2018). Energy Harvesting from Aerodynamic Instabilities: Current prospect and Future Trends. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (2018). **290**. Acedido a 7 de junho de 2021, em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/290/1/012054/pdf>
- [23] Cottone F. (2011). *Introduction to Vibration Energy Harvesting*. Acedido a 5 de junho de 2021, em: <https://www.nipslab.org/files/nips%20summer%20school%202011/Cottone%20Introduction%20to%20vibration%20harvesting.pdf>
- [24] Ali F., Raza W., Li X., Hajera G. and Kim K. H. (2019). Piezoelectric energy harvesters for biomedical applications. *Nano Energy* **57**: 879-902. Acedido a 3 de abril de 2021, em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211285519300126>

- [25] Akinaga H. (2020). Recent advances and future prospects in energy harvesting technologies. *Japanese Journal of Applied Physics*. **59**: 110201. Acedido a 15 de Maio de 2021, em: <https://iopscience.iop.org/article/10.35848/1347-4065/abbfa0>
- [26] Beeby S. P., Torah R. N., Tudor M. J., Glynne-Jones P., Donnell T. O., Saha C. R. and Roy S. (2007). A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. **17**: 1257-1265. Acedido a 2 de maio de 2021, em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/17/7/007>
- [27] Sardini E. and Serpelloni M. (2010). Nonlinear Electromagnetic Generators with Polymeric Materials for Power Harvesting from Vibrations. *Procedia Engineering*. **5**: 1168-1171. Acedido a 7 de maio de 2021, em: <https://mauro-serpelloni.unibs.it/wp-content/uploads/2015/06/Nonlinear-electromagnetic-generators-with-polymeric-materials-for-power-harvesting-from-vibrations.pdf>
- [28] Mallick D., Amann A. and Roy S. (2015). A nonlinear stretching based electromagnetic energy harvester on FR4 for wideband operation. IOPScience, *Smart Materials and Structures*. **24** 015013.
- [29] Phan T. N., Bader S., Oelmann B. (2020). Performance of An Electromagnetic Energy Harvester with Linear and Nonlinear Springs under Real Vibrations. *Sensors* , 20(19), 5456. Acedido a 15 de maio de 2021, em: <https://doi.org/10.3390/s20195456>
- [30] Bouendeu, E. (2010). *Printed Circuit Board-Based Electromagnetic Vibration Energy Harvesters*. Tese de doutoramento em Energy Harvesting. Department of Microsystems Engineering (IMTEK) - Albert Ludwig University of Freiburg im Breisgau, Feiburg. 158 pp.
- [31] Varadrajan E. and Bhanusri M. (2013). Design and simulation of unimorph piezoelectric energy harvesting system. *COMSOL Conference in Bangalore (2013)*.
- [32] Rhimi (2012). Design and simulation of unimorph piezoelectric energy harvesting system. *COMSOL Conference in Bangalore (2013)*.
- [33] Isarakorn D., Janphuang P. and Sambri A. (2011). The realization and performance of vibration energy harvesting MEMS devices based on an epitaxial piezoelectric thin film. *Smart Materials and Structures*. **20**. Acedido 8 de junho de 2021 em: https://www.researchgate.net/publication/49460239_The_realization_and_performanc

[e of vibration energy harvesting MEMS devices based on an epitaxial piezoelectric thin film](#)

- [34] Sodano H. A., Park G. and Inman D. J. (2004). Estimation of electric charge output for piezoelectric energy harvesting. *Strain*. Vol 40, no.2: 49-58.
- [35] Zervos H. (2013). Piezoelectric energy harvesting: Developments, challenges, future. *IdTechEx*. Acedido em 7 de maio de 2021, em: <https://www.idtechex.com/tw/research-article/piezoelectric-energy-harvesting-developments-challenges-future/5074>
- [36] Anton S. R. and Sodano H. A. (2007). A review of power harvesting using piezoelectric materials. *Smart Materials and Structures*. Vol. 16, no.3, pp. R1-R21.
- [37] Roundy S. J. (2003). *Energy scavenging for wireless sensor nodes with a focus on vibration to electricity conversion*. Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley.
- [38] Fanga H. B., Liua J. Q., Xub Z. Y., Donga L., Wangb L., Chena D., Cia B. C. and Liub Y. ((2006). Fabrication and Performance of MEM's based piezoelectric Power generation for vibration energy harvesting. *Microelectronics Journal* 37.
- [39] Woias, P. (2010). Micro Energy Harvesting. *Energy Harvesting Seminar, FTI Biel* (27.10.2010).
- [40] Dow A. B. A., Kherani N. P. and Schmid U. (2011). Analysis of a micromachined piezoelectric energy harvester. *SPIE*. Acedido a 8 de maio de 2021 em: <https://spie.org/news/3998-analysis-of-a-micromachined-piezoelectric-energy-harvester?SSO=1>
- [41] Zhu D. Almusallam, A., Beeby S. P. Tudor J. and Harris N. R. (2010). A Bimorph Multi-layer Piezoelectric Vibration Energy Harvester. *Conference PowerMEMS 2010*. Acedido a 23 de Junho de 2021 em: https://www.researchgate.net/publication/313363724_A_Bimorph_Multi-layer_Piezoelectric_Vibration_Energy_Harvester
- [42] Cymbet (2011). EnerChip™ EP Universal Energy Harvester Eval Kit – CBC – EVAL - 09. 14pp.

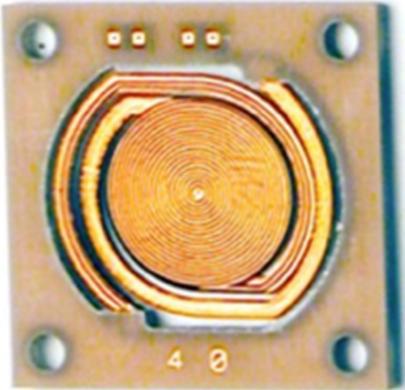
ANEXOS

ANEXO I - Tabela de custos

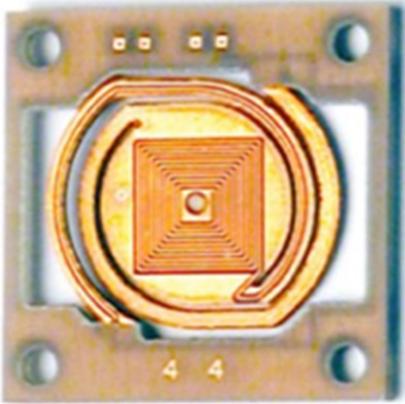
| Descrição | Quant. | Preço total (c/IVA) | Fabricante | Fornecedor |
|-----------------------------------|--------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Plataforma LTC3588-1 | 1 | 9 € | Analog Devices | Digikey |
| Board CBC-EVAL-09 | 1 | 110 € | CYMBET | Digikey |
| Nó sensor Sentrius BT510 | 1 | 55 € | LAIRD | Farnell |
| Transdutor piezoelétrico V22B | 1 | 45 € | Midé | Digikey |
| Transdutor eletromagnético VEG-50 | 1 | 75 € | XIDAS | Mouser |
| Transdutor piezoelétrico Buzz35 | 17 | 17 € | — | Mixtrónica |
| Amplificador áudio c/ LM386 | 1 | 12 € | National S. (CI) | Mixtrónica |
| Amplificador áudio c/ TDA2005 | 1 | 13 € | STMicroelectronics | Centro Electrónico |
| APP myFrequency | 1 | 9,90 € | APPtodate | Google Play |
| Altifalante F13027 | 1 | 10 € | FAITAL | — |
| Supercondensador 1 F, 5,5 V | 1 | 5 € | — | Mixtrónica |
| Balança, 0-200 g, resol.: 001 g | 1 | 8 € | Four M | — |
| Ventoinha 9x9 cm | 1 | 4 € | — | Mixtrónica |
| Componentes diversos | 1 | 95 € | — | Mixtrónica |
| TOTAL (c/IVA + Portes de envio): | | 468 € | | |

ANEXO II – Diferentes estruturas de molas planares

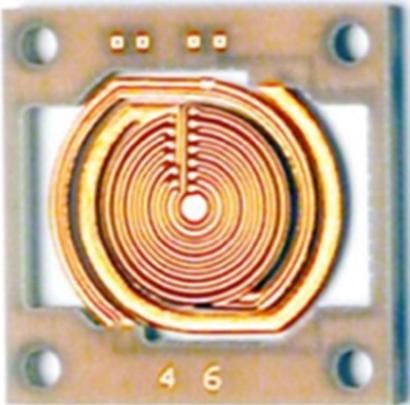
Diferentes estruturas de molas planares para geradores eletromagnéticos



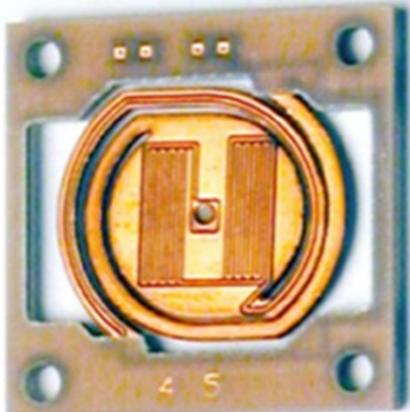
Bobine Circular



Bobine Quadrada



Bobine tipo Solenóide



Bobine com curvas variadas

ANEXO III - Tabela de componentes

Para a montagem que permitiu a análise da resposta do transdutor piezoelétrico em circuito aberto (fig 4.2) foram utilizados os seguintes componentes:

- Transdutor piezoelétrico V22B;
- Fonte de vibrações (Suporte p/ fixação do transdutor, base de apoio (régua) e ventoinha);
- Fonte de alimentação;
- Medidor de vibrações;
- Massas de prova;
- Resistência variável;
- Cabos e material de fixação;
- Multímetro e osciloscópio;
- Balança.

Composição da fonte de vibrações para o transdutor piezoelétrico (secção 4.2):

- Régua (40 cm);
- Ventoinha (12 V, 9x9 cm);
- Suporte p/ fixação do Transdutor piezoelétrico;
- Massa agregada (borracha), para desequilibrar a ventoinha: 1,4 g;
- Fonte de alimentação p/ ventoinha (Marca: JoinPlus, Modelo: KK570/1, Tensão: 1,5 a 12 v, Imáx.: 500 mA).

