



**Recolha de Energia Cinéticas das Vibrações
Mecânicas em Tubulações de Água**
Versão final após a defesa

Swellson Enward Barbosa Gomes Buché

Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor António Eduardo Vitória do Espírito Santo

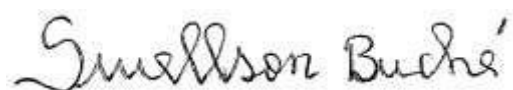
janeiro de 2023

Declaração de Integridade

Eu, Swellson Enward Barbosa Gomes Buché, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição m10891 de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o Código de Integridade da Universidade da Beira Interior.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referência de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 13/01/2023

Handwritten signature of Swellson Buché in black ink.

Agradecimentos

A presente dissertação marca assim o fim de um longo e árduo percurso académico, este percurso não foi fácil, contei com apoios indispensáveis para chegar a esta fase, estou grato por o todo apoio recebido, correndo o risco de injustamente não mencionar alguns dos nomes, quero deixar expresso os meus agradecimentos:

Ao orientador desta dissertação o Doutor Professor Doutor António Eduardo Vitória do Espírito Santo, pela orientação prestada, pelo seu incentivo, disponibilidade e apoio que sempre demonstrou. Aqui lhe exprimo a minha gratidão.

Não poderia deixar de agradecer à minha família por todo o apoio económico, os meus pais, Pedro Gomes Buché e Janine Annett Gomes Barbosa, pela força e pelo carinho que sempre me prestaram ao longo de toda a minha vida académica, bem como, à elaboração da presente dissertação à qual sem apoio deles teria sido impossível.

A todos os amigos e colegas que de uma forma direta ou indireta, contribuíram, na elaboração desta dissertação, pela paciência, atenção e força que prestaram em momentos difíceis.

A Jorge Ramos e sua família, que têm sido uma segunda família para mim aqui na Covilhã, agradeço imenso.

O meu sincero obrigado a todos.

Resumo

Energy Harvesting é o processo de recolha e conversão de energia cinética presente no meio ambiente, para esta dissertação, o objetivo principal é aproveitar a energia disponível nas tubulações de água. Usando um transdutor para converter a energia cinética das vibrações para gerar energia elétrica, originada pela passagem de água na tubulação. Um setup experimental recorre a um Woffler para gerar vibração e fazer os testes práticos. Um transdutor piezoelétrico permite converter a energia das vibrações em energia elétrica. A *Energy Harvesting Multi-Source Demo Board, Demo Circuit DC2080A*, em particular o circuito *LTC3588-1*, contém uma ponte de retificação de onda completa e um conversor DC/DC buck. A ferramenta Node-red foi importante na implementação dos testes iniciais e monitoramento do comportamento da corrente, tensão e potência geradas. O Mbed-NXP LPC1768 foi utilizado para fazer comunicações entre o Node-red e o sistema montado, o integrado ADXL345 foi o acelerómetro para medir a aceleração do transdutor. O sistema deve ser capaz de fazer recolha da energia cinética das vibrações, convertê-la e disponibilizar para o uso de baixa potência, que nesse caso é um sistema para monitoramento da tubulação de água, fornecendo informações como qualidade da água, pressão com que a água passa pelas tubulações, possíveis furos na tubulação.

Palavras-chave

Redes de sensores sem fio, Energy harvest, transdutor piezoelétrico, transdutor eletromecânico, Node-red, Conversor AC/DC.

Abstract

Energy Harvesting is the process of collecting and converting kinetic energy present in the environment, for this dissertation, the main objective is to take advantage of the energy available in water pipes. Using a transducer to convert the kinetic energy of vibrations to generate electrical energy, originated by the passage of water in the pipe. An experimental setup uses a Woffler to generate vibration and carry out practical tests. A piezoelectric transducer allows you to convert vibration energy into electrical energy. The *Energy Harvesting Multi-Source Demo Board, Demo Circuit DC2080A*, in particular the *LTC3588-1* circuit, contains a full-wave rectification bridge and a DC/DC buck converter. The Node-red tool was important in implementing the initial tests and monitoring the behavior of the current, voltage and power generated. The Mbed-NXP LPC1768 was used to make communications between the Node-red and the assembled system, the integrated ADXL345 was the accelerometer to measure the transducer acceleration. The system must be able to collect the kinetic energy of vibrations, convert it and make it available for low power use, which in this case is a system for monitoring the water pipe, providing information such as water quality, pressure at which the water passes through the pipes, possible holes in the pipe.

Keywords

Wireless sensor networks, Energy harvest, piezoelectric transducer, electromechanical transducer, Node-red, AC/DC Converter.

Índice

Declaração de Integridade	iii
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	ix
Lista de Figuras.....	xiv
Lista de Tabelas	xviii
Lista de Acrónimos	xx
Nomenclatura	xxi
1. Introdução	1
1.1. Motivação e enquadramento para o trabalho	1
1.2. Objetivos principais	2
1.3. Estrutura e organização da documentação	2
2. Conversão de energia mecânica das vibrações	5
2.1. Indução de vibrações em tubulações de água	5
2.1.1. Recolha de energia cinética das vibrações induzida pelo fluxo.....	5
2.1.1.1. <i>Vibrações induzidas por vórtices (VIVs)</i>	6
2.1.1.2. <i>Buffeting</i>	7
2.1.1.3. <i>Galloping</i>	7
2.1.1.4. <i>Flutter</i>	8
2.2. Efeito eletromagnético	9
2.2.1. Dispositivos ressonantes e não ressonantes	9
2.2.2. Transdutor eletromecânico	10
2.2.3. Subsistema Mecânico.....	11
2.2.4. Subsistema eletromagnético	13
2.3. Efeito piezoelétrico.....	14
2.3.1. Ferroeletricidade.....	15
2.3.2. Piezoeletricidade	16
2.3.2.1. Relação matemática da conversão direta e indireta.....	18
2.3.2.2. Coeficientes de acoplamento k.....	18
2.3.3. Polarização	19
2.4. Exemplos de aplicação	20
2.4.1. Pneus capazes de gerar energia.....	21
2.4.2. Piso gerador de energia.....	21
2.4.3. Geradores piezoelétricos nos trilhos dos comboios.....	22
2.4.4. Tecnologias no mercado.....	23
3. Plataforma de Teste e Avaliação	25
3.1. Interface do usuário com Node-Red	25
3.1.1. Nós	26

3.1.2. Fluxo	26
3.1.3. Mensagens	26
3.2. Configuração experimental para vibrações	27
3.3. Medir a energia gerada com módulos transdutores	33
4. Módulo de Coleta de Energia de Vibração	39
4.1. Avaliação do conversor AC / DC.....	39
4.2. Kit Energy Harvesting Multi-Source Demo Board, Demo Circuit DC2080A ..	39
4.2.1. LTC3588-1: Módulo piezoelétrico/eletromagnético	40
5. Conclusões.....	45
5.1. Principais conquistas.....	45
5.2. Trabalhos futuros	46
Referências Bibliográfias.....	48

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Esquema de um dispositivo piezoelétrico de recolha de energia eólica VIV.....	7
Figura 2.2 - Esquema de um coletor de energia piezoelétrico buffeting.....	7
Figura 2.3 - Esquema de um coletor de energia piezoelétrico galloping.....	8
Figura 2.4 - Esquema de um coletor de energia piezoelétrico baseado em flutter	8
Figura 2.5 - Esquema de um gerador piezoelétrico com frequência de ressonância ajustável.....	10
Figura 2.6 – Exemplo de um transdutor eletromagnético	11
Figura 2.7 - a) Sistema massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade, b) Diagrama de corpo livre dinâmico associado às oscilações da força da mola F_s e de amortecimento F_d	11
Figura 2.8 - Representação do circuito diagrama do transdutor eletromagnético	14
Figura 2.9 - Curva de histerese específica de um material ferroelétrico	15
Figura 2.10 - Aspeto geral da permissividade dielétrica na transição de fase.....	16
Figura 2.11 – Pierre e Jacques Currie.....	16
Figura 2.12 – Efeito direto - geração de eletricidade em resposta à pressão mecânica aplicada ao cristal piezoelétrico (vibrações e toques)	17
Figura 2.13 – Efeito indireto - deformação do cristal piezoelétrico em resposta à diferença de potencial aplicada.....	18
Figura 14 – Domínio de Weiss para cerâmicas piezoelétricas: a) Sem aplicação do campo elétrico; b) Com aplicação de campo elétrico; c) Após a aplicação de um campo elétrico.....	19
Figura 2.15 – Representação do circuito de geração piezoelétrico: a) Fonte de corrente; b) Transformação em fonte de tensão para análise	20
Figura 2.16 - Nano geradores piezoelétricos dentro do pneu.....	21

Figura 2.17 - Placa geradora de energia, efeito piezoelétrico.....	22
Figura 2.18 - IPED PAD	22
Figura 3.1 – Editor Node-Red.....	25
Figura 3.2 – Tipos de nós básicos	26
Figura 3.3 – Esquema para o ensaio experimental	27
Figura 3.4 – Pinout-Mbed-NXP LPC1768	28
Figura 3.5 - INA- 219	29
Figura 3.6 – Implementação Node-Red, leitura de corrente, tensão e potência.....	29
Figura 3.7 – Pinout ADXL 345	29
Figura 3.8 – Implementação Node-Red, leitura de corrente, tensão e potência, e a aceleração nos três eixos.....	30
Figura 3.9 - Esquemático do transdutor piezoelétrico – viga piezoelétrica	32
Figura 3.10 – Instalação experimental necessária: 1) Transdutor piezoelétrico; 2) Kit Energy Harvesting Multi-Source Demo Board, Demo Circuit DC2080A; 3) Osciloscópio; 4) Woffer; 5) Gerador de sinais; 6) Amplificador de sinais	33
Figura 3.11 – Relação entre a tensão e corrente para a frequência de excitação de 15 Hz.....	34
Figura 3.12 – Relação entre a corrente e a potência gerada para a frequência de excitação de 15 Hz.....	34
Figura 3.13 – Relação entre a tensão e a corrente para a frequência de excitação de 20 Hz.....	35
Figura 3.14 – Relação entre a corrente e a potência gerada para a frequência de excitação de 20 Hz.....	35
Figura 3.15 – Relação entre a tensão e a corrente para a frequência de excitação de 25Hz.....	35

Figura 3.16 – Relação entre a corrente e a potência gerada para a frequência de excitação de 25Hz.....	36
Figura 4.1 - Esquema do processo de conversão, regulação da tensão e armazenamento da energia gerada pelo transdutor	39
Figura 4.2 - Placa Demo Circuit DC2080	40
Figura 4.3 - Diagrama de blocos LTC3588-1	40
Figura 4.4 – Tensão alternada gerada pelo transdutor piezoelétrico.....	42
Figura 4.5 – Carregamento de condensadores, tensão no banco de condensadores (VMCU) aproximadamente 3.3 V.....	43

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Densidades de potência dos métodos de Energy Harvesting.....	2
Tabela 2.1 - Constantes para alguns materiais	19
Tabela 2.2 – Tabela de tecnologias disponíveis no mercado	23
Tabela 3.1 - Especificações do transdutor piezoelétrico EH220-A4-503YB	32
Tabela 3.2 – Resumo da relação frequência, resistência, tensão, corrente e potência.....	34
Tabela 4.1 - Seleção de tensão de saída através de D0 e D1	42
Tabela 5.1 – Resumo da relação frequência, resistência, tensão, corrente e potência ...	45

Lista de Acrónimos

EH	<i>Energy Harvest</i>
DC	Corrente contínua
AC	Corrente alternada
VIVs	Vibração Induzida por Vórtices
FIVs	Vibrações Induzidas por Fluxo
IoT	<i>Internet of Things</i>
RSSF	Redes de sensores sem fio
VIVEHs	Energia Harvest de Vibrações Induzida por Vórtices
fem	<i>Força eletromotriz</i>
API	Interface de programação de aplicações
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
PZT	Titanato zirconato de chumbo

Nomenclatura

\vec{F}_R	Força resultante [N];
m	Massa de um corpo [Kg];
a	Aceleração [m/s ²];
\vec{F}_s	Oscilações de força associada à mola [N];
\vec{F}_d	Oscilações de força associada ao amortecimento [N];
k	Constante elástica da mola [N/m];
x	Posição da mola em suspensão [m];
y	Variação da posição interior da mola [m];
d	Fator de amortecimento;
\dot{x}	Primeira derivada da posição da massa em suspensão [m/s];
\dot{y}	Primeira derivada da posição inferior da mola [m];
\ddot{x}	Segunda derivada da posição da massa em suspensão [m/s ²];
\dot{z}	Primeira derivada da posição z (velocidade) [m/s];
\ddot{z}	Segunda derivada da posição z (velocidade) [m/s ²];
\ddot{y}	Segunda derivada da posição inferior da mola [m];
y(t)	Excitação sinusoidal [m];
ξ_m	Fator de amortecimento;
D	Campo de deslocamento elétrico [C/m ²];
δ	Deformação mecânica do material [m ² /N];
d	Constante de carga piezoelétrica [C/N];
σ	Tensão mecânica por unidade de área [N/m ²];
E	Campo elétrico aplicado [N/C];
ϵ	Constante da permissividade elétrica do material [F/m];
y	Rigidez do material piezoelétrico [Pa];
I _p	Corrente gerada pelo deslocamento das cargas [A];
C _p	Capacidade dos elétrodos do transdutor piezoelétrico [F];
R _p	Resistência interna [Ω];
R _d	Resistência de perda associado ao material piezoelétrico [Ω];
Voc	Tensão gerada no circuito aberto [V];

1. Introdução

1.1. Motivação e enquadramento para o trabalho

Energy Harvest EH (também conhecido como a recolha de energia do ambiente) é o processo pelo qual a energia é derivada a partir de fontes externas, por exemplo, energia solar, energia térmica, energia eólica e energia cinética, recolhendo e armazenando a energia produzida para o uso de pequenos dispositivos autônomos sem fio, como aqueles utilizados em dispositivos eletrônicos e redes de sensores sem fio (RSSF).

Nos últimos anos tem-se notado um enorme crescimento no uso de dispositivos de baixo custo, com aplicações em *internet das coisas* (IoT), rede de sensores sem fio, o que direcionou as investigações para as técnicas de recolha de *Energia Harvesting*, para assim de uma forma eficiente poder substituir as tradicionais baterias ou conexão com fio.

As redes de sensores sem fio são construídas por um conjunto de pequenos sensores que, a partir do local onde são inseridos, permitem uma recolha de informações do meio. Estes sensores podem ser aplicados em diversas áreas, como por exemplo: Militares, na deteção de movimentos inimigos ou na presença de materiais perigosos, meteorológica, na deteção de catástrofes naturais, indústria, na monitorização de equipamentos, ou, na medicina, para aquisição de parâmetros biométricos. Como todos estes sistemas precisam de uma fonte de alimentação para o seu funcionamento, normalmente usam-se baterias, mas também por outro lado, as baterias acarretam um problema que é o tempo limitado de vida útil, o que requer uma substituição periódica, esta ação com certeza conta com custos de manutenção, sem esquecer que as baterias podem estar em lugares de difícil acesso físico, o que não ajuda muito no processo da sua substituição.