Para a montagem que permitiu a análise da resposta do transdutor eletromagnético em circuito aberto (fig. 5.1) foram utilizados os seguintes componentes:

- Transdutor eletromagnético VEG-50;
- Fonte de vibrações (*Shaker*);
- Gerador de sinal e Medidor de vibrações
- Amplificador de potência;
- Fonte de alimentação;
- Cabos e material de fixação;
- Multímetro e osciloscópio;

ANEXO IV - LINEAR LTC3588-1 Datasheet

FEATURES

- 950nA Input Quiescent Current (Output in Regulation – No Load)
- 450nA Input Quiescent Current in UVLO
- 2.7V to 20V Input Operating Range
- Integrated Low-Loss Full-Wave Bridge Rectifier
- Up to 100mA of Output Current
- Selectable Output Voltages of 1.8V, 2.5V, 3.3V, 3.6V
- High Efficiency Integrated Hysteretic Buck DC/DC
- Input Protective Shunt – Up to 25mA Pull-Down at $V_{IN} \geq 20V$
- Wide Input Undervoltage Lockout (UVLO) Range
- Available in 10-Lead MSE and 3mm x 3mm DFN Packages

APPLICATIONS

- Piezoelectric Energy Harvesting
- Electro-Mechanical Energy Harvesting
- Wireless HVAC Sensors
- Mobile Asset Tracking
- Tire Pressure Sensors
- Battery Replacement for Industrial Sensors
- Remote Light Switches
- Standalone Nanopower Buck Regulator

DESCRIPTION

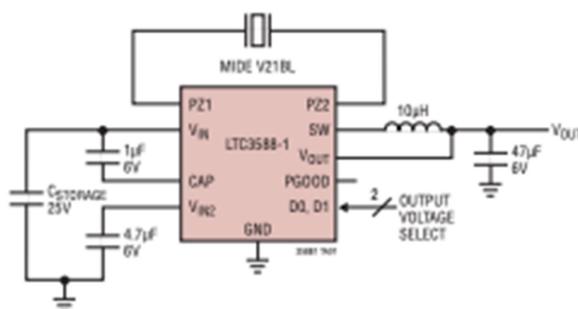
The **LTC3588-1** integrates a low-loss full-wave bridge rectifier with a high efficiency buck converter to form a complete energy harvesting solution optimized for high output impedance energy sources such as piezoelectric, solar, or magnetic transducers. An ultralow quiescent current undervoltage lockout (UVLO) mode with a wide hysteresis window allows charge to accumulate on an input capacitor until the buck converter can efficiently transfer a portion of the stored charge to the output. In regulation, the LTC3588-1 enters a sleep state in which both input and output quiescent currents are minimal. The buck converter turns on and off as needed to maintain regulation.

Four output voltages, 1.8V, 2.5V, 3.3V and 3.6V, are pin selectable with up to 100mA of continuous output current; however, the output capacitor may be sized to service a higher output current burst. An input protective shunt set at 20V enables greater energy storage for a given amount of input capacitance.

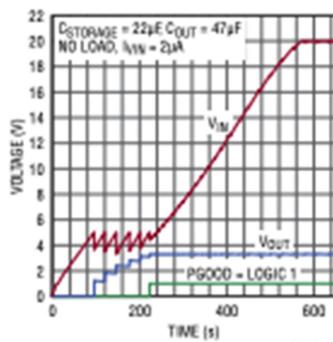
LT, LT, LTC, LTM, Linear Technology, the Linear logo and Burst Mode are registered trademarks of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

TYPICAL APPLICATION

100mA Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply



LTC3588-1 3.3V Regulator Start-Up Profile



LTC3588-1

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 1)

| | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|---|
| V_{IN} | V_{OUT} | -0.3V to Lesser of ($V_{IN2} + 0.3V$) or 6V |
| Low Impedance Source | PGOOD..... | -0.3V to Lesser of ($V_{OUT} + 0.3V$) or 6V |
| Current Fed, $I_{SW} = 0A$ | I_{PZ1}, I_{PZ2} | $\pm 50mA$ |
| PZ1, PZ2 | I_{SW} | 350mA |
| D0, D1..... | Operating Junction Temperature Range | (Notes 2, 3)..... |
| CAP..... | Storage Temperature Range | -40 to 125°C |
| V_{IN2} | Lead Temperature (Soldering, 10 sec) | MSE Only..... |
| | | 300°C |

* V_{IN} has an internal 20V clamp

† For $t < 1ms$ and Duty Cycle $< 1\%$,
Absolute Maximum Continuous Current = 5mA

PIN CONFIGURATION



ORDER INFORMATION

| LEAD FREE FINISH | TAPE AND REEL | PART MARKING* | PACKAGE DESCRIPTION | TEMPERATURE RANGE |
|-------------------|---------------------|---------------|---------------------------------|-------------------|
| LTC3588EDD-1#PBF | LTC3588EDD-1#TRPBF | LFKY | 10-Lead (3mm x 3mm) Plastic DFN | -40°C to 125°C |
| LTC3588IDD-1#PBF | LTC3588IDD-1#TRPBF | LFKY | 10-Lead (3mm x 3mm) Plastic DFN | -40°C to 125°C |
| LTC3588EMSE-1#PBF | LTC3588EMSE-1#TRPBF | LTFKX | 10-Lead Plastic eMSOP | -40°C to 125°C |
| LTC3588IMSE-1#PBF | LTC3588IMSE-1#TRPBF | LTFKX | 10-Lead Plastic eMSOP | -40°C to 125°C |

Consult LTC Marketing for parts specified with wider operating temperature ranges. *The temperature grade is identified by a label on the shipping container.

For more information on lead free part marking, go to: <http://www.linear.com/leadfree/>

This product is only offered in trays. For more information go to: <http://www.linear.com/packaging/>

PIN FUNCTIONS

PZ1 (Pin 1): Input connection for piezoelectric element or other AC source (used in conjunction with PZ2).

PZ2 (Pin 2): Input connection for piezoelectric element or other AC source (used in conjunction with PZ1).

CAP (Pin 3): Internal rail referenced to V_{IN} to serve as gate drive for buck PMOS switch. A $1\mu\text{F}$ capacitor should be connected between CAP and V_{IN} . This pin is not intended for use as an external system rail.

V_{IN} (Pin 4): Rectified Input Voltage. A capacitor on this pin serves as an energy reservoir and input supply for the buck regulator. The V_{IN} voltage is internally clamped to a maximum of 20V (typical).

SW (Pin 5): Switch Pin for the Buck Switching Regulator. A $10\mu\text{H}$ or larger inductor should be connected from SW to V_{OUT} .

V_{OUT} (Pin 6): Sense pin used to monitor the output voltage and adjust it through internal feedback.

V_{IN2} (Pin 7): Internal low voltage rail to serve as gate drive for buck NMOS switch. Also serves as a logic high rail for output voltage select bits D0 and D1. A $4.7\mu\text{F}$ capacitor should be connected from V_{IN2} to GND. This pin is not intended for use as an external system rail.

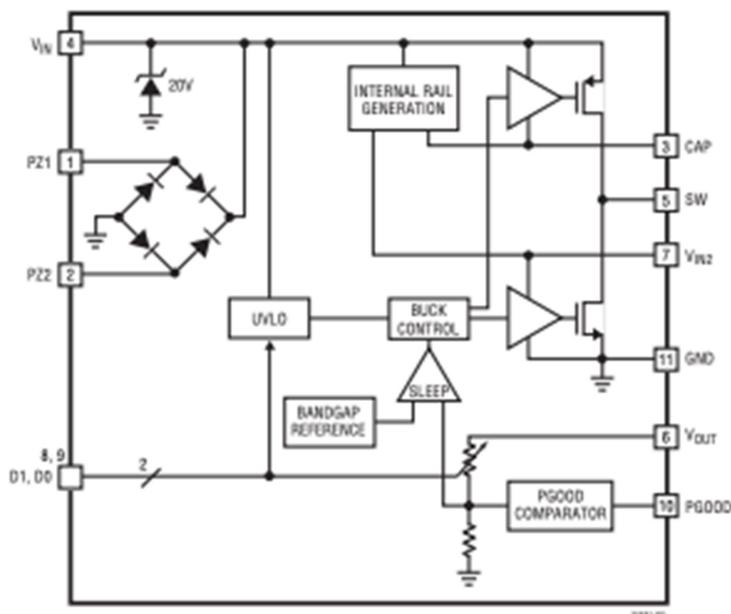
D1 (Pin 8): Output Voltage Select Bit. D1 should be tied high to V_{IN2} or low to GND to select desired V_{OUT} (see Table 1).

D0 (Pin 9): Output Voltage Select Bit. D0 should be tied high to V_{IN2} or low to GND to select desired V_{OUT} (see Table 1).

PGOOD (Pin 10): Power good output is logic high when V_{OUT} is above 92% of the target value. The logic high is referenced to the V_{OUT} rail.

GND (Exposed Pad Pin 11): Ground. The Exposed Pad should be connected to a continuous ground plane on the second layer of the printed circuit board by several vias directly under the LTC3588-1.

BLOCK DIAGRAM



3588110

ANEXO V - XIDAS VEG-50 Especificações

VEG

Vibration-Based Energy Harvesting Generator

99000001-A0

Introduction

The VEG series of vibration-based energy harvesting generators utilize novel electromagnetic technology to convert small vibrations in the environment (such as industrial machinery) into electrical energy. Even at low vibration profiles of sub 100 Hz and sub 1g accelerations, these industry-first energy harvesters can generate 10+ mW of power! By leveraging decades of 3D manufacturing research, Xidas delivers a highly cost-effective solution to the IoT market's biggest issue: battery life.

Leading sensor manufacturers have all started introducing wireless versions of their sensors. Additionally, new IoT companies are emerging that leverage advances in MEMS transducers and couple them with edge intelligence and big data analytics to provide application specific solutions. All these wireless devices must balance what the edge device does with how much power capacity the battery can provide. Wireless sensor lifetime, or battery lifetime becomes the most critical selling criteria for Wireless IoT products, particularly for industrial or B2B applications as the cost of replacing batteries is substantial. Hence...the need to incorporate energy harvesting solutions.