Mas, este trabalho foca-se, essencialmente, na energia cinética mais especificamente nas vibrações nas tubulações de água, aproveitando a vibração gerada pela passagem de água nas tubulações.

A EH vem satisfazer algumas das necessidades energéticas, sendo uma fonte de energia alternativa e sustentável. No meio ambiente existem, de forma comum, quatro fontes de energia:

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

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

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

Tabela 1.1 - Densidades de potência dos métodos de *Energy Harvesting*.

Existem vários métodos de conversão de energia cinética em energia elétrica, nesta dissertação são explorados dois métodos, nomeadamente: Piezoelétrica - que consiste em gerar energia através de uma pressão mecânica exercida em materiais cristalinos (cerâmicos, polímeros); Eletromagnética - que utiliza mecanismos baseados na lei de Faraday para produzir energia, recorrendo a um íman que oscila dentro de uma bobina.

1.2. Objetivos principais

Esta dissertação tem como objetivo projetar e implementar um sistema de recolha e conversão de energia cinética das vibrações (usando efeitos piezoelétricos e eletromagnéticos) em energia elétrica. À partida, a energia recolhida deve ser suficiente para alimentar os sensores ou a rede de sensores, dispensando assim a utilização de possíveis baterias. O sistema deve ser capaz de fazer a monitorização da tubulação de água.

1.3. Estrutura e organização da documentação

A dissertação conta com cinco (5) capítulos:

Capítulo 1 – O primeiro capítulo apresenta a motivação e realiza o enquadramento do trabalho, deixando assim uma boa noção do que se trata a dissertação e no que consiste. Também se apresentam os objetivos do trabalho desenvolvido;

Capítulo 2 – Já no segundo capítulo, descreve-se o processo de conversão da energia mecânica das vibrações em energia elétrica. São especificados dois efeitos, o efeito piezoelétrico e o efeito eletromagnético, ilustrados com exemplos de aplicações;

Capítulo 3 – No terceiro capítulo, refere-se ao processo de implementação do conversor de energia e a instalação experimental para estudar a recolha de energia cinética das vibrações;

Capítulo 4 – O capítulo 4 é dedicado ao módulo de recolha de energia das vibrações. Apresenta também uma análise do funcionamento do conversor AC/DC, da placa *Energy*

Harvesting Multi-Source Demo Board, Demo Circuit DC2080A e em particular o circuito LTC3588-1;

Capítulo 5 – Por fim, o último capítulo, descreve as conclusões do trabalho. Aqui foi feita a interpretação dos resultados obtidos, assim como, o que penso fazer como trabalhos futuros para dar seguimento ao estudo realizado.

2. Conversão de energia mecânica das vibrações

2.1. Indução de vibrações em tubulações de água

Nos últimos tempos, como referido na introdução do trabalho, fazer a recolha da energia do ambiente (térmicas, vibrações,...) tornou-se um assunto com muito interesse, não só por causa da redução dos custos no consumo de energia, mais também pela simplicidade em termos logísticos. Instalar um sistema de recolha de energia no ambiente num lugar de difícil acesso físico eliminaria muitos custos na manutenção desse mesmo sistema. Esta dissertação tem como objetivo projetar um sistema de recolha e conversão de energia através de indução de vibrações em tubulações de água, aproveitando essa energia convertida para alimentar os sensores que vão monitorizar as tubulações de água, fornecendo informações como a pressão da água que passa pela tubulação, possíveis furos na tubulação, qualidade da água e possíveis danos provocados pela vibração nas tubulações.

As tubulações de distribuição de água podem ser utilizadas para produzir energia. Num sistema bem projetado, é possível induzir vibrações dentro da tubulação de água. Usando um transdutor, esta energia cinética das vibrações pode ser convertida em energia elétrica [1]. No entanto, esses tipos de dispositivos geralmente são acionados por fontes de alimentação externas tradicionais, considerando o alto custo de infraestrutura para fontes de alimentação tradicionais e a perda de energia correspondente no processo de transmissão de energia de longa distância, é essencial desenvolver sensores autoalimentados.

2.1.1. Recolha de energia cinética das vibrações induzida pelo fluxo

Um coletor de energia cinética das *vibrações induzidas por fluxo* (FIV) é um dispositivo projetado para fazer a recolha das vibrações imposta por um fluxo, este dispositivo é capaz de fazer recolha de energia do ambiente para fornecer energia para alimentação de um sistema.

FIV é um fenómeno físico muito comum no campo da engenharia que é causada por instabilidade aerodinâmica ou desprendimento de vórtices quando o fluido passa em torno de uma estrutura. De acordo com diferentes mecanismos de conversão de energia, o coletor de energia de vibrações induzidas por fluxo comum, pode ser dividido em eletromagnético, piezoelétrico, eletrostático, dielétrico e triboelétrico.

As FIV para recolha de energia podem ser divididos em quatro categorias:

- *Vibrações induzidas por vórtices (VIV)*
- *Flutter*
- *Galloping*

➤ *Buffeting*

VIV e o *Buffeting* pertencem a uma família de vibrações forçadas. As FIV são projetadas para operar normalmente em baixas velocidades de fluxo, mas a sua largura de banda de trabalho é limitada pela frequência natural da estrutura. *Galloping* e *flutter* pertencem a uma família do ciclo limitado de vibrações, a velocidade de ativação neste grupo é maior e a faixa de velocidade de operação efetiva é mais ampla, levando a uma amplitude de resposta maior sob uma velocidade de vento mais alta, o que é benéfico para a recolha de energia.

2.1.1.1. Vibrações induzidas por vórtices (VIV)

O fenómeno VIV advém de flutuações do campo de pressões ao redor de corpos rombudos, ocasionadas pela emissão de vórtices com a incidência de escoamento do fluido. Para visualizar este fenómeno pode-se colocar um pequeno cano de plástico na água e movimentá-lo em direção perpendicular ao seu eixo de longitude. A uma determinada velocidade, oscilações transversais ao escoamento serão observadas [2]. As VIV estão intimamente relacionados a uma velocidade de fluxo e estruturas do corpo rombudo. Vórtice ocorre periodicamente na esteira atrás do corpo rombudo.

Atrás do corpo rombudo, o vórtice derramado gera um campo de pressão assimétrico ao seu redor, então este corpo será submetido a forças aerodinâmicas alternadas, resultando assim em uma amplitude finita de vibrações [3]. A eficiência do coletor de energia de vibrações induzidas por vórtices é maior quando trabalha dentro da região de frequência de bloqueio, o que acontece quando a frequência de desprendimento de vórtices das VIV se aproxima da frequência natural da estrutura.

Quando a velocidade do fluxo de entrada excede a faixa de velocidade correspondente, as vibrações estarão fora da região adequada de operação, e a sua amplitude diminui significativamente, bem como a eficiência da recolha de energia. Para contornar esse problema, a largura da região de frequência de bloqueio é aumentada, o que pode ser feito pelo aumento da razão comprimento-largura do cilindro, o que vai aumentar a amplitude de resposta do mesmo, mas também amplia a região de frequência de bloqueio das VIV.

O campo de fluxo causado pelos vórtices pode ser estimado usando velocimetria por imagem de partículas, este é um método ótico que permite a visualização e a análise do movimento de partículas em fluidos. Os dispositivos de *recolha de energia de vibrações induzidas por vórtices* (VIVEH) mais comuns incluem um cilindro combinado com uma estrutura de conversão de energia, mostrado na figura 2.1.

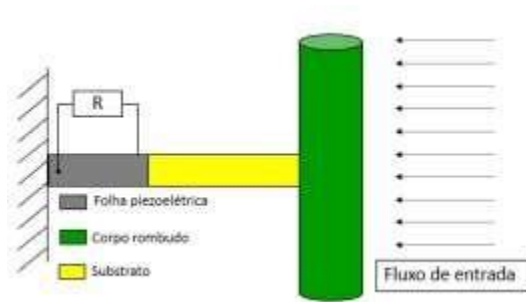


Figura 2.1 - Esquema de um dispositivo piezoelétrico de recolha de energia eólica VIV.

2.1.1.2. *Buffeting*

Buffeting é um processo de vibração periódica que é causada pela turbulência natural, geralmente ocorre em ambientes instáveis, campos de fluxo. O mecanismo *Buffeting* é semelhante ao das VIV, a magnitude da força do fluido é independente do movimento da estrutura e a frequência de ressonância é afetada pela frequência natural da estrutura [3]. Para coletores de energia *Buffeting*, existem dois cilindros: Um ligado à estrutura de recolha, enquanto o outro é colocado na frente da estrutura como se pode ver na figura 2.2. A distância entre os dois cilindros tem uma influência significativa no desempenho da recolha de energia [4].

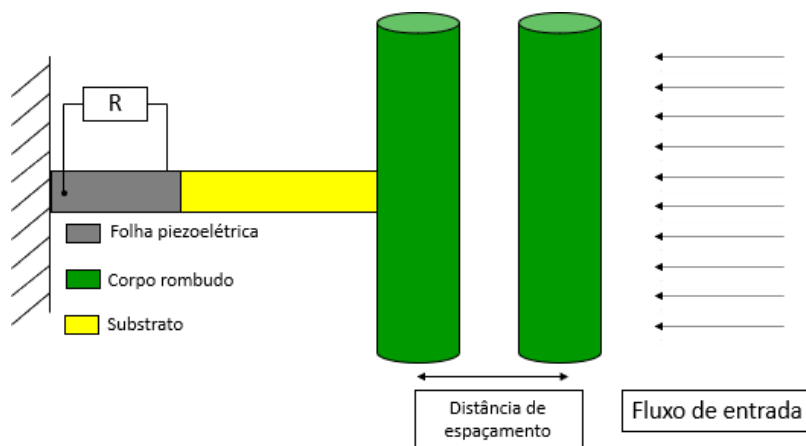


Figura 2.2 - Esquema de um coletor de energia piezoelétrico *buffeting*.

2.1.1.3. *Galloping*

Galloping é uma vibração auto-excitada semelhante à *flutter*. A diferença entre o *galloping* e *flutter* é que o *Galloping* tem um movimento de vibração de um grau de liberdade, enquanto o *flutter* tem dois graus de liberdade de movimento de vibração[4]. O *galloping* é um fenómeno de vibrações autoexcitadas, causadas pela instabilidade aeroelástica, que ocorre em estruturas com arestas e cantos. Normalmente está relacionado com a velocidade do fluxo de entrada e a orientação relativa do fluido no que diz respeito à estrutura. Geralmente caracterizada por oscilações de baixa frequência e alta amplitude [3].

Para um coletor de energia *galloping*, um corpo rombudo prismático é anexado ao final da estrutura de recolha de energia, indicado na figura 2.3.

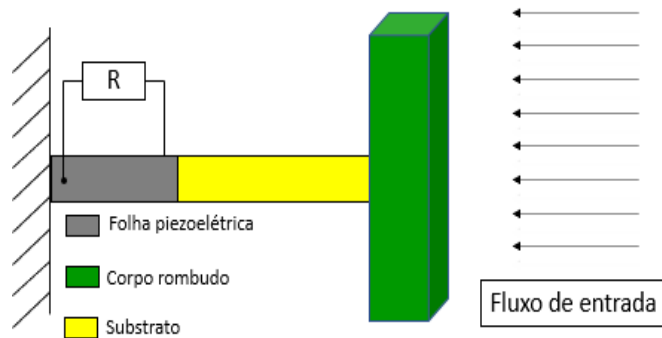


Figura 2.3 - Esquema de um coletor de energia piezoelétrico *galloping*.

2.1.1.4. *Flutter*

Flutter é uma instabilidade aeroelástica que envolve dois graus de liberdade, um no sentido de flexão e outro no sentido de torção. É uma vibração auto-alimentada e possivelmente destrutiva, onde as forças aerodinâmicas de um objeto se acoplam com o modo natural de vibração de uma estrutura para produzir movimento periódico rápido. Se a energia durante o período de excitação aerodinâmica for maior que o amortecimento natural do sistema, o nível de vibração aumentará. Desta forma, os níveis de vibração podem aumentar, e são limitados quando o amortecimento aerodinâmico ou mecânico do objeto corresponde à entrada de energia [5]. Para um coletor de energia baseado em vibração, um aerofólio rígido (uma seção bidimensional projetada para provocar variação na direção da velocidade de um fluido) é ligado à extremidade livre da viga por uma dobradiça, exemplificado na figura 2.4.

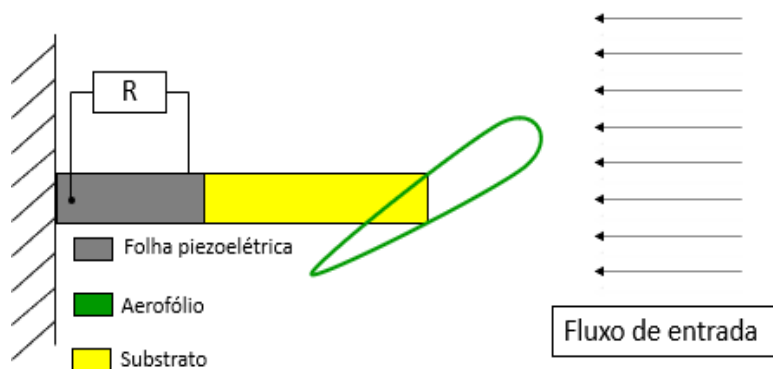


Figura 2.4 - Esquema de um coletor de energia piezoelétrico baseado em *flutter*.

2.2. Efeito eletromagnético

Este capítulo concentra-se na utilização de transdutores eletromagnéticos na recolha de energia cinética (vibração).

EH é o processo pelo qual a energia é derivada de fontes externas, uma das formas de converter essa energia mecânica em energia eléctrica é através de transdutores eletromagnéticos, na conversão dessa energia recorre-se aos seguintes modos de funcionamentos:

- Ressonantes
- Não ressonantes

A escolha do modo de funcionamento depende muito da frequência de operação. Como exemplos temos, o movimento humano que apresenta uma frequência dominante de 10 Hz, ou as oscilações numa ponte, devido à influência do vento ou à passagem de veículos, cujas oscilações podem alcançar os 80 Hz. Estas situações ilustram a necessidade de realizar uma avaliação ponderada de qual será o melhor modo de operação a utilizar: modo ressonante ou não ressonante.

Nota: É de referir que a maior parte das frequências disponíveis no meio ambiente, em geral não ultrapassam os 200 Hz.

2.2.1. Dispositivos ressonantes e não ressonantes

Como as características de vibração do ambiente (em particular a frequência) podem mudar ao longo do tempo, é necessário haver um mecanismo para sintonizar o dispositivo de recolha de energia para alterar sua frequência natural para corresponder à frequência da fonte. Existem várias técnicas através das quais a frequência de ressonância do dispositivo pode ser ajustada. As formas de alterar a frequência do dispositivo passam por alterar a massa, o comprimento ou a espessura da estrutura vibratória.

A técnica que sintoniza a frequência de ressonância do dispositivo pela aplicação de uma carga de compressão axial. A carga aplicada altera a rigidez da viga apoiada, alterando a frequência de ressonância correspondente. Embora esta técnica permite uma saída de potência eficiente em uma faixa de frequência apreciável, seria desejável a operabilidade em uma faixa de frequência mais ampla.

Vale lembrar que, enquanto técnicas ativas podem ser empregues para ajustar os dispositivos de recolha e energia, é claro que se deve considerar os requisitos de energia da sintonia ativa e as implicações correspondentes na eficiência geral do sistema de recolha de energia [6].