Xidas offers a range of VEG models that are designed for 20 Hz (VEG-20), 30 Hz (VEG-30), 50 Hz (VEG-50), 60 Hz (VEG-60), and 70 Hz (VEG-70). It is important to understand what the common resonant frequency is of the vibrating source you will be mounting on. For other target resonant frequencies, please consult with the factory.

These units are offered with the intent to be designed within your wireless sensor enclosure. Including the VEG energy harvesting inside your wireless product can increase your solution's lifetime to 10+ years!



Size of VEG compared to a D-Cell battery



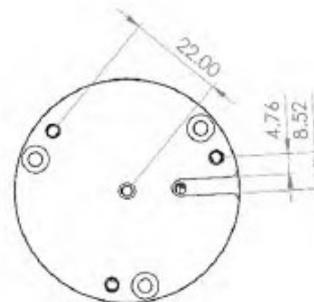
Specifications

| | |
|----------------------------|------------------------------------|
| Electrical Output | 20 V max peak-to-peak (w/ 440 ohm) |
| Power at 0.1 g's resonance | 1mW (typ) |
| Power at 0.2 g's resonance | 4mW (typ) |
| Power at 0.5g's resonance | 18mW (typ) |
| Max Acceleration | 0.9 g |
| Output Impedance | 440 ohm 24 mH @ 1 kHz (typ) |
| Dimensions | 52mm dia. x 24mm |
| Mass (maximum) | 90 g |
| Operating Temperature | -40°C to+85°C |
| Life | > 10 years |
| Coil Resistance | 435 Ω |

Dimensions (millimeters)



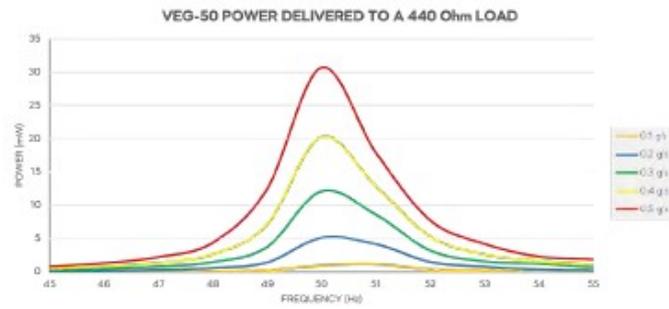
(a) Shows the side profile.

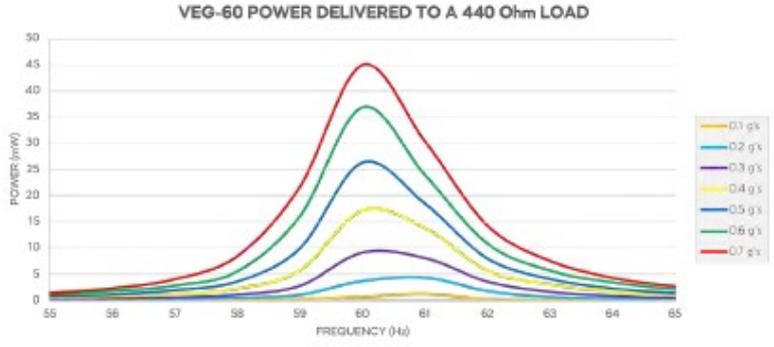


(b) Shows the bottom profile.

Power Output (Energy Generation)

The following graphs shows the maximum power which can be drawn from the generator when applied to a resistive load.





ANEXO VI - LAIRD Sentrius BT510 Guia de utilizador

1 ABOUT THIS GUIDE

This document provides a comprehensive guide on how to configure the Sentrius™ BT510 Sensor functionality, including Bluetooth settings and temperature readings, motion, and contact detection.

2 INTRODUCTION

2.1 Product Overview

The Sentrius™ BT510 Sensor is a battery powered, Bluetooth v5 long-range integrated sensor platform enabling robust, reliable sensor data transfer in the harshest of environments. It contains a temperature sensor, also seamlessly integrating open/close contact and motion/impact detection and BLE beaconing capabilities. The BT510 is powered by Laird Connectivity's field proven BL654 BLE module that integrates Nordic Semiconductor's nRF52840 SoC silicon.



Figure 1: Top of the Sentrius™ BT510 sensor

1. Fixing holes
2. LED
3. Hidden button to wake device
4. Magnetic switch



Figure 2: Back of the Sentrius™ BT510 sensor

Note: Laird Connectivity has a comprehensive staff of design services engineers available to help customize the sensor. Please contact your local Laird sales representative for more details.

2.2 Specifications

See the BT510 product brief for detailed specifications. It's available from the documentation tab of the BT510 series product page: <https://www.lairdconnect.com/bt510>

3 DEVICE OPERATION

3.1 Activating the Sensor

The Sentrius™ BT510 doesn't have a power switch. It is shipped with an installed battery and is in a low power state called shelf mode.

To wake the device, firmly press the button in the center of the round face for at least three seconds until the green LED turns on. This puts the device in active mode. Once in active mode, the BT510 is able to report back the sensor readings for the magnet, accelerometer, and temperature.

When you release the button, the green LED blinks once a second.

The sensor is in sleep mode from the factory. Pressing the button for three seconds wakes the sensor and it starts to advertise. The sensor is now ready for normal operation configuration. This can be done using a phone or gateway. The LED blinks for 30 seconds or until a connection is made, the button is pressed again, or the sensor stops advertising. The default state of the sensor is to advertise for 30 minutes.

3.2 Battery Check

Quickly press the button to perform a battery good check. If the battery is good, the sensor briefly blinks the green LED and starts to advertise for 15 seconds. If the battery is below the recommended operating voltage, then the LED does not blink but the sensor tries to advertise. It is possible for the mobile application to connect to the BT510 within the 15 second advertisement duration, but if the BT510 is not set to active mode the sensor does not take any sensor readings.

3.3 Factory Reset

If the button is held for more than 10 seconds and released, the sensor performs a factory reset. A factory reset erases all logs, pairing information, and resets the configuration to its default state. It takes the BT510 two seconds after the reset before it is running again and a button press can be detected.

When the button (as shown in [Figure 1](#)) is held for 10 seconds, the LED turns yellow or red. If the LED turns red, then factory reset is not allowed using the button. This is because the sensor is locked. The sensor can be locked by using one of the JSON properties. When locked, the factory reset can still be performed using Bluetooth. If the LED turns yellowish orange, then factory reset is allowed. The yellowish orange LED blinks when the button is released. Once the BT510 is reset to factory settings, the BT510 sensor must be put back into active mode by holding the button for three seconds.

3.4 Replacing Batteries

The battery is a 3-volt lithium of CR2477 type.

Note: The battery door cover has a gasket inside to keep out liquids.

3.5 Care and Maintenance

The sensor can be cleaned with a mild, non-abrasive detergent. Because it is not waterproof, do not immerse it in water.

The sensor does not require any calibration.



Figure 3: Front side of the Sentrius™ BT510 sensor

The sensor blinks the green LED, begins advertising, and becomes connectable.

3. Tap the search icon to discover the sensor(s) within range of the mobile device (Figure 4).

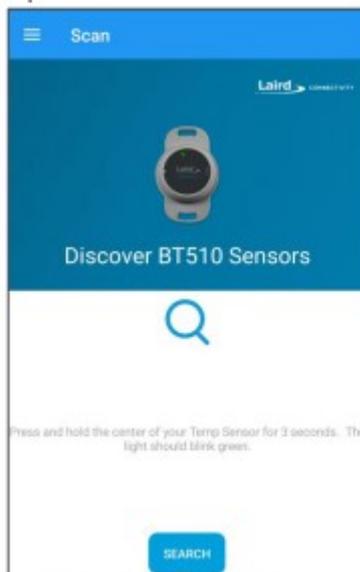


Figure 4: Scan for new sensors

4. Select the applicable device. The sensor name defaults to BT510 when searching for the sensor. The BLE ID is printed on the label located on the back of the sensor (Figure 5). The BLE ID matches the number of the applicable sensor located in the search results Discover screen (Figure 6).

Note: The number displayed in the search results is the same number as shown on the device label just in a different format. For example, from the following, the BLE ID **D936EE37716E** on the label matches **BT510 – D9-36-EE-37-71-6E** in the search results.



Figure 5: BLE ID location



Figure 6: Device search results

Once you select the desired sensor and if this is the first time connecting to it, you need to pair the selected device.

5. When prompted **Pair with BT510?**, select **Pair**. If you select **Cancel**, the application disconnects from the sensor (Figure 7).

The default pairing key is 123456 (Figure 8).

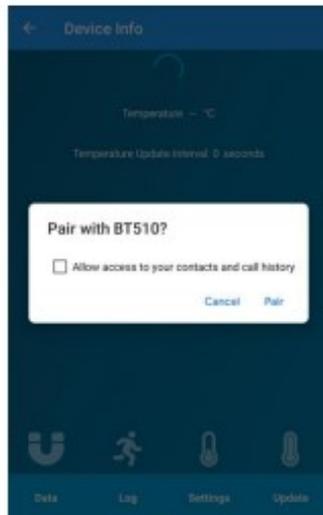


Figure 7: Pair window

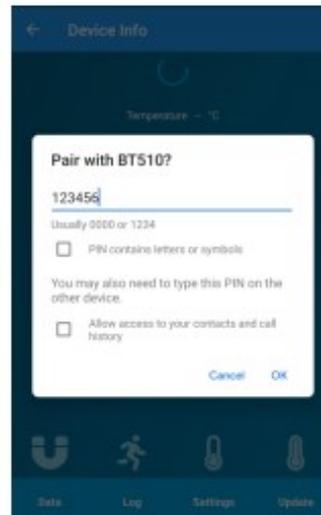


Figure 8: Pair key

Once paired, the Main screen of the mobile application displays. This screen contains a graph of the temperature over time. It also indicates at what interval the temperature value is updated by the sensor (Figure 9).



Figure 9: Main screen

| | |
|---|---|
|  | Lights up when there is change in the magnetic switch. |
|  | Lights up when the configured <i>G Threshold</i> alarm value is reached. |
|  | Lights up when the temperature of the sensor reaches one of the configured low temperature alarms. |
|  | Lights up when the temperature of the sensor reaches one of the configured high temperature alarms. |

5.3 Device Configuration

The following section describes how to configure various aspects of the device. To access the configuration option, select **Settings** located near the bottom of the main screen (Figure 10).



Figure 10: Access Settings

5.3.1 Sensor Configuration

| | | |
|--------------|--------------------------|-----|
| Device Name | BT510 | SET |
| Passkey | 123456 | SET |
| Location | | SET |
| LE Coded PHY | <input type="checkbox"/> | SET |

Device Name – Used to assign a user-friendly name to the sensor

Passkey – A unique number assigned to the device to help protect the configuration values from being changed without permission. This passkey is used when pairing a sensor to a new mobile device

Location - Can be given a name to help identify the area where the sensor is being stored.

LE Coded PHY – When selected the device will switch to transmitting a Coded PHY extended advertisement. The mobile app may not be able to reconnect to the BT510.

NOTE: When selecting this option, the only way to return to 1M PHY (normal operation) is to perform a factory reset or send a JSON command.

Pressing the set button for any of these configurations except Location will cause the BT510 to reset with the new value. There is a 2 second delay before the BT510 reset. This might cause noticeable delay in response from the mobile app.

5.3.2 Interval Configuration

| INTERVALS | | |
|---------------------------|------|-----|
| Temp Sense (s) | 0 | SET |
| Advertising Duration (ms) | 0 | SET |
| Advertising Interval (ms) | 1000 | SET |
| Connection Timeout (s) | 60 | SET |
| Battery Sense (s) | 0 | SET |

Temp Sense – The time in seconds when the sensor takes a temperature measurement.

Advertising Duration – Specifies how long the sensor should advertise each event. When set to 0, it advertises indefinitely. When set greater than 0, the duration cannot be less than four times the Advertising Interval

Advertising Interval – The time between advertising packets.

Connection Timeout – The time in seconds that the mobile device is connected to the sensor. When set to 0, there is no timeout.

Battery Sense – The time in seconds when the sensor takes battery measurement.

5.3.3 Alarm Configuration

| ALARMS | | |
|-------------------|---------------------------------|-----|
| G Threshold | <input type="range" value="3"/> | 3 |
| Temp Delta T (°C) | 255 | SET |
| Temp High T1 (°C) | 127 | SET |
| Temp High T2 (°C) | 127 | SET |
| Temp Low T1 (°C) | -127 | SET |
| Temp Low T2 (°C) | -127 | SET |

G Threshold – Sets the acceleration threshold on the sensor. The lower the number, the lower amount acceleration acted on the device is required to trigger the alarm.

Temp Delta – The alarm is triggered when the temperature change between intervals is greater than value written here.

Temp High T1 – Alarm that triggers when the sensor temperature is higher than this value. It is also logged when triggered and has the high temp icon light up on the data screen.

Temp High T2 – Behaves the same as *Temp High T1*. This is just another alarm that can be triggered if the temperature is high than this value.

Temp Low T1 – Alarm that triggers when the sensor temperature is lower than this value. It is also logged when triggered and has low temp icon light up on the data screen.

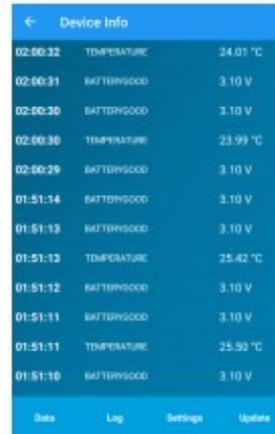
Temp Low T2: This behaves the same as *Temp Low T1*. This is just another alarm that can be triggered if the temperature is lower than this value.

5.4 View Log

Select the Log icon located near the bottom of the screen (Figure 11). Figure 12 displays an example of log data over time.



Figure 11: Log icon

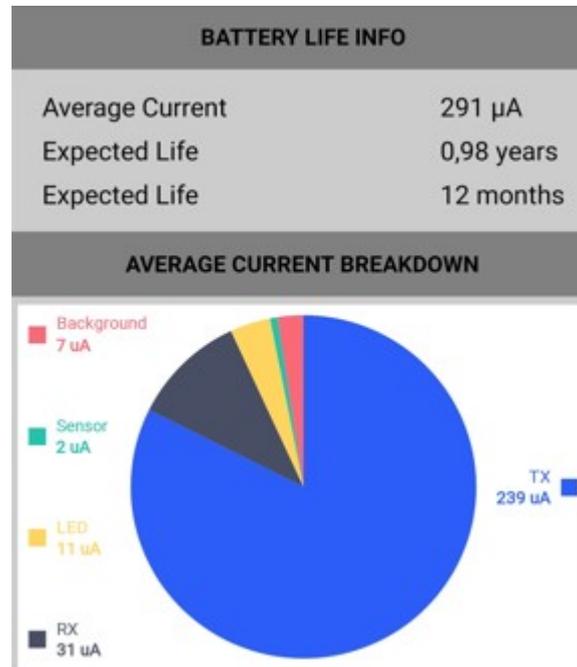


A screenshot of the 'Device Info' log screen. The screen has a blue header with a back arrow and the text 'Device Info'. Below the header is a list of log entries. Each entry consists of a timestamp, a status, and a value. The entries are: 02:00:32 TEMPERATURE 24.01 °C, 02:00:31 BATTERYGOOD 3.10 V, 02:00:30 BATTERYGOOD 3.10 V, 02:00:30 TEMPERATURE 23.99 °C, 02:00:29 BATTERYGOOD 3.10 V, 01:51:14 BATTERYGOOD 3.10 V, 01:51:13 BATTERYGOOD 3.10 V, 01:51:13 TEMPERATURE 25.42 °C, 01:51:12 BATTERYGOOD 3.10 V, 01:51:11 BATTERYGOOD 3.10 V, 01:51:11 TEMPERATURE 25.50 °C, 01:51:10 BATTERYGOOD 3.10 V. At the bottom of the screen is a navigation bar with four buttons: 'Data', 'Log', 'Settings', and 'Update'.

| Timestamp | Status | Value |
|-----------|-------------|----------|
| 02:00:32 | TEMPERATURE | 24.01 °C |
| 02:00:31 | BATTERYGOOD | 3.10 V |
| 02:00:30 | BATTERYGOOD | 3.10 V |
| 02:00:30 | TEMPERATURE | 23.99 °C |
| 02:00:29 | BATTERYGOOD | 3.10 V |
| 01:51:14 | BATTERYGOOD | 3.10 V |
| 01:51:13 | BATTERYGOOD | 3.10 V |
| 01:51:13 | TEMPERATURE | 25.42 °C |
| 01:51:12 | BATTERYGOOD | 3.10 V |
| 01:51:11 | BATTERYGOOD | 3.10 V |
| 01:51:11 | TEMPERATURE | 25.50 °C |
| 01:51:10 | BATTERYGOOD | 3.10 V |

Figure 12: Log data

Perfil energético do sensor Sentrius BT510:



ANEXO VII - Tabelas de transdutores para captação de energia das vibrações

Tabela com comparação entre transdutores eletromagnéticos:

| Author | Reference | Generator Volume [cm ³] | Proof Mass [g] | Input Amplitude [μm] | Input Frequency [Hz] | Z _I [μm] | Power (un-processed) [μW] | Power (pro-processed) [μW] | Power Density [μW/cm ³] | Harvester Effectiveness [%] | Volume Figure of Merit [%] |
|-----------------|-----------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Li | [91] | 1.00 | 0.22 | 200 | 60 | 5000 | | 100 | 100 | 1.70 | 0.08 |
| Li | [91] | 1.00 | 0.22 | 200 | 120 | 1000 | | 100 | 100 | 1.07 | 0.01 |
| Ching | [130] | 1.00 | | 210 | 107 | | 1.50 | | 1.50 | | 0.2 × 10 ⁻³ |
| Ching | [130] | 1.00 | | 190 | 104 | | 5.00 | | 5.00 | | 0.8 × 10 ⁻³ |
| Li | [131] | 1.24 | 210 | 100 | 64 | | | 10 | 8.06 | | 0.01 |
| Williams | [89] | 0.02 | 2.4 × 10 ⁻³ | 0.50 | 4400 | 63 | 0.33 | | 22 | 0.04 | 7 × 10 ⁻⁵ |
| El-hami | [132] | 0.24 | 0.50 | 25 | 322 | 940 | 530 | | 2208.3 | 1.09 | 0.14 |
| Ching | [133] | 1.00 | | 200 | 60 | | | 680 | 680 | | 0.52 |
| Ching | [133] | 1.00 | | 200 | 110 | | | 680 | 680 | | 0.08 |
| Ching | [92] | 1.00 | | 200 | 60 | | | 830 | 830 | | 0.64 |
| Ching | [92] | 1.00 | | 200 | 110 | | | 830 | 830 | | 0.1 |
| Mizuno | [108] | 2.10 | 0.54 | 0.64 | 700 | 6.5 | 0.4 × 10 ⁻³ | | 0.2 × 10 ⁻³ | 0.42 × 10 ⁻³ | 2.26 × 10 ⁻⁶ |
| Lee | [134] | 7.30 | 0.14 | 150 | 85 | 7500 | 830 | | 114 | 6.92 | 0.02 |
| Glynn-Jones | [135] | 0.84 | | 13 | 322 | 360 | 37 | | 44.0 | | 0.003 |
| Beeby | [136] | 0.10 | 0.03 | 5.4 × 10 ⁻³ | 9500 | 500 | 0.02 | | 0.21 | 2.6 × 10 ⁻³ | 3.27 × 10 ⁻⁵ |
| Beeby | [137] | 0.06 | 0.44 | 0.62 | 350 | 217 | 2.85 | | 47.5 | 0.90 | 0.15 |
| Beeby | [137] | 0.07 | 0.03 | 0.98 × 10 ⁻³ | 9500 | 240 | 0.12 | | 1.79 | 0.02 | 0.174 × 10 ⁻³ |
| Serre | [138] | 0.68 | 1.56 | 3.40 | 360 | | 0.05 | | 0.07 | | 1.6 × 10 ⁻⁵ |
| Saha | [96] | | 43 | 115 | 13.1 | 1250 | 2000 | | | | |
| Saha | [96] | | 25 | 28 | 84 | 1500 | 3200 | | | | |
| Huang | [139] | 0.04 | 0.03 | 50 | 100 | 5200 | 1.44 | | 40 | 0.14 | 0.08 |
| Perpetuum | [140] | 131 | | 0.633 | 99 | | | 800 | 6.1 | | 0.065 |
| Perpetuum | [140] | 131 | | 2.54 | 99 | | | 3500 | 27 | | 0.07 |
| Perpetuum | [140] | 131 | | 25.4 | 99 | | | 40000 | 306 | | 0.08 |
| Ferro Solutions | [141] | 133 | | 1.73 | 60 | | 800 | | 6.0 | | 0.1 |
| Ferro Solutions | [141] | 133 | | 3.45 | 60 | | 3100 | | 23 | | 0.2 |
| Ferro Solutions | [141] | 133 | | 6.9 | 60 | | 10800 | | 81 | | 0.35 |