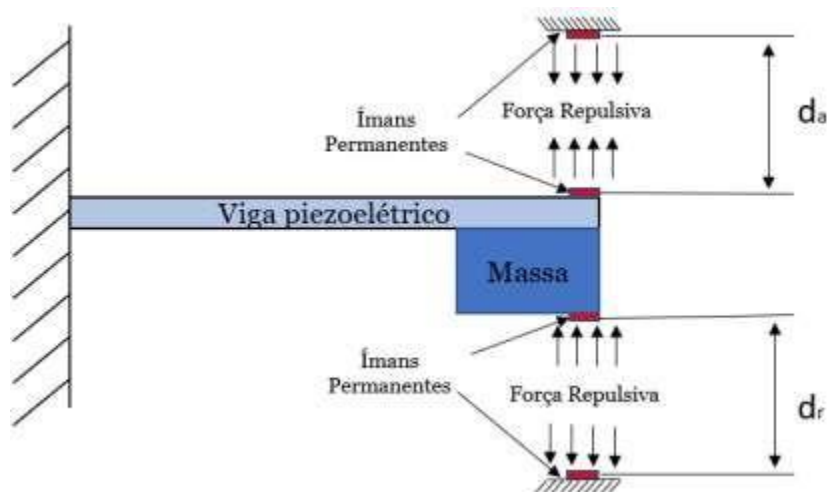


Figura 2.5 - Esquema de um gerador piezoelétrico com frequência de ressonância ajustável.

O dispositivo compreende uma viga piezoelétrica em balanço com uma massa de tungstênio em sua extremidade livre. Em virtude da propriedade piezoelétrica, a viga piezoelétrica produz energia elétrica quando submetida a tensões mecânicas induzidas por vibrações. Uma massa de ponta é usada para diminuir a frequência natural do feixe piezoelétrico e aumentar a potência de saída do dispositivo de recolha de energia. Uma aplicação potencial de tais dispositivos seria recolher energia de ambientes de baixo nível, tipicamente menores que 100 Hz.

Quatro ímãs permanentes são usados: Dois ímãs são fixados na extremidade livre do feixe da viga, enquanto os outros dois ímãs são fixados ao gabinete do dispositivo na parte superior e inferior alinhado verticalmente com os ímãs no feixe, como mostra a figura 2.5.

Para ajustar a frequência de ressonância, é utilizada uma técnica, na qual é aplicada uma força magnética no sentido perpendicular ao transdutor, varando assim a distância entre os ímãs.

Vale ressaltar que aplicando uma força magnética atrativa ou repulsiva, a frequência natural do feixe pode ser sintonizada para maior e menor frequências em relação à frequência de ressonância não sintonizada do feixe piezoelétrico [6].

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

2.2.2. Transdutor eletromecânico

Uma das formas de recolha de energia cinética das vibrações é através de transdutores eletromagnéticos de energia mostrado na figura 2.6, estes dispositivos utilizam energia armazenada em campo eletromagnético, são formados por uma bobina e um êmbolo de material ferromagnético (íman), que se desloca pelo interior da bobina. O êmbolo encontra-se ligado ao

sistema oscilatório e quando há uma oscilação no campo eletromagnético gerado pelo movimento do íman, este interage com o circuito produzindo corrente elétrica [7].

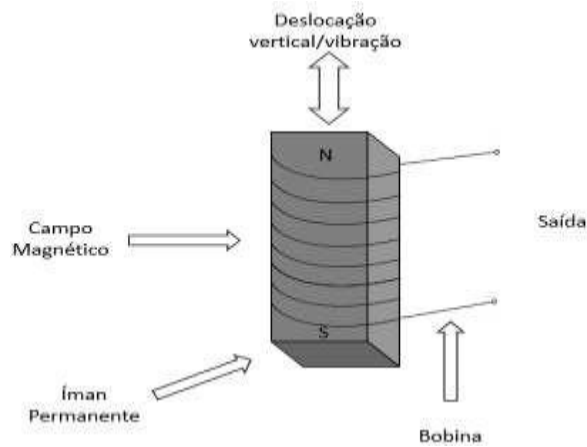


Figura 2.6 – Exemplo de um transdutor eletromagnético.

2.2.3. Subsistema Mecânico

O modelo clássico de um transdutor eletromagnético consiste em um íman permanente com massa m , uma mola com constante elástica k , um amortecedor com fator de amortecimento d e uma bobina com indutância L , como ilustrada na figura 2.7. Essa estrutura, quando excitada por uma força (neste caso uma vibração induzida), faz com que o íman se mova, obtendo assim uma certa velocidade, gerando uma interação entre íman e a bobina, o que por sua vez, causará variação do fluxo eletromagnético, que conseqüentemente gera tensão induzida.

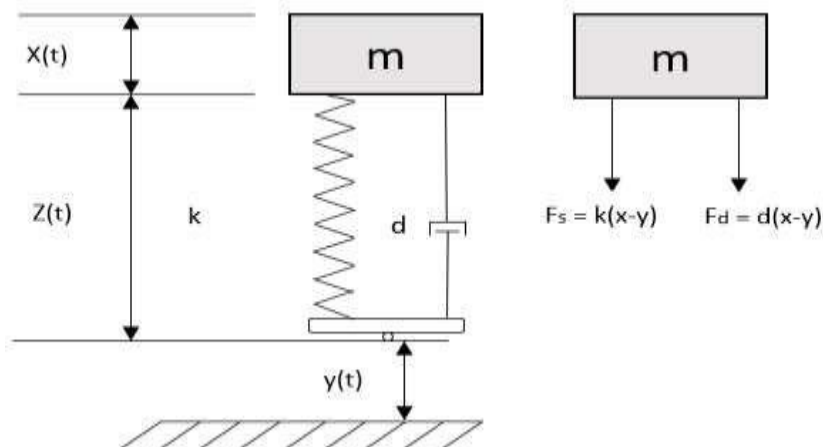


Figura 2.7 - a) Sistema massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade, b) Diagrama de corpo livre dinâmico associado às oscilações da força da mola F_s e de amortecimento F_d .

Os geradores não lineares utilizam uma mola de endurecimento, que irá influenciar a frequência de ressonância, os dispositivos de recolha de energia por vibração possuem uma largura de banda maior sobre o qual a energia pode ser recolhida, o que acontece com a mudança da

frequência de ressonância. Uma forma de ajustar a frequência de ressonância é variar a constante da mola k .

A taxa de largura de banda está relacionada com o índice de amortecimento da não linearidade. A potência de saída e a largura da banda dos geradores não lineares dependem da direção da aproximação da frequência de vibração com a frequência de ressonância.

Olhando para a segunda lei de Newton, “o somatório de todas as forças envolvidas é igual a massa vezes a aceleração”, a equação que relaciona este movimento é a seguinte, equação 2.1:

$$\vec{F}_R = m\vec{a} \Leftrightarrow -(\vec{F}_s + \vec{F}_d) = m\vec{a} \Leftrightarrow -k(x - y) - d(\dot{x} - \dot{y}) = m\ddot{x} \quad (2.1)$$

Sendo a posição da massa em suspensão definida como x e a variação da posição inferior da mola está definida como y , podemos reescrever as coordenadas relativas da seguinte maneira:

$$z = x - y \quad (2.2)$$

Aplicando primeira e a segunda derivada respectivamente, à equação 2.2 teremos:

$$\dot{z} = \dot{x} - \dot{y} \quad (2.3)$$

$$\ddot{z} = \ddot{x} - \ddot{y} \quad (2.4)$$

A equação 2.5 a seguir representa a excitação sinusoidal:

$$y(t) = Y * \sin(\omega t) \quad (2.5)$$

Y representa a amplitude das vibrações e ω é a frequência angular.

Reescrevendo a equação 2.1, verificamos que a equação 2.6 fica a seguinte:

$$-m\ddot{y} = m\ddot{z} + kz + d\dot{z} \quad (2.6)$$

Aplica-se a transformada de Laplace para passar para o domínio das frequências, e, por conseguinte, a função de transferência que ilustra o funcionamento de sistema massa-mola fica:

$$H(s) = \frac{-ms^2}{ms^2 + ds + k} = \frac{z(s)}{y(s)} \quad (2.7)$$

Logo, substituindo o $s=j\omega$, passamos a ter o seguinte:

$$H(j\omega) = \frac{-mj^2\omega^2}{mj^2\omega^2 + dj\omega + k} \quad (2.8)$$

Reorganizando juntamente com a frequência de ressonância,

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad (2.9)$$

fator de amortecimento normalizado,

$$\xi_m = \frac{d}{2m\omega_n} \quad (2.10)$$

e substituindo na função de transferência, teremos a seguinte equação:

$$H(j\omega) = \frac{-mj^2\omega_n^2}{mj^2 + 2\xi_m m\omega_n j\omega_n + \omega_n^2 m} \quad (2.11)$$

2.2.4. Subsistema eletromagnético

O princípio básico no qual quase todos os geradores eletromagnéticos se baseiam é à lei de indução eletromagnética de Faraday. Em 1831, o físico e químico britânico Michael Faraday descobriu que quando um condutor elétrico é movido através de um campo magnético, uma diferença de potencial é induzida entre as extremidades do condutor. O princípio da lei de Faraday é a seguinte, a tensão ou a *força eletromotriz (fem)* induzida em um circuito é proporcional à taxa de variação de fluxo magnético desse mesmo circuito, ou seja,

$$V = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.12)$$

Na maioria das implementações do gerador, o circuito consiste em uma bobina de fio de múltiplas voltas e o campo magnético é criado por ímanes permanentes [4]. Neste caso, a tensão induzida em uma bobina de N espiras é dada por:

$$V = - \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.13)$$

Onde Φ é a ligação de fluxo total da bobina N e pode ser aproximada como, $N\Phi$, e neste caso Φ pode ser interpretado como a ligação de fluxo médio por volta. Bem, a ligação de fluxo para uma bobina de múltiplas espiras é avaliada como o somatório das ligações para as voltas individuais:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \int_{A_i} B \cdot dA \quad (2.14)$$

Onde B é a densidade do fluxo do campo magnético, e A é a área da superfície da bobina.

A equação 2.13 que também pode ser expressa em termos da velocidade relativa entre a bobina e o íman como:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\phi}{dz} \frac{dz}{dt} = K_t \dot{z} \quad (2.15)$$

Onde o k_t representa o fator de transdução e pode ser aproximado como uma constante.

No caso onde a densidade de fluxo pode ser considerada uniforme sobre a área da bobina, a integral pode ser reduzida ao produto da área da bobina, número de voltas e o componente da densidade de fluxo normal à área da bobina [8].

Olhando para a equação 2.13, existem algumas estratégias para se obter uma maior *fem*, umas das formas é aumentar a intensidade do fluxo Φ que passa pelas espiras, por outro lado, ao aumentar a taxa de variação desse fluxo, seja pelo aumento da taxa de variação do campo eletromagnético, ou ainda pelo aumento da intensidade do campo eletromagnético.

Outra abordagem seria aumentar o número de espiras coincidentes. Neste caso, outro conceito de extrema importância para o entendimento do transdutor é a indutância, ou seja, quando variar a corrente no condutor esta tem a capacidade de induzir tensão em si mesmo.

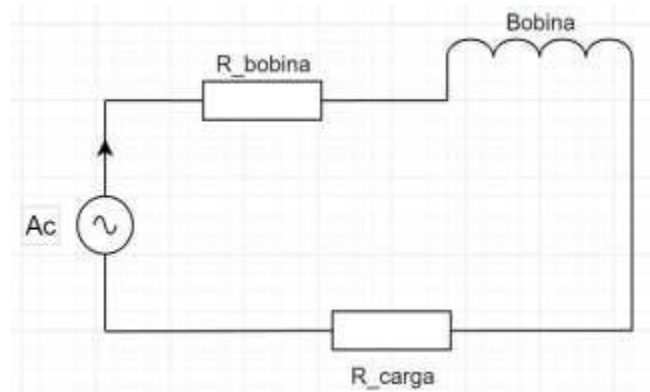


Figura 2.8 - Representação do circuito diagrama do transdutor eletromagnético.

Aplicando a lei das malhas ao circuito, a equação 2.16 que representa a tensão na carga fica a seguinte:

$$V(t) = L_{bobina} \frac{di}{dt} + (R_{carga} + R_{bobina}) * i(t) \quad (2.16)$$

Onde R_{carga} é a carga em série com a R_{bobina} , que é a resistência da bobina e L_{bobina} indutância da bobina.

2.3. Efeito piezoelétrico

Este capítulo concentra-se no uso de transdutores piezoelétricos no processo da recolha de energia cinética (vibração), desde a fase da recolha até à fase da conversão.

2.3.1. Ferroeletricidade

A ferroeletricidade é uma característica dos materiais que possuem uma polarização elétrica espontânea que pode ser revertida pela aplicação de um campo elétrico externo. Esta propriedade foi descoberta por Joseph Valasek, em 1921, estudando as propriedades dielétricas do sal de Rochelle. Os materiais que possuem propriedades ferroelétricas são de estruturas cristalinas e são dielétricos, ou seja, não conduzem corrente elétrica. O que caracteriza os materiais ferroelétricos é que eles possuem polarização espontânea em determinada faixa de temperatura e a sua polarização pode ser invertida com a aplicação de um campo elétrico externo.

Assim sendo, caracteriza-se uma cerâmica ferroelétrica pela curva de histerese. Quando um campo elétrico é aplicado ao material, os dipolos passam a orientar-se na direção do campo, permanecendo alinhados mesmo depois da retirada deste campo elétrico. Esse fenômeno denomina-se de polarização remanescente.

Quando se aplica o campo elétrico (E), a polarização aumenta ao longo do eixo E até à sua saturação, onde neste ponto, quase todos os dipolos do cristal estão alinhados no sentido do campo elétrico. Quando o campo elétrico é reduzido, a polarização também diminui, e quando o valor do campo elétrico for zero, tem-se a polarização remanescente. Quando se inverte o sentido do campo aplicado, a polarização diminui e quando volta a zero tem-se o campo coercivo $-E_c$. Quanto maior o aumento do campo elétrico no sentido negativo mais os dipolos vão-se alinhando até atingirem novamente o ponto de saturação, no sentido contrário ao alinhamento anterior.

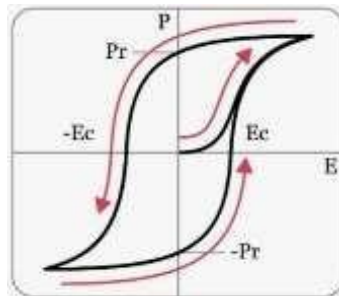


Figura 2.9 - Curva de histerese específica de um material ferroelétrico.

A partir da origem do gráfico, aumenta-se gradualmente a intensidade do campo elétrico externo E . Desse modo, o material apresenta cada vez mais domínios magnéticos alinhados, atingindo assim a máxima magnetização. O ponto em que ocorre a saturação da curva de magnetização. Após a saturação do campo magnético interno, diminui-se gradualmente o campo magnético externo, entretanto a curva de magnetização percorre um caminho diferente, uma vez que uma parte dos domínios magnéticos se mantém na mesma direção mesmo quando o campo externo E é nulo. À medida que o campo E aumenta no sentido oposto ao sentido da magnetização inicial, o material torna-se cada vez mais desmagnetizado. A desmagnetização completa do material só ocorre no ponto E_c , nesse ponto, é possível medir qual deve ser a intensidade do campo magnético externo para que o material perca sua magnetização, e esse campo é chamado de campo coercivo. A partir do ponto (E_c, Pr) , se continuarmos a aumentar a intensidade do

campo externo, o material se magnetizará novamente, mas terá seus polos invertidos em relação ao ponto em que ocorre a saturação.