Tabela com comparação entre transdutores piezoelétricos:

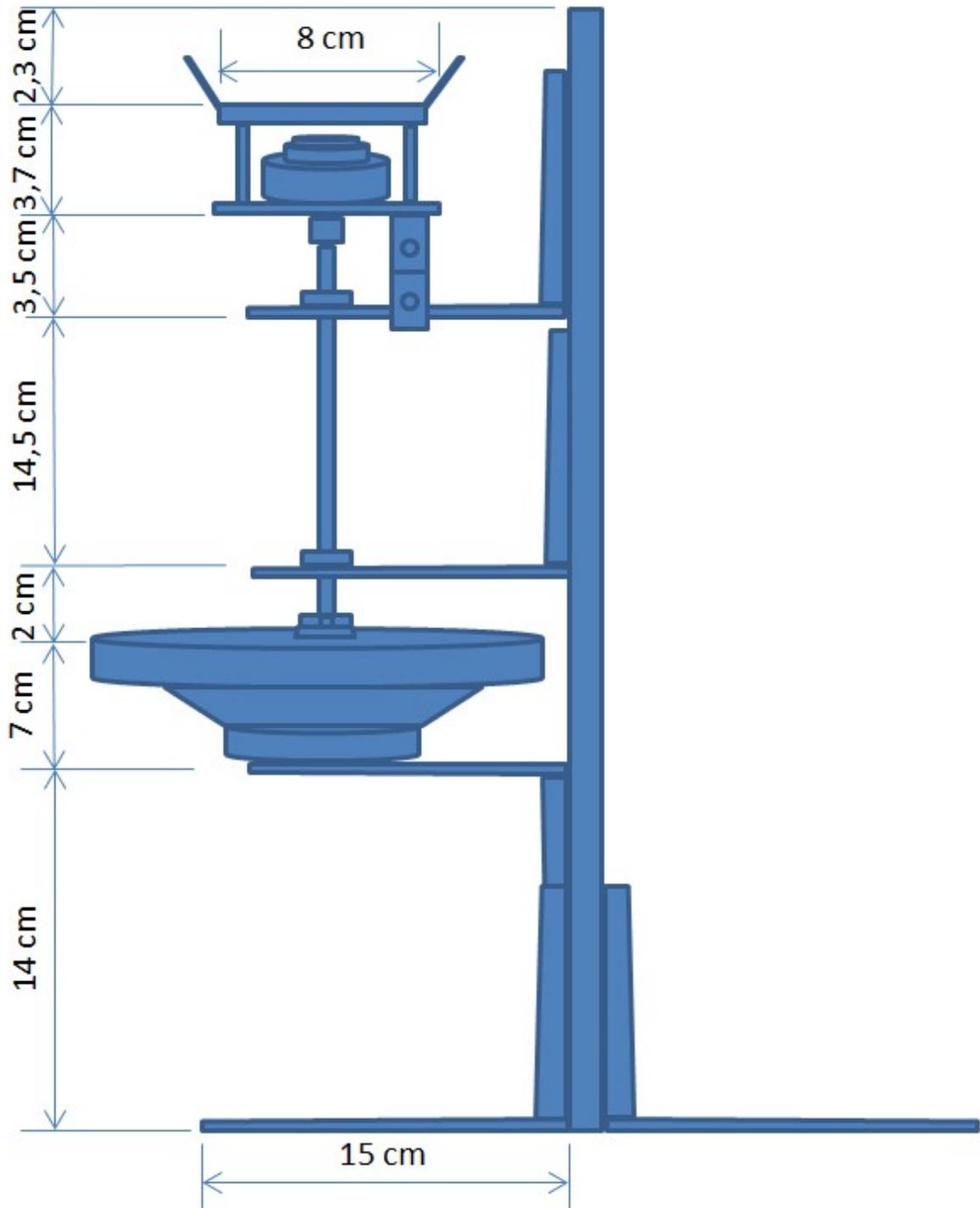
| Author | Reference | Generator Volume [cm ³] | Proof Mass [g] | Input Amplitude [μm] | Input Frequency [Hz] | Z _I [μm] | Power (un-processed) [μW] | Power (pro-processed) [μW] | Power Density [μW/cm ³] | Harvester Effectiveness [%] | Volume Figure of Merit [%] |
|-------------|------------|-------------------------------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Glynn-Jones | [149] | 0.53 | | | 80.1 | 800 | 1.5 | | 2.83 | | |
| Roundy | [2] | 1 | 8.5 | 4 | 120 | 150 | 80 | | 80 | 7.3 | 0.39 |
| Roundy | [2] | 1 | 7.5 | 7.9 | 85 | 143 | 207 | 90 | 90 | 14 | 0.62 |
| Roundy | [2] | 1 | 8.2 | 16 | 60 | 150 | 365 | 180 | 180 | 34 | 1.74 |
| Wright | [2], [123] | 4.8 | 52.2 | 36 | 40 | | 1700 | 700 | 145 | | 1.25 |
| Lefevre | [150] | 113 | 228 | | 56 | 2000 | | 10000 | 88 | | |
| Lefevre | [150] | 113 | 228 | | 56 | 2000 | | 300000 | 2650 | | |
| Lefevre | [151] | | | | Random | | | | 15000 | | |
| Tanaka | [152] | 9 | | 10 | 50 | | 180 | | 20 | | 0.26 |
| Fang | [153] | 0.0006 | 0.0015 | 4.4 | 609 | | 2.16 | | 3510 | | 1.39 |
| Elvin | [154] | 0.101 | 1.2 | earth quake spectrum | 0.5 | 2000 | 0.25 | | 2.47 | | |
| Duggirala | [155] | | | | 38 | | 0.17 | | | | |
| Duggirala | [155] | | | | 38 | | 1.13 | | | | |
| Jeon | [156] | | | 32.5 | 13900 | 2.56 | 1 | | | | |
| Ng | [157] | 0.20 | 0.96 | 184 | 100 | | 35.5 | 16.3 | 82 | | 0.03 |
| Ferrari | [158] | | 82 | 0.053 | 41 | | | 0.27 | | | |
| Mide | [159] | 40.5 | | 99 | 50 | | | 8000 | 198 | | 0.16 |
| Mide | [159] | 40.5 | | 11 | 150 | | | 1800 | 45 | | 0.012 |

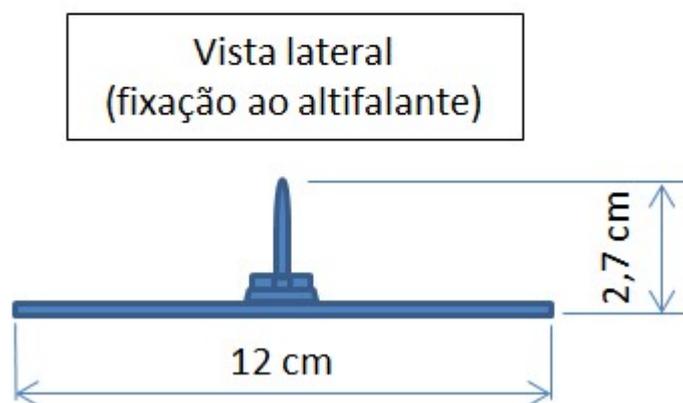
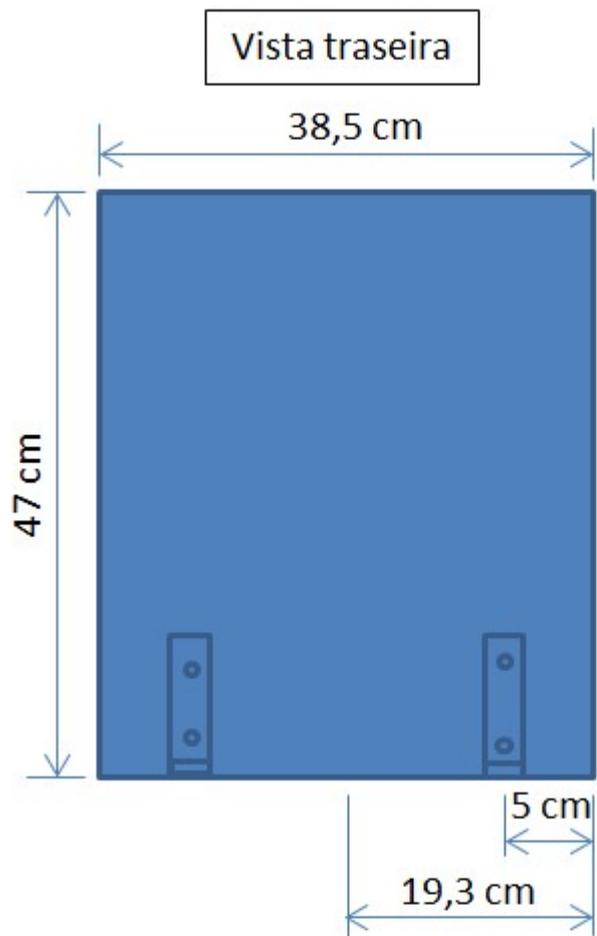
Tabela com comparação entre transdutores eletrostáticos:

| Author | Reference | Generator Volume [cm ³] | Proof Mass [g] | Input Amplitude [μ m] | Input Frequency [Hz] | Z _l [μ m] | Power (un-processed) [μ W] | Power (pro-cessed) [μ W] | Power Density [μ W/cm ³] | Harvester Effectiveness [%] | Volume Figure of Merit [%] |
|------------|-----------|-------------------------------------|----------------|----------------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---|-----------------------------|----------------------------|
| Tashiro | [104] | | 640 | 380 | 4.76 | 19000 | | 58 | | 0.09 | |
| Tashiro | [142] | 15 | 780 | 9000 | 6 | | 36 | | 2.42 | | 0.02 |
| Mizuno | [108] | 0.6 | 0.7 | 0.64 | 743 | 4.9 | 7.4×10^{-6} | | 1.23×10^{-3} | 6.6×10^{-6} | 1.86×10^{-9} |
| Miyazaki | [143] | | 5 | 1 | 45 | 30 | | 0.21 | | 12.4 | |
| Arakawa | [144] | 0.4 | 0.65 | 1000 | 10 | 1000 | 6 | | 15 | 7.42 | 0.68 |
| Despesse | [145] | 18 | 104 | 90 | 50 | 90 | 1760 | 1000 | 56 | 7.66 | 0.06 |
| Yen | [146] | | | | 1500 | | | 1.8 | | | |
| Tsutsumino | [147] | | | 600 | 20 | 600 | 278 | | | | |
| Tsutsumino | [148] | | | 1000 | 20 | 1000 | 6.4 | | | | |
| Mitcheson | [109] | 0.6 | 0.12 | 1130 | 20 | 100 | 2.4 | | 4 | 17.9 | 0.02 |