Em geral cada material ferroelétrico possui uma temperatura de transição da sua fase estrutural, denominada temperatura de Curie, na qual o material começa a perder a sua ferroeletricidade, tornando-se um dielétrico comum, isto é, o material muda da fase ferroelétrica para uma fase não polar.

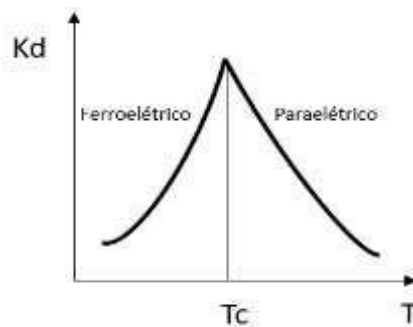


Figura 2.10 - Aspeto geral da permissividade dielétrica na transição de fase.

A constante dielétrica aumenta quando a temperatura se aproxima da *Temperatura de Curie* (T_c), e acima desta temperatura a constante dielétrica diminui. Num regime paraelétrico a polarização espontânea é zero, mas a constante dielétrica permanece alta. Portanto, materiais no regime ferroelétrico exibem um efeito de memória via o tratamento histórico (curva de histerese), que é ausente na fase paraelétrica [9].

2.3.2. Piezoeletricidade

A piezoeletricidade foi descoberta e investigada em cristais pelos irmãos Pierre e Jacques Curie em França, em 1880. Os irmãos Curie, no entanto, não previram o efeito piezoeletrico inverso. O efeito inverso foi matematicamente deduzido de princípios fundamentais da termodinâmica por Gabriel Lippmann em 1881. Os Curie imediatamente confirmaram a existência do efeito inverso, o que evidenciou de forma quantitativa a reversibilidade completa de eletromecânico para as deformações em cristais piezoeletricos.

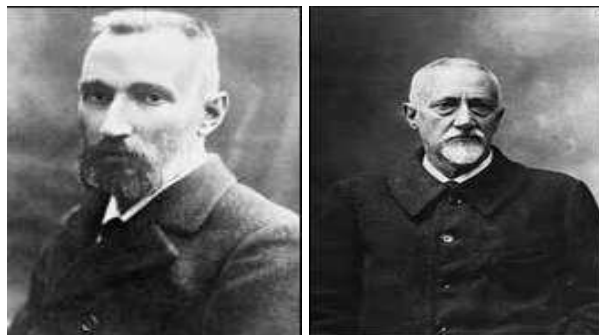


Figura 2.11 – Pierre e Jacques Curie.

Nas décadas seguintes, a piezoelectricidade permaneceu como sendo uma curiosidade de laboratório. Mais trabalho foi feito para explorar e definir as estruturas cristalinas que tinham a propriedade de gerar corrente elétrica. Isso culminou no ano de 1910, com a publicação do livro de Woldemar Voigt *Lehrbuch der Kristallphysik* (Textbook no Crystal Física), que descreve 20 classes de cristais naturais capazes de gerar corrente quando submetidos à pressão mecânica, e rigorosamente definidas as constantes piezoelétricas usando análise tensorial.

A piezoelectricidade tem origem do termo grego *piezein*, que significa pressionar, e da palavra eletricidade, que todos nós conhecemos. Pela origem da palavra, fica claro haver uma relação entre características mecânicas (pressão, tensão e solitação mecânica) e elétricas (da palavra eletricidade) e de fato é isso que acontece: O fenômeno é basicamente a transformação de energia de origem mecânica em energia elétrica e vice-versa.

Bem, vamos estudar como um transdutor piezoelétrico funciona nesse processo de conversão energia mecânica em energia elétrica, transdutor piezoelétrico ou também conhecida como pastilha piezoelétrica, é um sensor com capacidade de converter deformações provocadas por uma força (vibrações, toques,...) exercida sobre si em uma tensão à saída, o transdutor tem na sua composição, cristais com capacidade piezoelétricas, quando estes cristais sofrem uma certa deformação física provocada por uma pressão mecânica, aparece uma diferença de potencial que é convertido em energia elétrica, e vice-versa. Pode-se dizer que este efeito acontece nas duas direções, ou seja, efeito piezoelétrico direto e indireto.

O efeito piezoelétrico direto consiste em aplicar uma pressão mecânica num cristal com propriedades piezoelétricas, o transdutor piezoelétrico converte essa pressão mecânica em uma diferença de potencial elétrica.

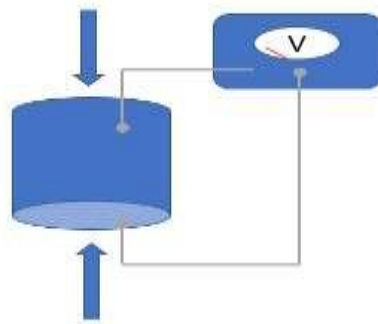


Figura 2.12 – Efeito direto - geração de eletricidade em resposta à pressão mecânica aplicada ao cristal piezoelétrico (vibrações e toques).

Por outro lado, o denominado efeito piezoelétrico indireto ocorre quando se aplica um diferencial de potencial ao cristal com propriedades piezoelétricas, ele sofre uma deformação física em resposta à tensão aplicada, este fenômeno é ilustrado na figura 2.13.

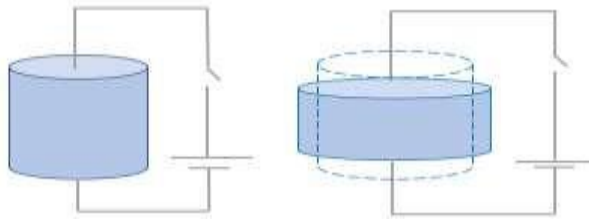


Figura 2.13 – Efeito indireto - deformação do cristal piezoelétrico em resposta à diferença de potencial aplicada.

2.3.2.1. Relação matemática da conversão direta e indireta

Como os materiais piezoelétricos são materiais dielétricos, logo, a descrição matemática do acoplamento eletromecânico nestes materiais exige uma análise que relacione suas propriedades dielétricas e mecânicas [10]. A equação que descreve o acoplamento eletromecânico para materiais piezoelétricos pode apresentar duas formas, dependendo do sentido da conversão em causa. Uma conversão em resposta a uma força aplicada ao material piezoelétrico é determinada como uma conversão direta, enquanto a segunda forma, é quando aplicada uma tensão aos terminais do material piezoelétrico e é denominada de conversão indireta.

Seguem-se as relações de conversão direta e indireta, respetivamente, para materiais com propriedades piezoelétricos, a equação 2.17 ilustra a relação que existe entre a força aplicada ao cristal piezoelétrico e a tensão gerada à saída, já a equação 2.18 mostra a relação inversa da conversão, ou seja, representa a relação entre a tensão aplicada ao cristal e a deformação resultante:

$$D = d\sigma + \epsilon E \quad (2.17)$$

$$\delta = \frac{\sigma}{y} + dE \quad (2.18)$$

Onde D representa o campo de deslocamento elétrico [C/m^2], δ é a deformação mecânica do material [m^2/N], d é a constante de carga piezoelétrica [C/N], σ representa a tensão mecânica por unidade de área [N/m^2], E é o campo elétrico aplicado [N/C], ϵ é uma constante da permissividade elétrica do material [F/m] e y é um parâmetro mecânico, que representa rigidez do material piezoelétrico [Pa].

2.3.2.2. Coeficientes de acoplamento k

O acoplamento eletromecânico k descreve a conversão de energia através do elemento piezoelétrico da forma mecânica para a forma elétrica ou vice-versa. A relação da energia

convertida é definida como o quadrado do coeficiente de acoplamento e uma vez que são quocientes entre energias, são adimensionais.

$$k_{ij} = \sqrt{\frac{E_{ma}}{E_{ef}}} \quad (2.19)$$

E_{ma} – representa a energia mecânica armazenada, e E_{ef} – a energia elétrica fornecida, fazendo uma análise, os índices do coeficiente de acoplamento indica a direção relativa das quantidades elétricas e mecânicas.

A tabela 2.1 mostra os valores dessas constantes para alguns materiais:

	d[C/N]	ϵ [F/m]	k	T _{Curie} [°C]
Quartzo	2.3	5	0.09	537
BaTiO ₃	190	1700	0.38	120
PZT-4	289	1300	0.51	328

Tabela 2.1 - Constantes para alguns materiais.

2.3.3. Polarização

A piezoelectricidade está baseada na formação de forte dipolo entre iões de cargas contrárias na estrutura cristalina de um cristal iônico. A cristalografia prevê a definição da simetria de um cristal iônico em função de um ponto, eixo ou plano (ou combinação destes). A partir destes elementos de simetria, todos os cristais são divididos em 32 grupos diferentes, sendo que 21 destes 32 grupos não possuem um centro de simetria (condição necessária para existir piezoelectricidade) e 20 deles são piezoeletricos.

A orientação cristalina aleatória faz com que materiais piezoeletricos não estejam naturalmente ativos. É necessário polarizar os cristais piezoeletricos e isto só é possível através de técnicas que proporcionem uma orientação preferencial da estrutura cristalina durante o processo de fabricação. Um método simples, porém, bastante empregado para a orientação de domínios é o processo polarização.

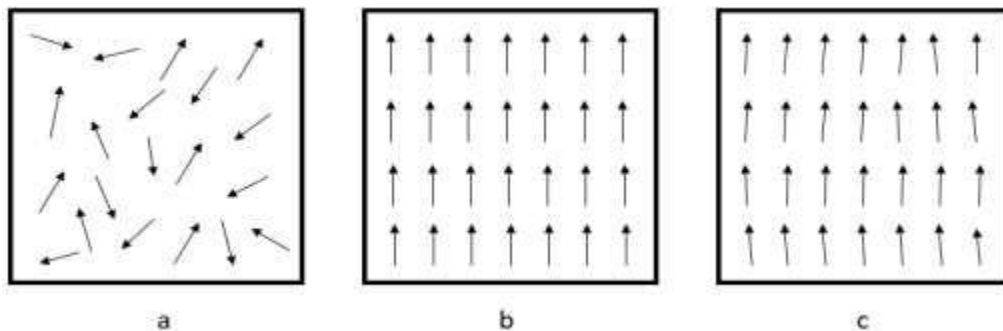


Figura 14 – Domínio de Weiss para cerâmicas piezoelétricas: a) Sem aplicação do campo elétrico; b) Com aplicação de campo elétrico; c) Após a aplicação de um campo elétrico.

Para fazer a modelagem do circuito elétrico a partir de um elemento piezoelétrico, o principal aspecto a ter em conta é a condição de ressonância do mesmo [11]. O circuito equivalente que modela o comportamento de um transdutor piezoelétrico é ilustrado na figura 2.15.

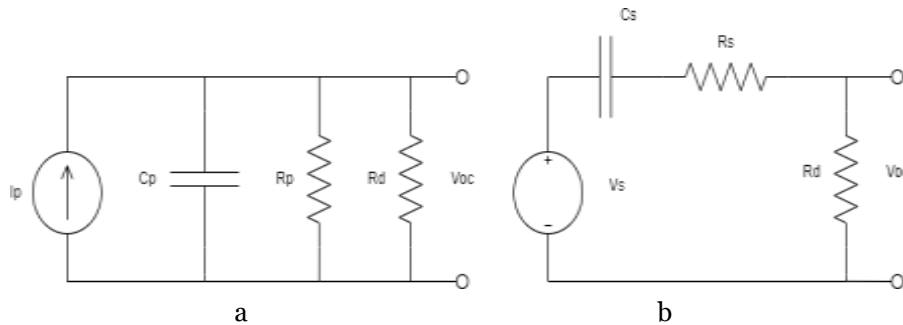


Figura 2.15 – Representação do circuito de geração piezoelétrico: a) Fonte de corrente; b) Transformação em fonte de tensão para análise.

I_p representa a corrente gerada pelo deslocamento das cargas, V_{oc} é a tensão gerada com o circuito aberto, C_p é a capacidade dos elétrodos do deslocamento das cargas, R_p representa a resistência interna e R_d é a resistência de perdas devido ao material piezoelétrico.

Assumindo que o condensador C_p e a resistência R_p como uma impedância, pode-se fazer a transformação da fonte de corrente com uma resistência em paralelo em uma fonte de tensão com uma resistência em série, como mostra a figura 2.16 – b), escrevendo a equação do circuito em função da tensão V_{oc} , fica:

$$V_{oc}(s) = \frac{C_s R_d}{s * C_s (R_s + R_d) + 1} s * V_s \quad (2.20)$$

2.4. Exemplos de aplicação

Geralmente, é obtida de $1-100\mu\text{W}/\text{cm}^3$ de potência nos sistemas de energia *harverting*, que por sua vez só é suficiente para a alimentação de cargas pequenas. Normalmente um sistema composto por uma carga, um sensor, um microcontrolador e um transceptor é necessária uma potência entre $50-100\text{ mW}/\text{cm}^3$ para a sua alimentação, o que deixa impossível a sua alimentação direta. Para contornar esse problema os sistemas contam com o armazenamento de energia (condensadores ou baterias) para posteriormente ser usada, essa energia é utilizada no momento da transmissão, assim que a potência atingir o máximo da energia necessária. Essa técnica ainda ajuda a ultrapassar o fato de que os transdutores internamente possuem grandes resistências, o que não permite o fornecimento de altas magnitudes de corrente sem perdas nas tensões.

As situações que exigem o emprego de componentes de armazenamento podem ser divididas em duas categorias:

- A demanda média de potência da carga é menor que a fornecida pelo transdutor. Neste caso o dispositivo pode operar continuamente.
- A demanda média de potência da carga é maior que a fornecida pelo sistema de transdução. Neste caso a operação é descontínua.

2.4.1. Pneus capazes de gerar energia

Uma pesquisa feita nos Estados Unidos, pela Universidade de Delaware, mostrou que os principais pontos que as pessoas observam antes de substituir um carro a gasolina por um carro elétrico são: A autonomia, o custo e o tempo de recarga da bateria. Pensando nisso, dois engenheiros da Universidade de Ontário, Noaman Makki e Remon Pop-Iliev (2011), no Canadá, decidiram inserir nano geradores piezoelétricos dentro dos pneus, que se deformam naturalmente com o veículo em andamento, devido à sua flexibilidade e oscilações das estradas.

Os pesquisadores verificaram que, para gerar maior quantidade de energia, era necessário cobrir uma área maior da superfície interna dos pneus com os nanos geradores. Em seu protótipo eles utilizaram uma malha de 4 x 40 condutores, colados no interior de um pneu aro 14 com um adesivo flexível. Com o veículo a 100 km/h – o que equivale a uma rotação do pneu de aproximadamente 14 giros por segundo – o material piezoelétrico de teste produziu 2,3 watts de forma sustentável por pneu. Em um segundo teste foi utilizada uma camada de nano geradores, sobreposta à primeira, a produção de energia saltou linearmente para 4,6 W.



Figura 2.16 - Nano geradores piezoelétricos dentro do pneu.

2.4.2. Piso gerador de energia

Um grupo formado por ecológicos de inventores, engenheiros e investidores holandeses liderados por Michel Smit, criaram um piso gerador de energia numa discoteca chamada Sustainable Dance Club (2008). Trata-se de uma discoteca que utiliza o movimento de danças das pessoas para gerar energia elétrica. Supondo que uma pessoa a dançar sozinha pode gerar até 20

W, duas podem acender uma lâmpada, estima-se que a pista de dança produzia até 10% da energia total gasta pelo estabelecimento. O seu funcionamento dá-se através de sensores piezoelétricos instalados embaixo do piso da pista de dança.

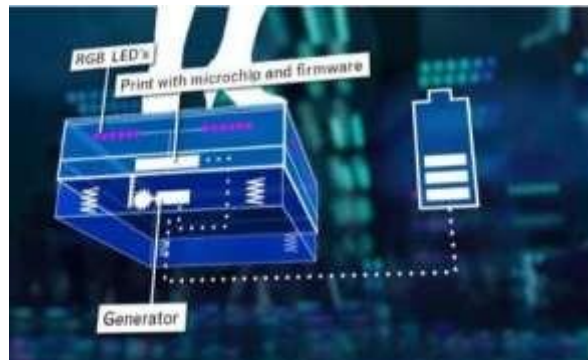


Figura 2.17 - Placa geradora de energia, efeito piezoelétrico.

Isto acontece por meio de módulos que são flexionados levemente quando sofrem pressão conforme as pessoas se movimentam. Dentro de cada módulo existe um sistema eletromecânico que transforma o movimento vertical, produzido pelas pessoas a dançar, em movimento rotativo que aciona um gerador. Cada módulo tem o tamanho de 75x75x20 cm e pode produzir até 35 W de saída sustentável, e de 5 W a 20 W por pessoa.

2.4.3. Geradores piezoelétricos nos trilhos dos comboios

A empresa Innowattech desenvolveu um projeto junto com a Companhia Nacional Ferroviária de Israel que tinha como objetivo substituir os coxins dos trilhos tradicionais feitos de borracha por coxins desenvolvidos pela Innowattech (2011), IPED PAD.

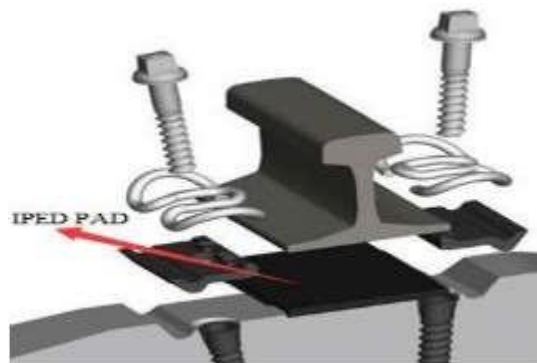


Figura 2.18 - IPED PAD.

A implementação dos IPED PAD é muito rápida e simples. Os IPED PAD possuem as mesmas dimensões dos coxins tradicionais já utilizados, a principal diferença é que eles são produzidos com elementos piezoelétricos que transformam as tensões mecânicas em energia elétrica. Durante o projeto 32 coxins foram substituídos e testes preliminares mostraram que áreas onde passam de 10 a 20 comboios por hora podem produzir até 120 KW/H.

2.4.4. Tecnologias no mercado

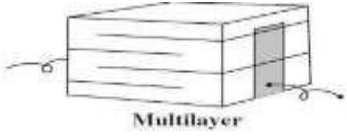




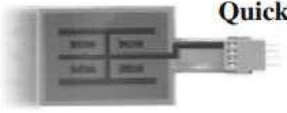

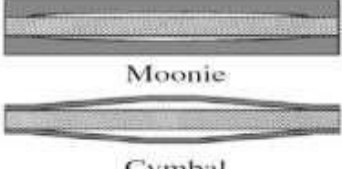
Tecnologia (modelo de fábrica)	Fabricante/Características
 <p>Multilayer</p>	<p>Fabricante: Morgan electroceramics, APC International, Tokin, PI. Características: Baixa frequência (~10 Hz), indicado para grandes tensões mecânicas num só sentido e de fácil montagem.</p>
 <p>Macro Fiber Composite (MFC)</p>	<p>Fabricante: Smart Material. Características: Flexível, opera tanto no modo d33 como d31, aplicações de alta frequência e pequenas deformações, cobre grandes superfícies e pode ser usado segundo uma tipologia dupla.</p>
 <p>Thunder</p>	<p>Fabricante: Face International. Características: Aplicável para diversas curvaturas e pesos fornecendo uma grande amplificação da tensão mecânica, indicado para baixas frequência (~1 Hz).</p>
 <p>Bimorphs</p>	<p>Fabricante: APC International. Características: Ressonância ajustável entre os 5 Hz a 100 Hz, usado em várias aplicações como vigas oscilantes, diafragma e outros.</p>
 <p>Amplified Piezoelectric Actuator</p>	<p>Fabricante: Cedrat. Características: Altamente eficiente sobre grandes tensões mecânicas ressonâncias ajustáveis em grandes gamas (~100 Hz).</p>
 <p>QuickPack</p>	<p>Fabricante: Mide. Características: Semelhante aos bimorphs (duplos) mas mais simples de montar, grande largura de banda e amplamente usada em configuração de encastramento.</p>
 <p>Rainbow</p>	<p>Características: Superfície curva resultando num maior aproveitamento sobre uma dada tensão mecânica, pode ser empilhado para amplificar a carga.</p>
 <p>Moonie Cymbal</p>	<p>Fabricante: Micromechatronics. Características: Capas metálicas em que revestindo a parte cerâmica permitem aplicações de alta tensão mecânica, alto carregamento devido à amplificação da tensão mecânica, ressonâncias variáveis por alterações nas dimensões dos revestimentos metálicos e do material.</p>

Tabela 2.2 – Tabela de tecnologias disponíveis no mercado.

3. Plataforma de Teste e Avaliação

3.1. Interface do usuário com Node-Red

Node-RED é uma ferramenta de desenvolvimento baseada em fluxo de código aberto desenvolvida originalmente pela IBM para conectar dispositivos de hardware, *Interface de Programação de Aplicações* (API) e serviços online como parte da *Internet das Coisas* (IoT). O Node-RED fornece um editor de fluxo baseado em navegador, que pode ser usado para criar funções em JavaScript. O tempo de execução é construído em Node.js. O Node-RED também permite a conexão de dispositivos de hardware e interfaces de programação de aplicativos (API). O Node-RED permite que os usuários se conectem a Web service e dispositivos eletrônicos substituindo tarefas comuns de codificação e isso é possível através de uma interface visual de arrastar e soltar. Vários componentes no Node-RED são conectados para criar um fluxo no editor Node-RED. O sistema contém nós que são representados por ícones apropriados. Isto pode operar de duas maneiras: Arrastar, soltar e conectar nós, ou importar código JavaScript. O Node-RED permite que os desenvolvedores conectem entradas, saídas e nós de processamento para criar fluxos para processamento de dados, controlando coisas ou enviando alertas.

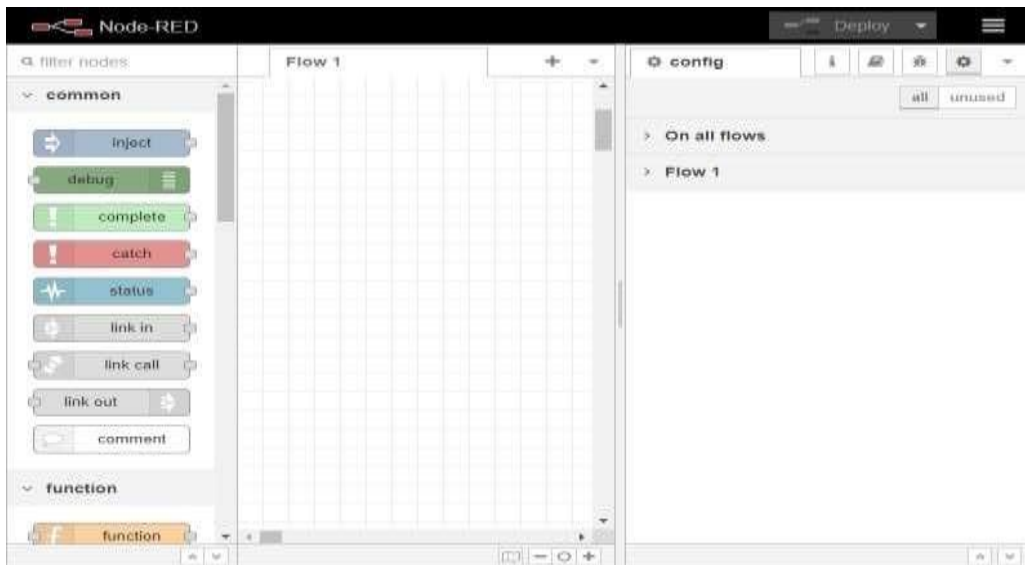


Figura 3.1 – Editor Node-Red.

Os fluxos Node-RED são armazenados usando o JSON, que pode ser importado e exportado para compartilhar com outros utilizadores. Os nós são reunidos em um fluxo de manutenção para alcançar um objetivo predeterminado. Da mesma forma, os fluxos podem ser coerentemente reunidos para atingir objetivos de ordem superior. O Node-RED pode ser executado em um navegador local em <http://localhost:1880>. NodeRED também fornece um módulo de interface de usuário que disponibiliza um conjunto de nós no Node-RED para criar rapidamente dados ao vivo no painel de controle. O Node-RED tem três componentes básicos:

- Painel de nós;

- Painel de fluxo;
- Painel de informações e depuração.

Node-RED é uma ferramenta flexível e poderosa que é usada para criar protótipos. Este sistema permite a criação rápida de aplicações, especialmente as que são acionadas em um evento como as de *IoT*. A essência desta ferramenta é permitir que os engenheiros e técnicos criem e configurem aplicações em tempo real nos dispositivos finais.

3.1.1. Nós

Os nós são o principal bloco de construção dos fluxos no Node-RED, quando um fluxo está em execução, as mensagens são geradas, consumidas e processadas pelos nós. Existem três tipos de nós básicos e mais dois tipos adicionais:

- **Nós de entrada** - gera mensagens para nós de recepção de dados;
- **Nós de saída** – envia dados para um serviço externo;
- **Nós de processamento** – são nós que processam dados, emitindo mensagens novas ou modificadas.

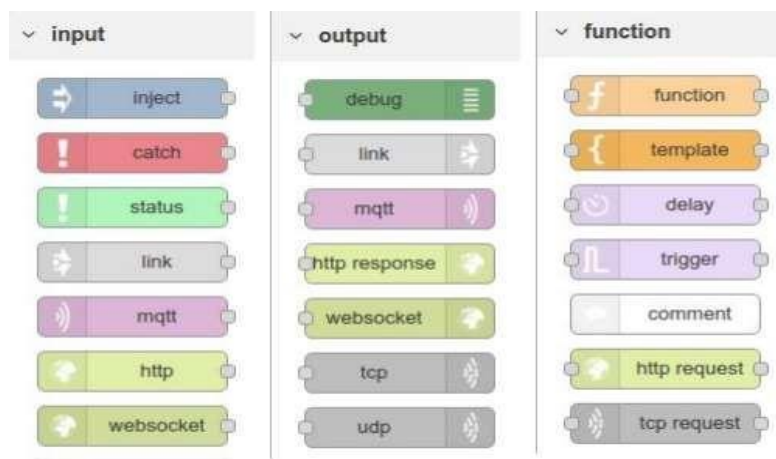


Figura 3.2 – Tipos de nós básicos.

As duas categorias adicionais dos tipos de nós são:

- Nós de credenciais
- Nós criados por usuários

3.1.2. Fluxo

No Node-RED, programas são fluxos compostos por uma coleção de nós conectados para trocar mensagens, cada nó tem um propósito bem definido. Um fluxo consiste em uma lista de objetos JavaScript que descrevem os nós e suas configurações.

3.1.3. Mensagens

As mensagens transmitidas entre os nós no Node-RED são, por convenção, objetos JavaScript chamados *msg*, consistindo em um conjunto de propriedades nomeadas. Normalmente contêm uma propriedade *msg.payload* com a carga útil (*payload*) da mensagem. Os nós podem anexar outras propriedades a uma mensagem, que pode ser utilizada para transportar outras informações para o próximo nó do fluxo.

3.2. Configuração experimental para vibrações

Com o intuito de analisar o desempenho dos transdutores piezoelétrico quanto à geração de energia elétrica a partir de vibrações, foi feita uma programação no Node-Red que através de uma entrada *USB* faz-se a leitura dos dados, fornecidos pelo Mbed-NXP LPC1768. Estes dados são lidos a partir do INA219 e ADXL 345, corrente, tensão e potência são dados fornecidos pelos registros programáveis do INA219, e a aceleração do transdutor nos diferentes eixos fornecidos pelo ADXL345. A figura a seguir mostra o esquema de ensaio a ser feito, desde a geração das vibrações até à conversão dessas vibrações em energia elétrica.

A configuração experimental do projeto utilizado nesta dissertação, onde o objetivo principal é a conversão de energia cinética das vibrações em energia elétrica, usando um transdutor piezoelétrico. O sistema escolhido já tinha sido projetado e construído em projetos anteriores, sendo um sistema eletromagnético que conta com um woofer dentro de uma caixa de madeira e esta é utilizada para gerar as vibrações. Com um gerador de sinais, o woofer é flexionado a uma determinada frequência gerando assim vibrações. Estas são transferidas para o exterior, mas especificamente para o transdutor piezoelétrico instalado na parte superior da vara metálica, produzindo assim energia elétrica alternada.

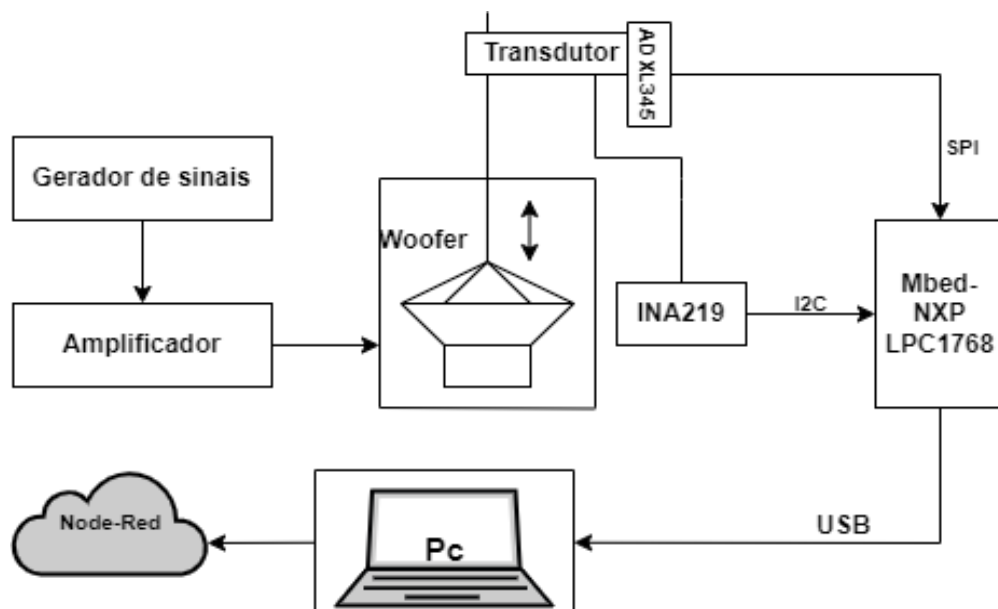


Figura 3.3 – Esquema para o ensaio experimental.