ANEXO VIII – Dimensões da fonte de vibrações (*Shaker*)

Vista lateral





ANEXO IX – Experiências realizadas com transdutores piezoelétricos e eletromagnéticos

Experiência nº1: Captação de energia das vibrações do passo humano com transdutores piezoelétricos associados em paralelo

Com utilização dos seguintes componentes:

14 Transdutores piezoelétricos Buzz35, em paralelo;

4 Díodos em ponte, 1N4001;

1 Supercondensador, 1 F, 5,5 V.

Nas figuras 1 e 2 podemos ver a implementação dos piezoelétricos em paralelo, a ponte de díodos e o supercondensador.

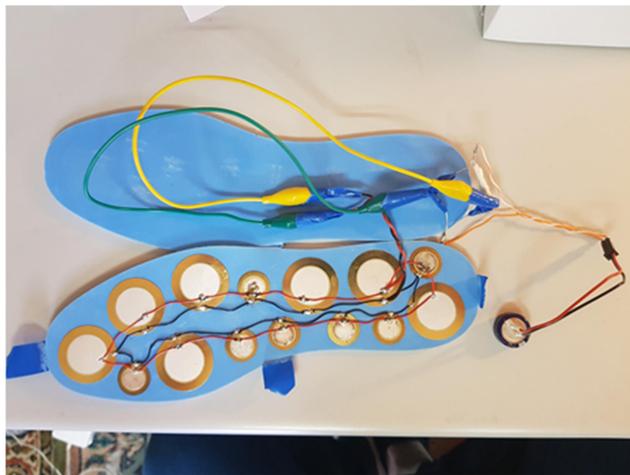


Figura 1: Piezoelétricos montados na base de apoio.

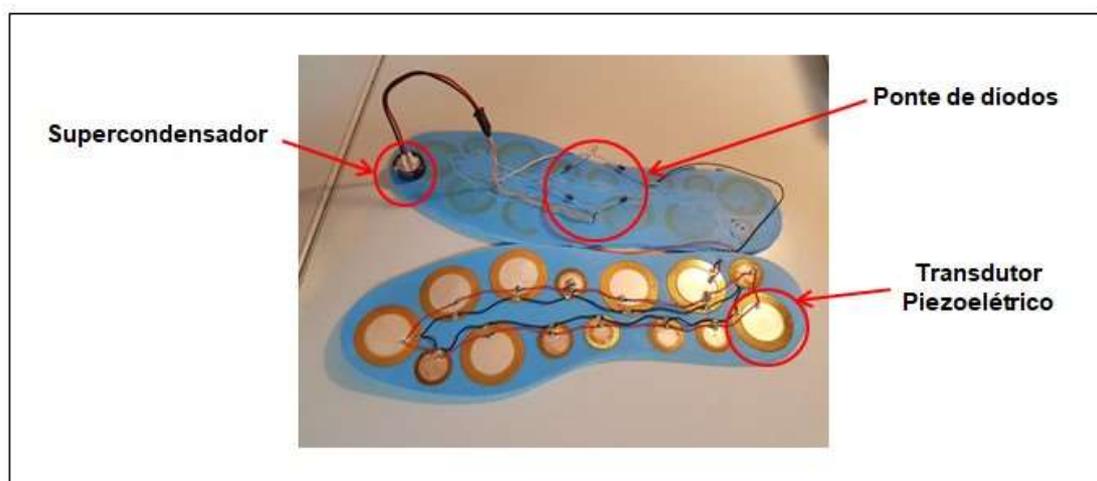


Figura 2: Vista dos componentes utilizados: supercondensador, ponte de díodos e piezoelétricos.

Nas figuras 4 (a), (b) e (c) podemos observar a instalação da montagem.

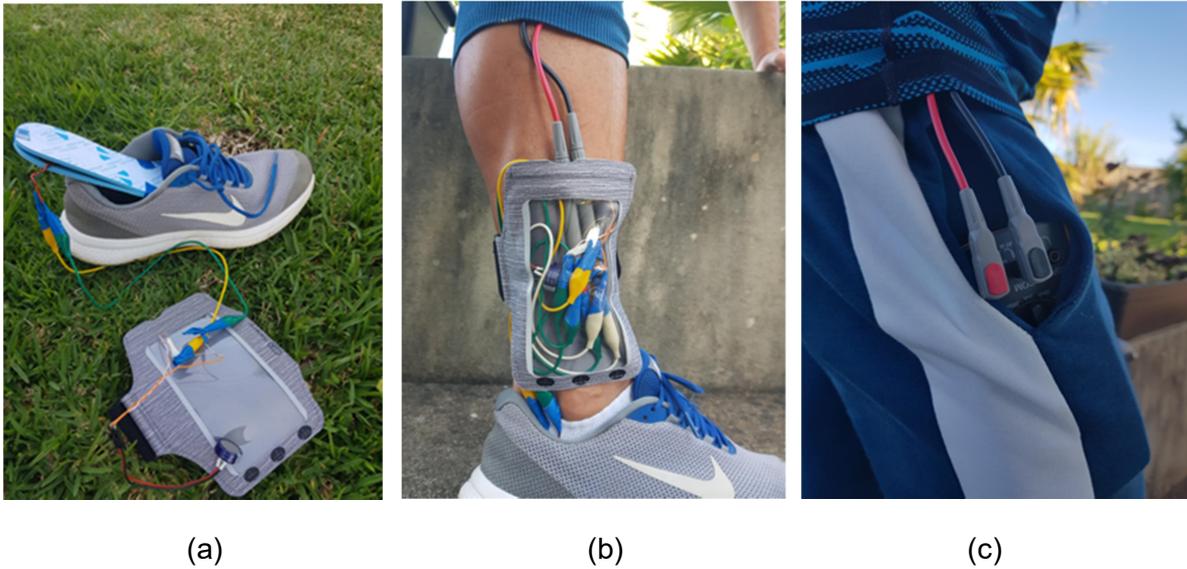


Figura 4: (a) Colocação dos piezoelétricos na sapatilha, (b) Fixação à perna, (c) Multímetro colocado no bolso.

Foi medido o valor de 3,53 V (RMS), à saída da associação paralelo dos piezoelétricos.

Para análise da aceleração do movimento, foi considerado o eixo do y, uma vez que a atuação da força exercida pelo passo nos piezoelétricos se verifica na sua perpendicular, coincidindo assim com o eixo do y. Nas figuras 5, 6, 7, 8, 9 e 10, temos os gráficos das amplitudes da aceleração e espectros de frequência para os 3 eixos (x, y, z).

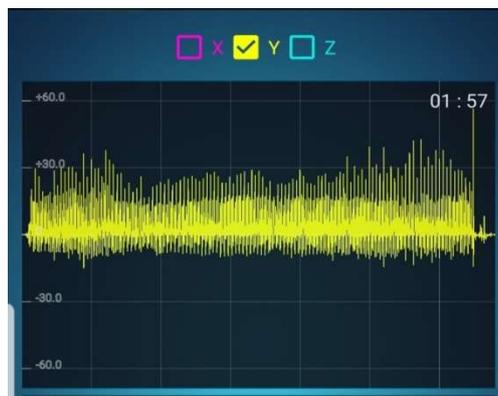


Figura 5: Amplitude da aceleração segundo o eixo do y.

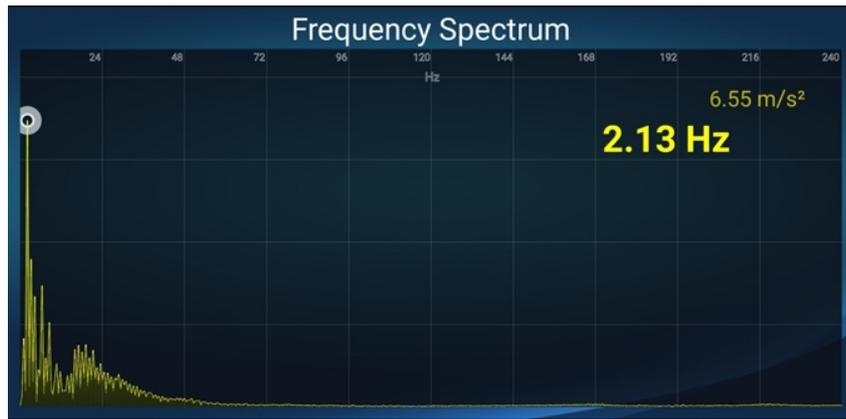


Figura 6: Espectro de frequência segundo o eixo do y.



Figura 7: Amplitude da aceleração segundo o eixo do x.