O Mbed-NXP LPC1768 é uma plataforma e um sistema operacional para dispositivos conectados à Internet com base em microcontroladores ARM Cortex-M de 32 bits. Estes são conhecidos como dispositivos de *IoT*, foi projetado para prototipar dispositivos, especialmente aqueles que incluem Ethernet, *USB*, memória FLASH e conta com a flexibilidade de muitas interfaces periféricas. Inclui 512 KB de memória FLASH, 32 KB de memória RAM e muitas interfaces, incluindo Ethernet integrada, *host* e dispositivo USB, CAN, SPI, I2C, ADC, DAC, PWM, outras interfaces de E/S.

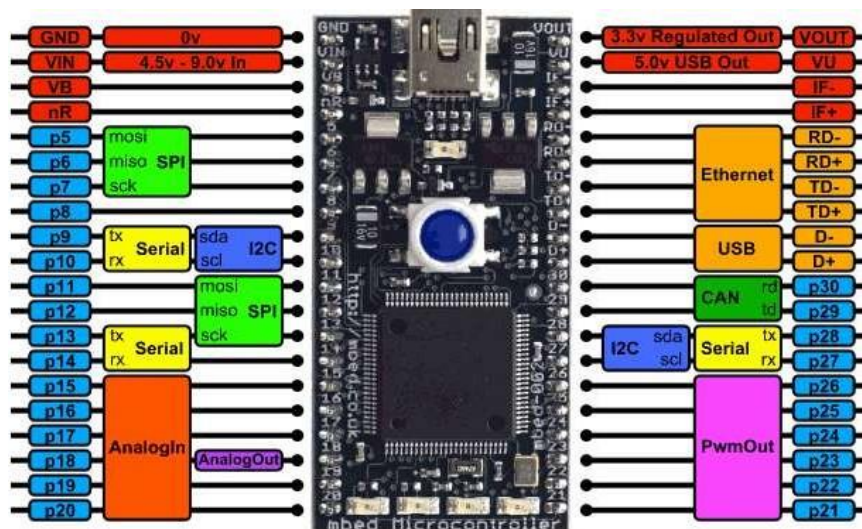


Figura 3.4 – Pinout-Mbed-NXP LPC1768.

As aplicações para a plataforma Mbed podem ser desenvolvidas usando o Mbed IDE online, um editor e compilador de código online gratuito. É preciso instalar um navegador web no PC local, o projeto é compilado na nuvem. O Mbed IDE fornece espaços de trabalho privados com capacidade de importar, exportar e compartilhar código e pode ser utilizado também para gerar documentação de código.

Para o este projeto, foi utilizado o Mbed-NXP LPC1768 para programar o INA-219, de forma a ler os valores da corrente, tensão e potência, respetivamente, usando a interface de comunicação *I2C* e ADXL 345 para ler a aceleração do transdutor nos três eixos, x, y e z, comunicando-se através do protocolo de comunicação SPI.

O INA219 é um monitor de corrente e potência com uma interface de comunicação *I2C*, que monitoriza a queda da derivação e a tensão de alimentação, com os tempos de conversão e filtros programáveis. O valor de calibração é programável, combinando com um multiplicador interno, o que permite leituras diretas da corrente em ampères (A). A interface *I2C* possui 16 endereços programáveis.

Neste projeto foi utilizado o INA-219 para ler os valores de corrente, tensão e potência, valores estes disponíveis nos seus respetivos registos programáveis.

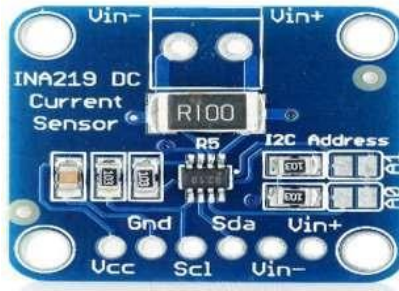


Figura 3.5 - INA- 219

Os dados são enviados para o computador através de uma ligação *USB*, com um nó de entrada de dados chamado *serial in*, estes dados são lidos no Node-Red, usou-se um nó de função SWITCH para separar os dados, visto que são obtidas informações sobre a corrente, tensão, potência e aceleração respectivamente, vale lembrar que os dados chegam à Node-Red em forma de *string*. De seguida foram programados três nós de funções para converter a *string* recebida em valores numéricos, após isso foram aplicados diferentes gráficos para monitorizar o desempenho do transdutor quanto a essas grandezas elétricas e física.

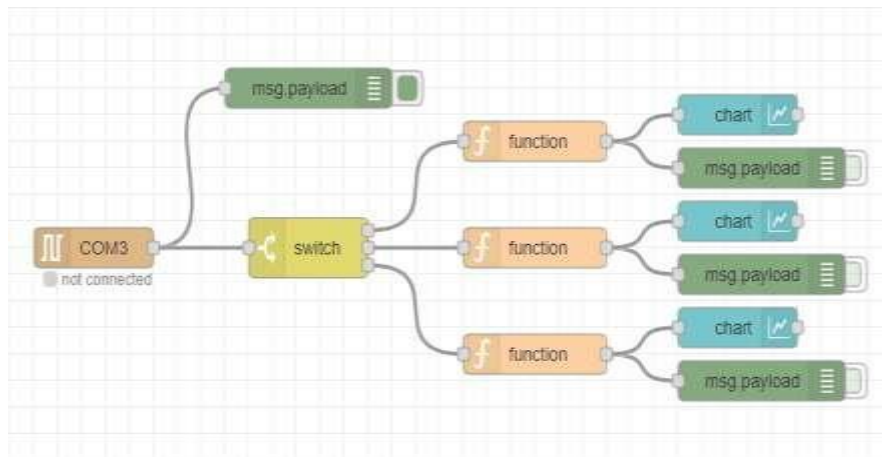


Figura 3.6 – Implementação Node-Red, leitura de corrente, tensão e potência.

Para ter uma noção da aceleração na qual se deslocam o transdutor durante a vibração, foi adicionado ao esquema um acelerómetro. O ADXL345 é um acelerómetro de três eixos, de ultrabaixa potência com medição de alta resolução (13 bits) em até ± 16 g. Os dados de saída digital são formatados como complemento para dois de 16 bits e podem ser acedidos por meio de uma interface digital *SPI* (três ou quatros ligações) ou *I2C*. O ADXL345 é adequado para aplicações de dispositivos móveis, pois mede a aceleração estática da gravidade em aplicações de deteção de inclinação, bem como a aceleração dinâmica resultante do movimento ou do choque.



Figura 3.7 – Pinout ADXL 345.

Fixado na extremidade do transdutor, foi utilizado o protocolo de comunicação *SPI* disponível nos pinos (p5, p6, p7) para realizar a comunicação com o Mbed Lpc1768.

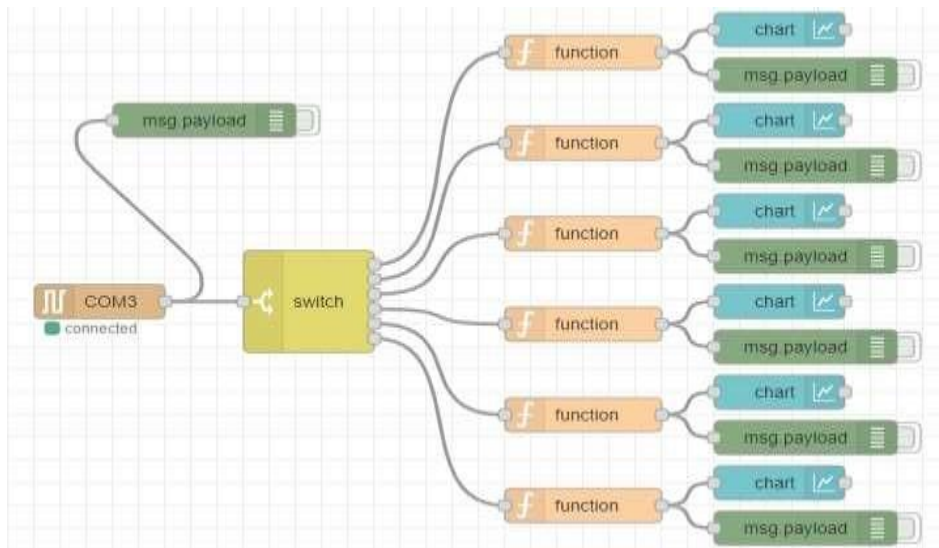


Figura 3.8 – Implementação Node-Red, leitura de corrente, tensão e potência e a aceleração nos três eixos.

O bloco de código a seguir mostra as inicializações das bibliotecas a serem utilizadas, nomeadamente do acelerômetro *ADXL-345*, *INA-219* e as variáveis gerais.

```
#include "mbed.h"
#include "INA219.hpp"

//ADXL345 accelerometer(p5, p6, p7, p8);
Serial pc(USBTX, USBRX);
DigitalOut led1(LED1);

// Get this to work with the INA219 Breakout from Adafruit
INA219 ina219(p28, p27, 0x40, 400000, RES_10BITS);

Ticker measure;
float refresh_rate = 0.5;
```

A função *void* imprime os valores lidos da corrente, tensão e potência.

```
void show_CPV()
{
    float current_ma = ina219.read_current_mA();
    float bus_voltage_mv = ina219.read_bus_voltage();
    float power_mw = ina219.read_power_mW();
```

```

pc.printf(" %f:Current\n %f:Bus_Voltage\n %f:Power\n ", current_ma, bus_voltage_mv,
power_mw);
    led1 = !led1;
}

```

Já na função *int main* é definida a banda de transmissão dos dados para o computador através de uma porta USB, inicialmente assume-se que o acelerómetro se encontra na posição (0) nos três eixos, foi também configurada a que frequência o acelerómetro se vai repetir nas medições e com que resolução essa medição será feita.

```

int main(void)
{
    pc.baud(9600);
    float current_ma = ina219.read_current_mA();

    int readings[3] = {0, 0, 0};

    pc.printf("Starting ADXL345 test...\n");
    pc.printf("Device ID is: 0x%02x\n", accelerometer.getDevId());

    //Go into standby mode to configure the device.
    accelerometer.setPowerControl(0x00);
    //Full resolution, +/-16g, 4mg/LSB.
    accelerometer.setDataFormatControl(0x0B);
    //3.2kHz data rate.
    accelerometer.setDataRate(ADXL345_3200HZ);
    //Measurement mode.
    accelerometer.setPowerControl(0x08);*/

    float refresh_interval = 1/refresh_rate;
    measure.attach(&show_CPV, refresh_interval);

    while (1) {
        wait(1);
        accelerometer.getOutput(readings);
        //13-bit, sign extended values.
        pc.printf("%i-x, %i-y, %i-z \n", (int16_t)readings[0], (int16_t)readings[1],
(int16_t)readings[2]);
    }
}
}
}

```

Para a realização da parte experimental, o transdutor a ser utilizado, é o transdutor piezoelétrico.

O transdutor piezoelétrico EH220-A4-503YB é composto por duas camadas ativas de material cerâmico *PZT* com um modo operacional em paralelo, idealmente projetado para ser mais sensível à forças mecânicas de flexão. Quando o transdutor é flexionado, uma camada é comprimida enquanto o outro é esticado, o que resulta em geração de energia elétrica.

Para esta dissertação foi escolhida a seguinte configuração deste transdutor para o procedimento experimental:

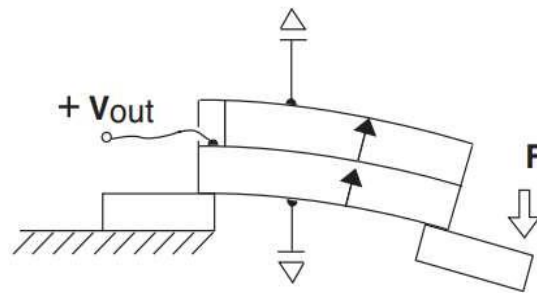


Figura 3.9 - Esquemático do transdutor piezoelétrico -viga piezoelétrica.

Os parâmetros do transdutor piezoelétrico relativamente a uma configuração da viga fornecidas pelo fabricante são as seguintes:

Material Piezoelétrico	5A4E
Peso (g)	10.4
Rigidez (N/m)	1.9×10^2
Capacitância interna (nF)	232
Pico máximo de flexão (mm_{peak})	± 2.6
Frequência de ressonância (Hz)	52
Tensão de saída em circuito aberto no pico de flexão máxima (V_{peak})	± 20.9
Corrente de circuito fechado no pico da flexão máxima / ciclo ($\mu A_{peak} / Hz$)	± 57
Potência máxima gerada no pico de flexão máximo (mW)	7.1

Tabela 3.1 - Especificações do transdutor piezoelétrico EH220-A4-503YB [12].

Os valores dos parâmetros, como o pico máximo de flexão, frequência de ressonância, tensão de saída em circuito aberto no pico de flexão máxima (V_{peak}) e potência máxima gerada no pico de flexão máximo (mW), são essas, com o transdutor em configuração viga a operar no

modo paralelo [13]. Geralmente os materiais piezoelétricos possuem uma impedância muito alta, o que resulta em elevados valores da tensão e a corrente muito baixas.

3.3. Medir a energia gerada com módulos transdutores

Como a energia elétrica gerada pelos módulos transdutores é alternada, e o integrado (INA219) a ser usado para medir as três grandezas elétricas (corrente, tensão e potência) tem funcionamento à alimentação contínua, foi necessário utilizar o *Kit Energy Harvesting Multi-Source Demo Board, Demo Circuit DC2080A*, mais em especificamente o circuito *LTC3588-1*, para fazer a retificação da tensão.

Para medir as grandezas elétricas em causa e ver o funcionamento do transdutor, foram feito uma série de ensaios. O amplificador de sinal é ligado ao woffer e com um gerador de sinal para variar a frequência de excitação nos valores, 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz que são as frequências de excitação escolhidos para realizar os ensaios e avaliar o transdutor piezoelétrico, uma resistência de 976 k Ω foi ligado à Vin- do INA219 e para cada uma das frequências de excitação, varia-se a resistência de 10 k Ω à 976 k Ω , com o intervalo de medição de 100 k Ω . As vibrações geradas quando chegam no transdutor são convertidas em energia elétrica alternada, que por sua vez passa por uma ponte retificadora e um condensador em paralelo com a saída DC da ponte, retificando e estabilizando o sinal, liga-se à Vin+ do INA219 que por sua vez a partir dos seus registos programáveis, mede os valores da corrente, tensão e potência respectivamente. O acelerómetro fixado na extremidade do transdutor, durante os ensaios vai registando os valores da aceleração com que se move transdutor nos três eixos, x, y e z.