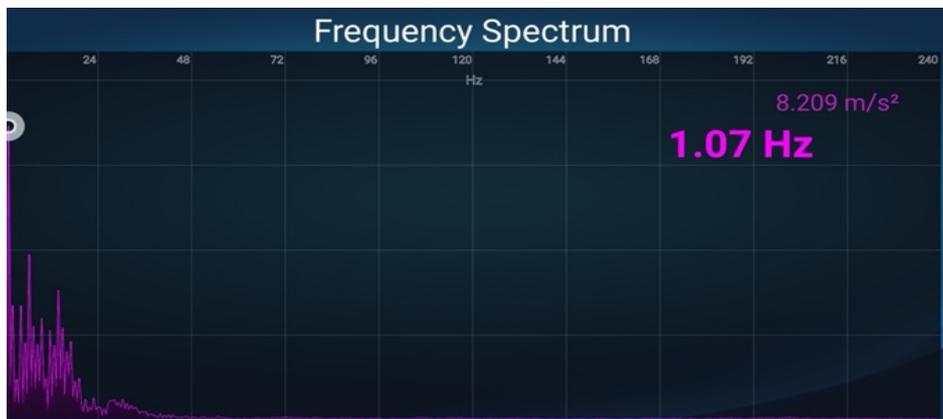


Figura 8: Espectro de frequência segundo o eixo do x.



Figura 9: Amplitude da aceleração segundo o eixo do z.

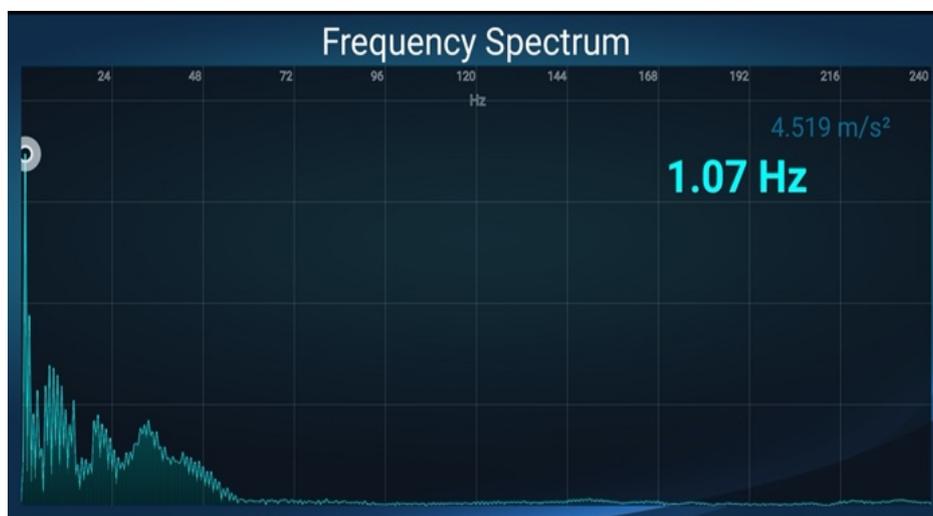


Figura 10: Espectro de frequência segundo o eixo do z.

Na tabela 1, temos os valores de amplitude máxima da aceleração segundo cada um dos eixos, assim como o valor RMS da aceleração.

Tabela 1: Espectro de frequência segundo o eixo do z.

| Eixo | Amplitude máxima da aceleração (m/s^2) | RMS (m/s^2) |
|------|--|-----------------|
| X | 43,614 | 10,097 |
| Y | 56,475 | 7,488 |
| Z | 33,391 | 5,731 |

Na tabela 2, temos a energia captada em função da distância percorrida.

Tabela 2: Tabela com nº de passos vs tensão no supercondensador.

| Nº de passos | Distância percorrida (m) | Tensão no supercondensador (mV) | Energia acumulada (Ws) |
|--------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 3.000 | 2.129 | 32,1 | 0,0005 |
| 6.000 | 4.258 | 54,1 | 0,0014 |
| 9.000 | 6.387 | 75,4 | 0,0028 |
| 12.000 | 8.516 | 93,2 | 0,0043 |

Velocidade média: 1,5 m/s;

Tempo total: 1h35.

Energia que em média é necessária para carregar um telemóvel: 4,7 Wh = 16.920 Ws.

Conclusão: Se cada passo fornecer $0,043 \text{ Ws}/12.000 = 0,36 \mu\text{Ws}$, necessitaríamos de cerca de 47.000.000.000 passos para a carga completa do telemóvel.

Experiência nº2: Captação de energia de vibrações do passo humano com transdutores piezoelétricos associados em série

Com utilização dos seguintes componentes:

4 Transdutores piezoelétricos Buzz35, em série;

4 Díodos, em ponte, 1N4001;

1 Condensador, 47 μ F, 16 V.

Montagem em circuito aberto

Tensão aplicada à ventoinha: 4,5 V

Nas figuras 11 e 12 é visível a preparação dos piezoelétricos.

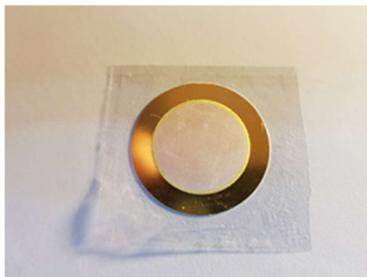


Figura 11: Colocação de uma camada isolante sob o piezoelétrico.

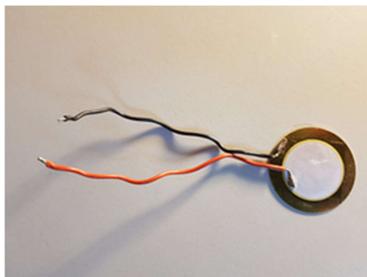


Figura 12: Contactos soldados ao piezoelétrico.

O eixo z considerado na obtenção do espectro de frequência, é perpendicular à superfície plana do piezoelétrico.

Nas figuras 13, 14, 15 e 16, podemos ver a montagem do 1º piezoelétrico sobre a régua que serve de suporte, com a ventoinha instalada no lado superior do mesmo (ventoinha desequilibrada), podemos ver o sistema em operação, a tensão à saída do piezoelétrico e o espectro de frequência do sistema segundo o eixo z.

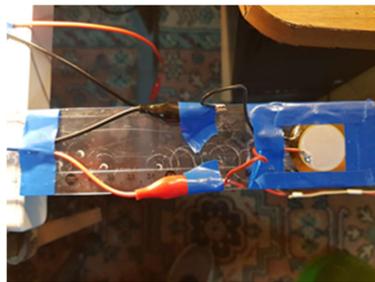


Figura 13 Colocação do 1º piezoelétrico sobre o suporte.



Figura 14: Sistema em operação com um piezoelétrico.

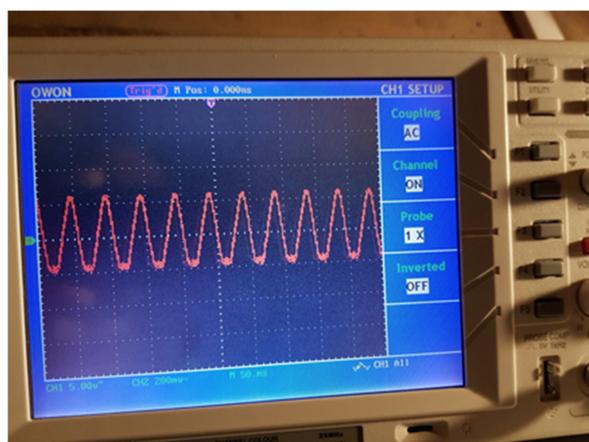


Figura 15: Tensão de saída com um piezoelétrico.

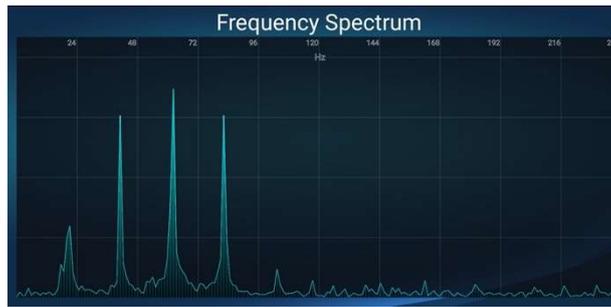


Figura 16: Espectro de frequência segundo o eixo z, para um piezoelétrico.

Nas figuras 17 e 18 podemos ver a montagem do 2º piezoelétrico sobre a régua que serve de suporte e o espectro de frequência do sistema.

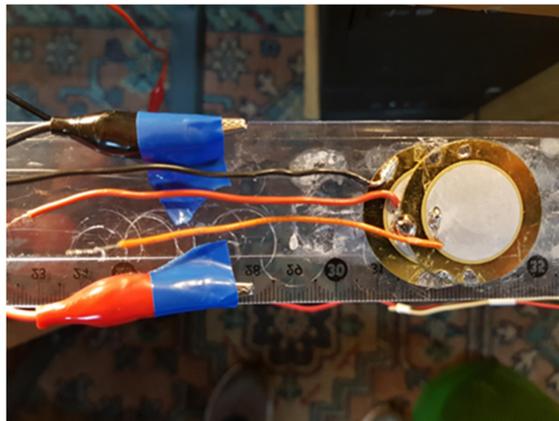


Figura 17: Montagem do 2º piezoelétrico em série.

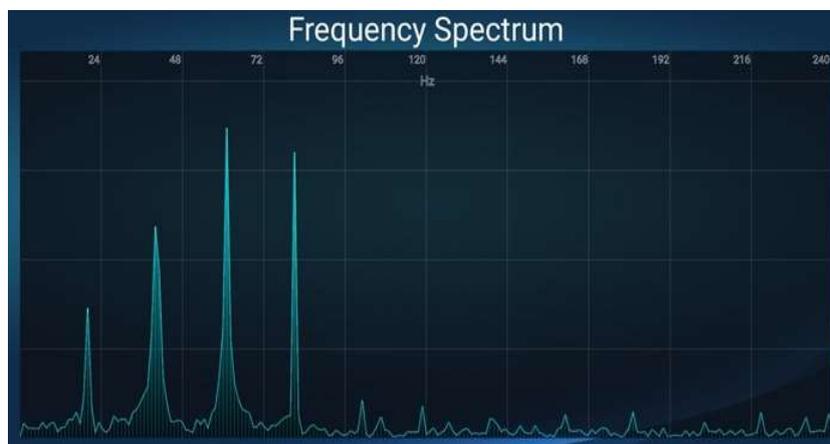


Figura 18: Espectro de frequência, segundo o eixo z, para os dois piezoelétricos.

Nas figuras 19 e 20 podemos ver a montagem do 3º piezoelétrico sobre a régua que serve de suporte e o espectro de frequência do sistema.

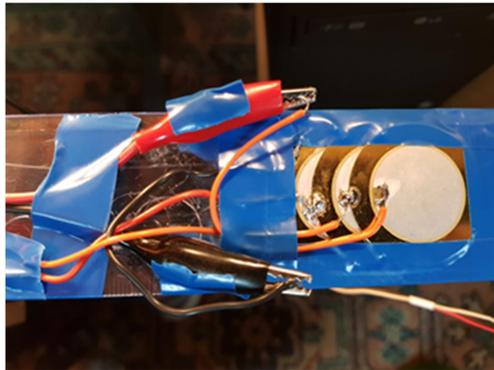


Figura 19: Montagem do 3º piezoelétrico em série.

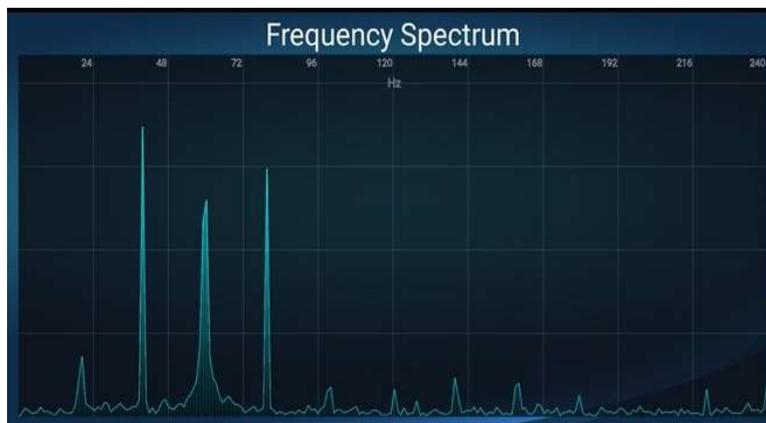


Figura 20: Espectro de frequência do sistema, segundo o eixo z, para os três piezoelétricos.

Nas figuras 21 e 22 podemos ver a montagem do 4º piezoelétrico sobre a régua que serve de suporte e o espectro de frequência do sistema.

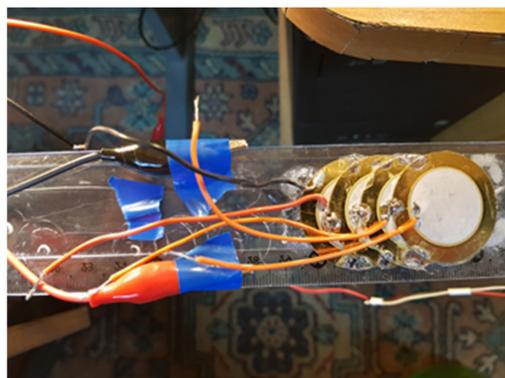


Figura 23: Montagem do 4º piezoelétrico em série.

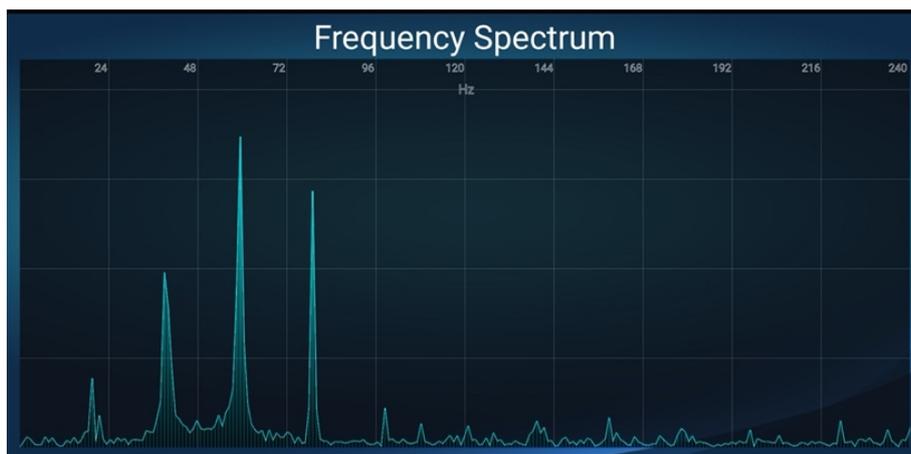


Figura 22: Espectro de frequência do sistema, segundo o eixo z, para os quatro piezoelétricos.

Na tabela 3 temos o valor da tensão de saída em função do nº de piezoelétricos instalados.

Tabela 3: Tensão de saída versus nº de piezoelétricos.

| Nº de piezoelétricos | Frequência de vibração do suporte (Hz) | | | Tensão de saída (V) |
|----------------------|--|--------|--------|---------------------|
| | Eixo x | Eixo Y | Eixo Z | |
| 1 | 21,1 | 21,1 | 62,2 | 6 |
| 2 | 20 | 20 | 61,4 | 7 |
| 3 | 19,4 | 20,4 | 60,2 | 8 |
| 4 | 19,5 | 19,5 | 59,5 | 16 |

O aumento do valor da tensão à saída (16 V), depois da instalação do 4º piezoelétrico, está relacionado com o aproximar da frequência de ressonância do sistema.

Experiência nº3: Captação de energia das vibrações do passo humano com o transdutor eletromagnético

Com utilização dos seguintes componentes:

1 Transdutor eletromagnético (marca branca);

1 Ponte de díodos, DI100, 4219 PEC;

1 Supercondensador, 1 F, 5,5 V.

Montagem:

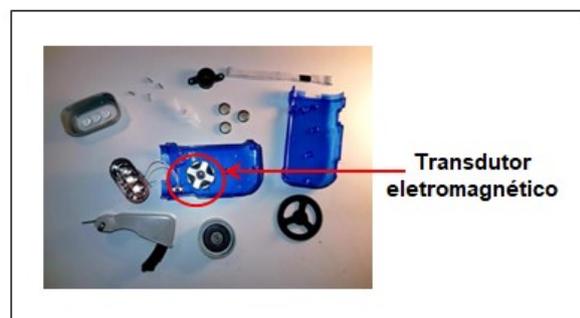
Nas figuras 23 e 24 (a) e (b), podemos ver a ponte retificadora utilizada e a localização do transdutor eletromagnético no dispositivo utilizado.



Figura 23: Ponte retificadora.



(a)



(b)

Figura 24 (a) e (b): Transdutor eletromagnético utilizado.

Preparação do suporte do transdutor eletromagnético

Nas figuras 25 (a), (b) e (c), temos várias vistas da montagem do transdutor eletromagnético numa peça de calçado.

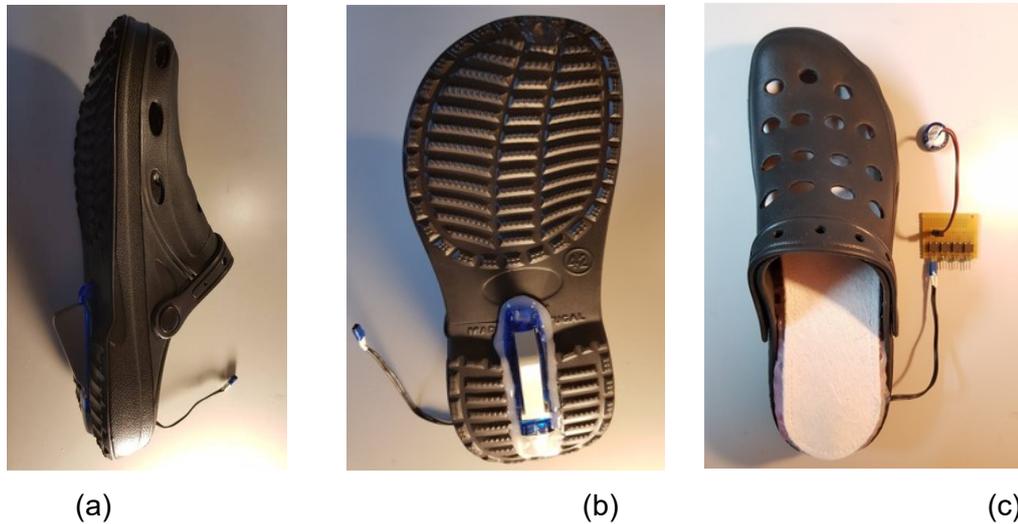


Figura 39 (a), (b) e (c): Preparação do suporte para o transdutor eletromagnético.

Na figura 26, temos a evolução da tensão do supercondensador ao longo de 20 min.

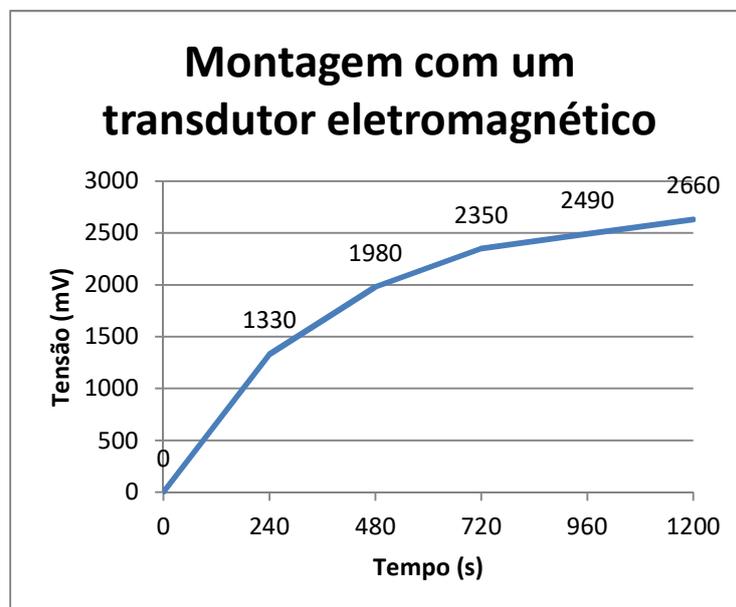


Figura 26: Evolução da tensão do supercondensador com utilização de um transdutor eletromagnético na montagem com o suporte (calçado).

A energia armazenada no supercondensador:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} (2,66)^2 = 3,54 \text{ Ws.}$$

Valores de saída do transdutor eletromagnético:

Corrente máxima = 50 mA.

Tensão máxima = 1,5 V.

Daqui resulta na potência máxima à saída = 75 mW.