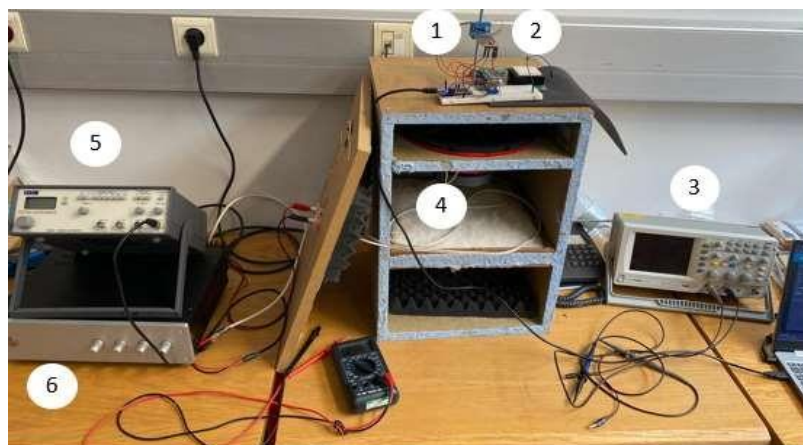


Figura 3.10 – Instalação experimental necessária: 1) Transdutor piezoelétrico; 2) Kit Energy Harvesting Multi-Source Demo Board, Demo Circuit DC2080A; 3) Osciloscópio; 4) Woffer; 5) Gerador de sinais; 6) Amplificador de sinais.

Para fazer uma análise do desempenho do transdutor piezoelétrico em estudo, que neste caso é o EH220-A4-503YB, foram feitos ensaios práticos, para as seguintes frequências de excitação 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz, foi-se variando a resistência de 10 k Ω à 967 k Ω , com o intervalo de medição de 100 k Ω . Na tabela 3.2 está representada um resumo dos resultados dos testes práticos.

Frequência de excitação (Hz)	Resistência (k Ω)	Corrente (μ A)	Tensão (mV)	Potência (mW)
15	473.1	4.3	1.891	7.5584
20	600	8.3	4.721	37.1464
25	473.1	13.7	6.156	80.1022

Tabela 3.2 – Resumo da relação frequência, resistência, tensão, corrente e potência.

A frequência de ressonância do sistema segundo os ensaios práticos foi de aproximadamente 33.6 Hz. Foi aplicado um gráfico aos resultados obtidos, para poder perceber a quantidade da potência gerada para cada frequência de excitação aplicada.

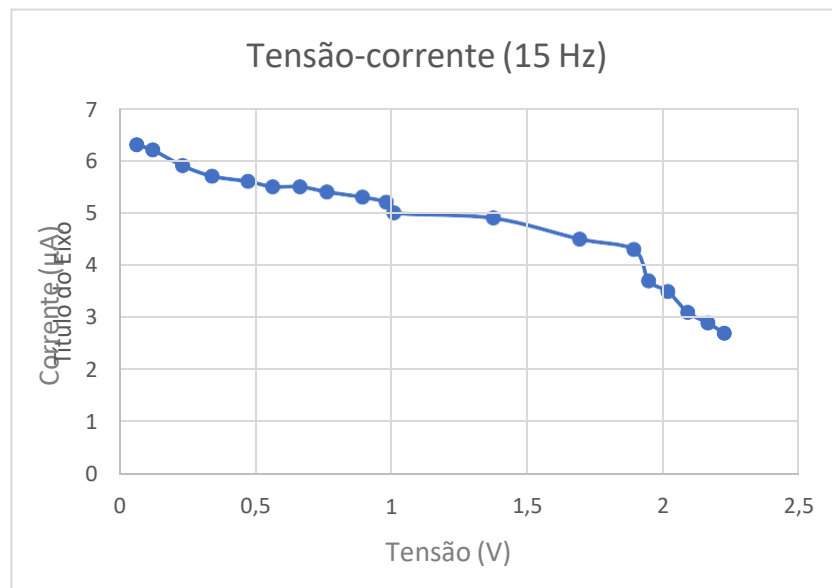


Figura 3.11 – Relação entre a tensão e a corrente para a frequência de excitação de 15 Hz.

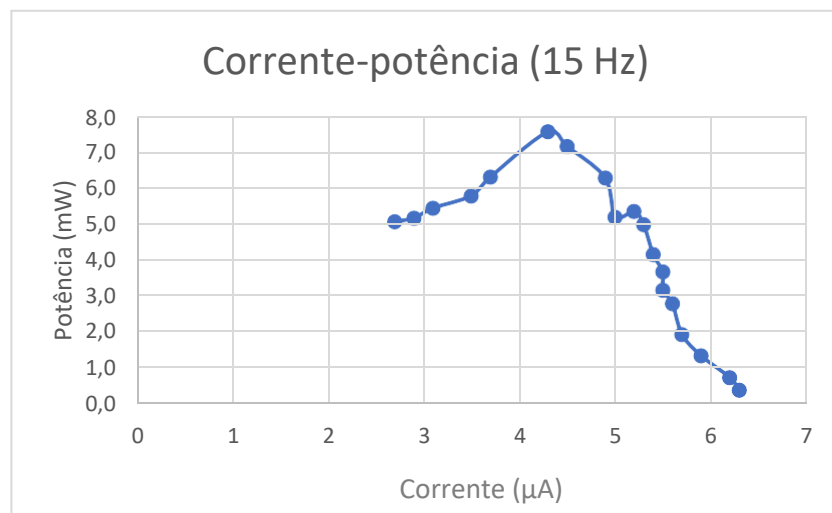


Figura 3.12 – Relação entre a corrente e a potência gerada para a frequência de excitação de 15 Hz.

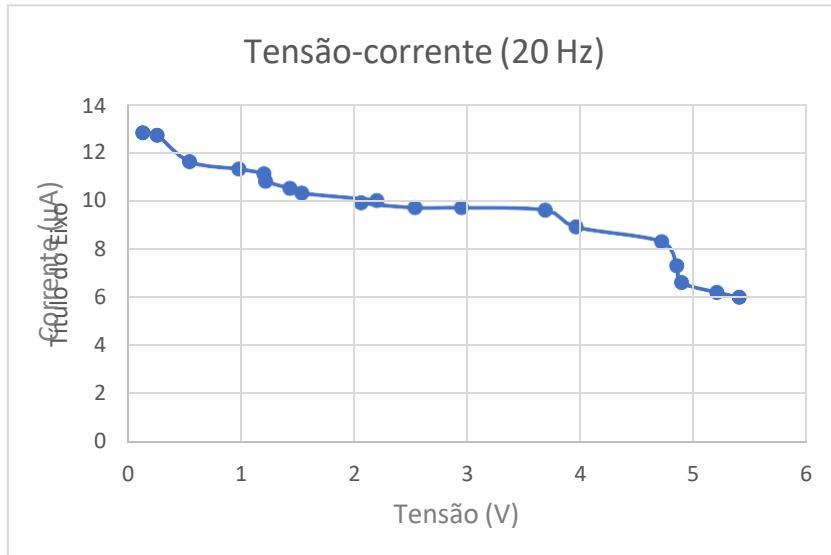


Figura 3.13 – Relação entre a tensão e a corrente para frequência de excitação de 20 Hz.

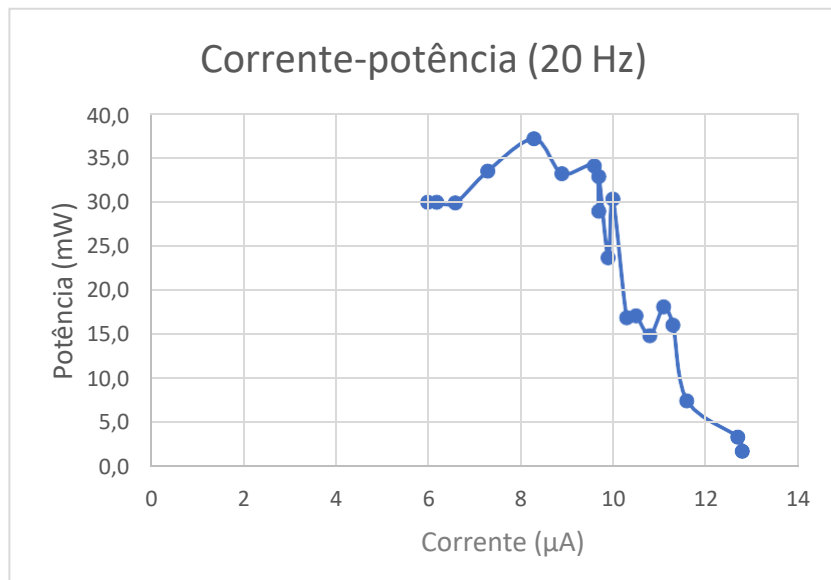


Figura 3.15 – Relação entre a tensão e a corrente para a frequência de excitação de 25Hz.

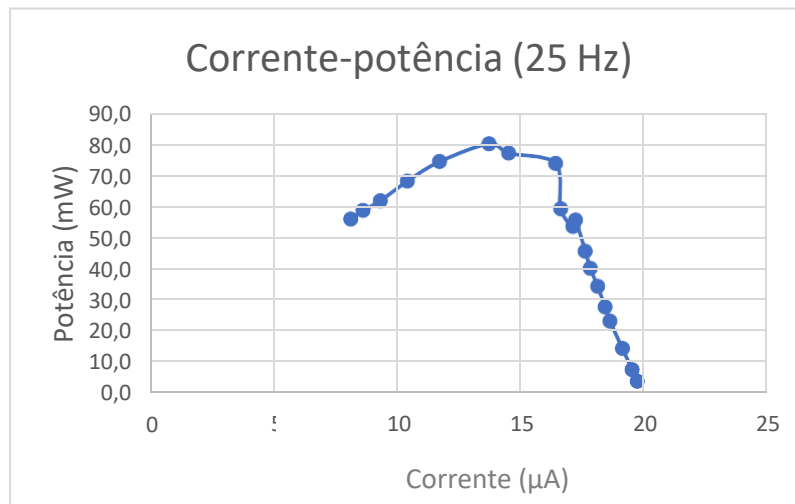


Figura 3.16 – Relação entre a corrente e a potência gerada para a frequência de excitação de 25Hz.

Nas figuras 3.11, 3.13 e 3.15, é representada a relação entre a tensão e a corrente do sistema, como é de se esperar, a corrente gerada pelo transdutor piezoelétrico diminui a medida que a resistência aumenta. Quanto maior for a frequência de excitação, maior é a energia cinética das vibrações gerada, e conseqüentemente a tensão produzida pelo transdutor piezoelétrico é maior.

Quanto as figuras 3.12, 3.14 e 3.16, estas representam a relação entre a corrente e a potência gerada pelo transdutor piezoelétrico para as diferentes frequências de excitação aplicada ao woffer, gerando assim energia cinética das vibrações.

4. Módulo de Recolha de Energia de Vibração

4.1. Avaliação do conversor AC / DC

Um conversor AC/DC, é um circuito elétrico que transforma uma entrada de corrente alternada em saída de corrente contínua, este processo de conversão também é conhecido como retificação. Conversores AC/DC são utilizados em aplicações de eletrônica de potência onde a entrada de energia é alternada de onda senoidal AC, o que requer assim uma conversão de energia para uma saída DC.

Para este trabalho de dissertação, o foco é a recolha de energia harvest, que por natureza é alternada, utilizou-se um conversor AC/DC para converter essa energia alternada em contínua, para converter essa energia de alternada para contínua, passa por um processo de conversão, o que torna necessário o uso de um conversor AC/DC e um banco de condensadores, para depois estar disponíveis para o uso de equipamento normalmente de baixo consumo.

Na figura 4.1 está representado o esquema do processo de conversão e regulação da tensão e armazenamento da energia gerada pelo transdutor (no nosso caso, o transdutor piezoelétrico):

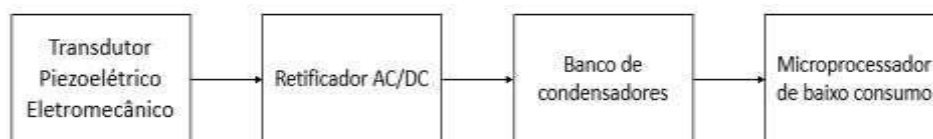


Figura 4.1 - Esquema do processo de conversão, regulação da tensão e armazenamento da energia gerada pelo transdutor.

Utilizou-se o módulo *Energy Harvesting Multi-Source Demo Board, Demo Circuit DC2080A* para a realização dos ensaios práticos programados para este trabalho de dissertação.

4.2. Kit Energy Harvesting Multi-Source Demo Board, Demo Circuit DC2080A

A *Demo Circuit DC2080* é uma plataforma de demonstração de recolha de energia *harvest* que suporta os seguintes transdutores: Piezoelétrico, solar, fontes de energia térmicas ou qualquer alta impedância AC ou fonte DC. A plataforma contém quatro circuitos independentes que consistem nos seguintes:

- LTC3588-1: Módulo piezoelétrico, eletromagnético, ou fontes de alta impedância
- LTC3108: Gerador termoelétrico
- LTC3105: Queda de tensão no diodo
- LTC3459: Gerador solar

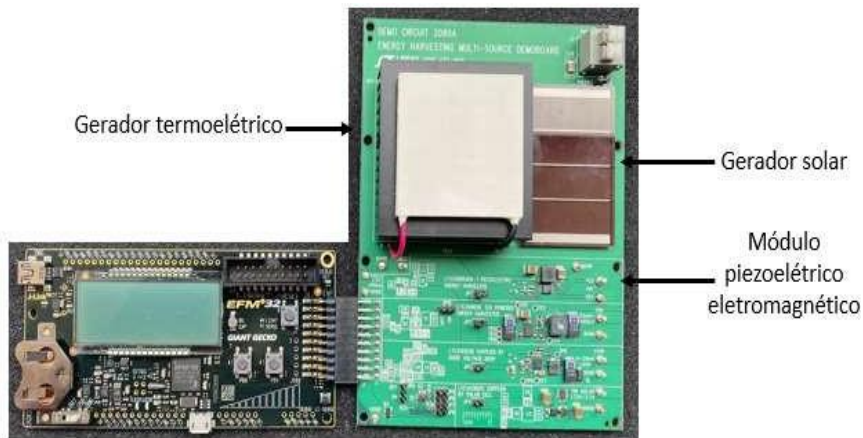


Figura 4.2 - Placa *Demo Circuit DC2080*.

A plataforma é projetada para se conectar ao um kit Energy Micro STK de desenvolvimento. Também inclui dois transdutores coletores de energia (TEG e Solar) e um bloco de terminais para conectar uma fonte AC de alta impedância. A placa contém vários *jumpers* que permitem a sua configuração. A construção padrão para a placa tem 4 *jumpers* instalados dos 12 possíveis *jumpers*. Essa compatibilidade o torna uma ferramenta de avaliação perfeita para qualquer sistema de recolha de energia de baixa potência [14].

4.2.1. LTC3588-1: Módulo piezoelétrico/eletromagnético

O circuito LTC3588-1 conta com um retificador de onda completa e um conversor DC/DC buck, esta fonte é selecionada instalando o *jumper* de seleção de energia JP1, projetado especificamente para recolha de energia, conta com uma capacidade de suportar transdutores piezoelétrico, eletromecânico e solar.

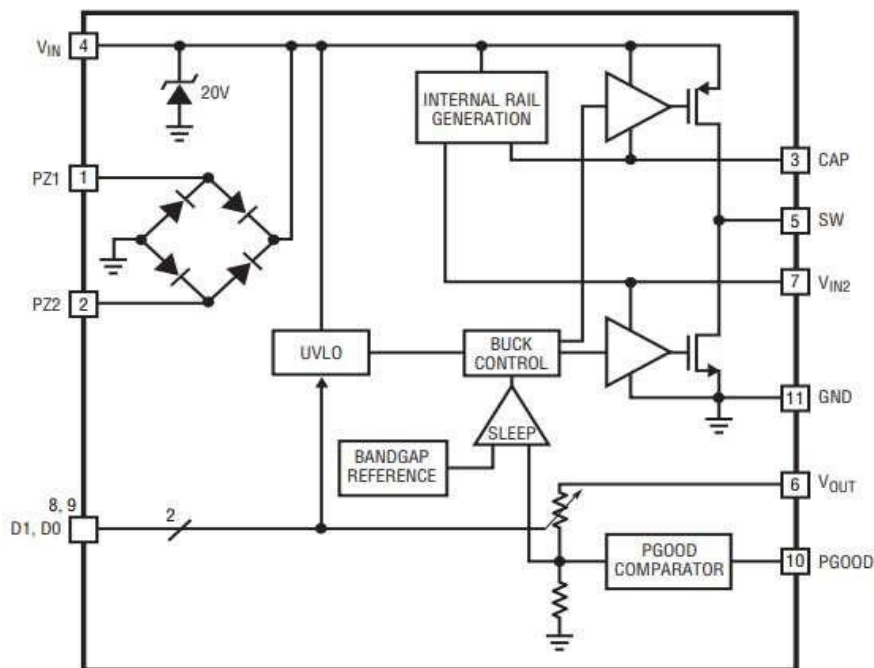


Figura 4.3 - Diagrama de blocos LTC3588-1.

Especificações dos pinos:

- PZ1 (Pin 1): Entrada para o transdutor piezoelétrico/eletromagnético ou outra fonte AC, (usado em conjunto com PZ2);
- PZ2 (Pin 2): Entrada para transdutor piezoelétrico/eletromagnético ou outra fonte AC, (usado em conjunto com PZ1);
- CAP (Pin 3): *Internal rail* referenciado ao V_{IN} serve como *gate* para condução para buck PMOS switch. Um condensador de $1\mu\text{F}$ deve ser conectado entre CAP e V_{IN} .
- V_{IN} (Pin 4): Tensão de entrada retificada, um condensador neste pino serve como um reservatório de energia e alimentação de entrada para o regulador buck. A tensão V_{IN} é fixada internamente a um valor máximo de 20V.
- SW (Pin 5): Pino do interruptor para o regulador Buck Switching.
- V_{OUT} (Pin 6): Pino sensor usado para monitorar a tensão de saída e ajustá-la através de feedback interno.
- V_{IN2} (Pin 7): *Internal low voltage rail*, serve como gate de condução para buck NMOS switch. Também serve como lógica alta para bits de seleção de tensão de saída DO e D1. Um condensador de $4,7\mu\text{F}$ deve ser conectado de V_{IN2} a GND.
- D1 (Pin 8): Bit de seleção de tensão de saída. D1 deve estar alto para V_{IN2} ou baixo para GND.
- DO (Pin 9): Bit de seleção de tensão de saída. DO deve estar alto para V_{IN2} ou baixo para GND.
- PGOOD (Pin 10): Power good output tem lógica alta quando o V_{OUT} está acima de 92% do valor alvo.
- GND (Pin 11): Terra.

O LTC3588-1 possui um retificador de onda completa interno acessível através das entradas diferenciais PZ1 e PZ2 que retifica entradas AC, desde piezoelétricas, eletromecânicas, e solares, ou uma qualquer fonte de energia AC. A saída retificada é armazenada em um condensador no pin 4(V_{IN}) e pode ser usado como um reservatório de energia para o conversor buck. O retificador de baixa perda tem uma queda total acerca de 400mV com correntes piezoelétricas típicas ($\sim 10\mu\text{A}$). A ponte é capaz de transportar até 50mA. Quando a tensão no V_{IN} for maior que UVLO o conversor buck está habilitado e a energia é transferido do condensador de entrada para o condensador de saída. Quando a tensão do condensador de entrada se encontra abaixo do UVLO, o conversor é desabilitado. V_{IN2} serve como lógica alta para bits de seleção de tensão de saída DO e D1. O conversor buck usa um algoritmo de tensão para controlar a saída através de feedback interno do pin 6(V_{OUT}). O conversor buck carrega o condensador de saída através de uma bobina para um valor ligeiramente superior ao valor de entrada, até 260mA através de um switch PMOS interno e, em seguida, reduzindo-o para o mA através de um switch NMOS interno. A seleção do valor de tensão de saída é definida através dos pinos DO e D1, para GND (valor lógico 0) ou V_{IN2} a (valor lógico 1), tabela 4.1.

DO	D1	Vout	Ivout
0	0	1.8V	44nA
0	1	2.5V	62nA
1	0	3.3V	81nA
1	1	3.6V	89nA

Tabela 4.1 - Seleção de tensão de saída através de DO e D1.

O pin 10 PGOOD permanecerá alto enquanto o VOUT for superior a 92% do valor desejado da tensão regulada. As entradas DO/D1 podem ser comutadas durante a regulação. Se VOUT for programado para uma certa tensão e o PGOOD a diminuir até um valor do antigo VOUT, PGOOD vai fazer uma transição lógico baixo até que o novo ponto de regulação seja alcançado. A energia recolhida pode ser armazenada no condensador de entrada ou condensador de saída. Quando a tensão de saída é regulada, qualquer excesso de energia é armazenada no condensador de entrada e sua tensão aumenta. Quando existe uma carga na saída, o conversor buck pode transferir a energia armazenada de forma eficiente e em alta tensão para a saída regulada. O LTC3588-1 vai fazer recolha de energia e converter a mesma em uma tensão de saída para alimentar microprocessadores, sensores e componentes de transmissão sem fio.

Através de um osciloscópio, observou-se o tempo de carregamento dos condensadores, tensão alternada gerada pelo transdutor piezoelétrico, VMCU. Com uma frequência de excitação de 20 Hz, o tempo de carregamento dos condensadores é de aproximadamente 80 segundos, depois deste tempo de carregamento a tensão retificada, que é neste caso o VMCU passa a ser mais estável.

Na figura 4.4 é ilustrada a tensão alternada gerada pelo transdutor piezoelétrico.

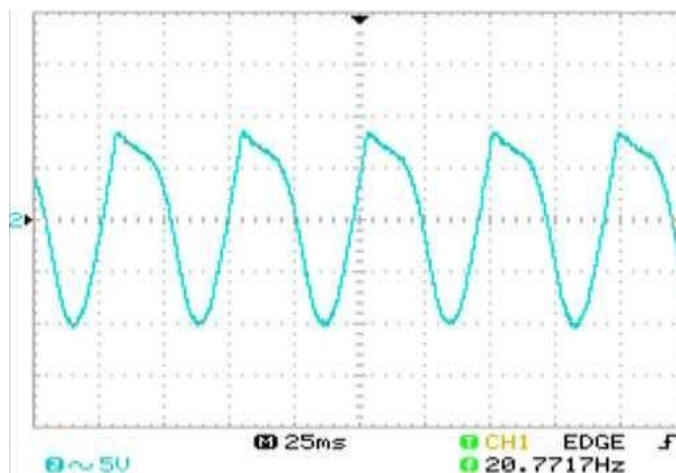


Figura 4.4 – Tensão alternada gerada pelo transdutor piezoelétrico.

Já na figura 4.5 é mostrado o processo de carregamento dos condensadores, os condensadores carregam até atingirem a tensão definida pelo integrado, depois disso, a tensão mantém-se estável, segundos depois os condensadores começam a descarregar-se.

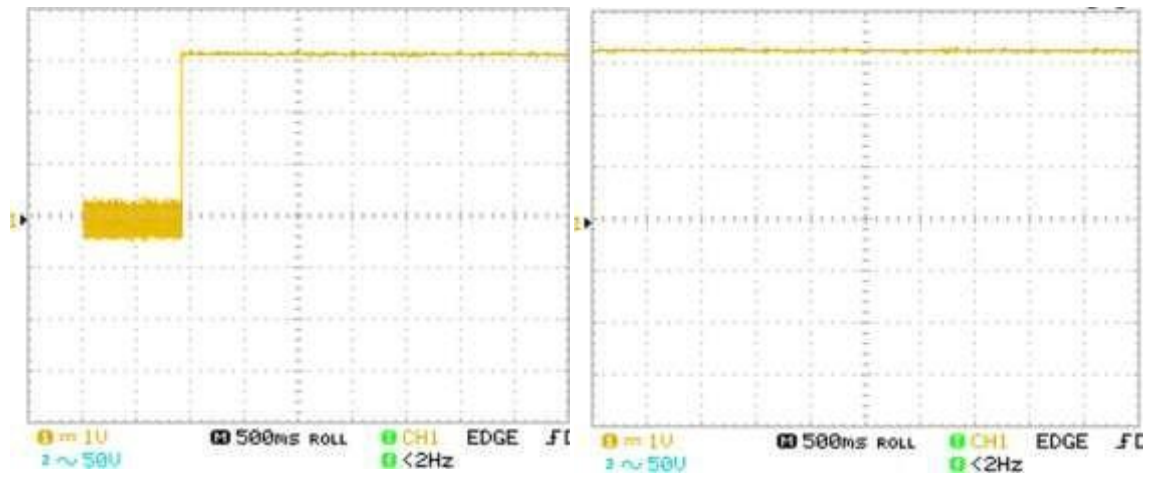


Figura 4.5 – Carregamento de condensadores, tensão no banco de condensadores (VMCU) aproximadamente 3.3 V.

5. Conclusões

5.1. Principais conquistas

Esta dissertação tem como a base a EH, que é o processo pelo qual a energia é derivada a partir de fontes externas, como por exemplo, energia solar, energia térmica, energia eólica e energia cinética, fazendo a recolha e o armazenamento da energia produzida para o uso de pequenos dispositivos autônomos sem fio, como aqueles utilizados em dispositivos eletrônicos e redes de sensores sem fio (RSSF).

As redes de sensores sem fios são construídas por um conjunto de pequenos sensores que, a partir do local onde são inseridos, permitem uma recolha de informações do meio. Estes sensores podem ser aplicados em diversas áreas, como por exemplo: Militares, na deteção de movimentos inimigos ou na presença de materiais perigosos, meteorológica, na deteção de catástrofes naturais, indústria, na monitorização de equipamentos, ou, na medicina para aquisição de parâmetros biométricos. Como todos estes sistemas precisam de uma fonte de alimentação para o seu funcionamento, usam-se baterias, mas também por outro lado, as baterias acarretam um problema que é o tempo limitado da vida útil, o que requer uma substituição periódica, esta ação com certeza conta com custos da manutenção, sem esquecer que os as baterias podem estar em lugares de difícil acesso físico, o que não ajuda muito no processo da sua substituição.

A proposta apresentada nesta dissertação, foi a seguinte, projetar e implementar um sistema de recolha e conversão de energia cinética das vibrações (usando efeitos piezoelétricos e eletromagnéticos) em energia elétrica, a energia recolhida é utilizada para alimentar os sensores, dispensado assim a utilização de possíveis baterias, sensores esses usados para monitorização da tubulação de água.

O transdutor piezoelétrico utilizado nesta dissertação foi o EH220-A4-503YB, a frequência de ressonância do sistema segundo os testes prático foi de aproximadamente 33.6 Hz. Para as diferentes frequências de excitação, foi gerada uma determinada tensão resultante. A tabela 5.1 mostra um resumo do máximo da potência para cada frequência de excitação aplicada.

Frequência de excitação (Hz)	Resistência (k Ω)	Corrente (μ A)	Tensão (V)	Potência (mW)
15	473.1	4.3	1.891	7.5584
20	600	8.3	4.721	37.1464
25	473.1	13.7	6.156	80.1022

Tabela 5.1 – Resumo da relação frequência, resistência, tensão, corrente e potência.

Para a retificação da tensão alternada gerada foi utilizado a plataforma Energy Harvesting Multi-Source Demo Board, Demo Circuit DC2080A, em particular o circuito LTC3588-1, contém uma ponte de retificação de onda completa e um conversor DC/DC buck.

Como era de se esperar a medida que se foi aumentando a resistência, a corrente começa a diminuir, e a potência máxima registrada foi de 80.1022 mW, à uma frequência de excitação de 25 Hz, com um carga de 473.1 k Ω .

Conclui-se que, um sistema de recolha de energia harvest bem implementação seria capaz de fazer a recolha da energia cinética disponível no ambiente, fazer a respetiva retificação da tensão alternada gerada, e usando um banco de condensadores para fazer o armazenamento da energia retificada, e posteriormente utilizar essa energia armazenada para alimentação dos dispositivos de baixo consumo do sistema.

5.2. Trabalhos futuros

Uma das sugestões sobre possíveis trabalhos futuros, passa pelo uso de um transdutor eletromecânico com o mesmo sistema projetado nesta dissertação. Este sistema eletromecânico que conta com o woffer para gerar vibração, e com um transdutor piezoelétrico para converter a energia cinética das vibrações em energia elétrica. Substituindo o transdutor piezoelétrico para o eletromecânico, analisar o seu desempenho neste sistema. De uma certa forma daria para fazer uma comparação do desempenho dos dois transdutores quanto ao processo de recolha e conversão da energia cinética em energia elétrica.

Uma outra sugestão seria a projeção e implementação de um circuito impresso capaz de fazer a recolha e conversão da energia de diferentes fontes em energia elétrica, como por exemplo, energia mecânica, energia térmica e energia química. O circuito impresso contaria com um retificador de onda completa e um conversor DC/DC embutidos.

Por fim, um possível trabalho futuro poderia passar pela combinação dos transdutores piezoelétrico, e o transdutor eletromecânico na recolha da energia presente no ambiente e assim converter essa energia recolhida em energia elétrica.

Referências Bibliográficas

- [1] IEEE International Workshop on Measurements and Networking 4. 2017 Neapel, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Instrumentation and Measurement Society, IEEE International Workshop on Measurements and Networking 4 2017.09.27-29 Naples, IEEE International Workshop on Measurement and Networking 4 2017.09.27-29 Naples, and M & N 4 2017.09.27-29 Naples, *2017 IEEE International Workshop on Measurements and Networking M & N : 2017 proceedings papers*.
- [2] S. Paulo, “VIBRAÇÕES INDUZIDAS PELA EMISSÃO DE VÓRTICES EM CILINDROS COM BAIXA RAZÃO DE ASPECTO,” 2013.
- [3] J. Wang, L. Geng, L. Ding, H. Zhu, and D. Yurchenko, “The state-of-the-art review on energy harvesting from flow-induced vibrations,” *Appl. Energy*, vol. 267, no. March, p. 114902, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114902.
- [4] X. Ma and S. Zhou, “A review of flow-induced vibration energy harvesters,” *Energy Conversion and Management*, vol. 254. Elsevier Ltd, Feb. 15, 2022. doi: 10.1016/j.enconman.2022.115223.
- [5] M. Bashir, P. Rajendran, and S. A. Khan, “Energy Harvesting from Aerodynamic Instabilities: Current prospect and Future Trends,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 290, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/290/1/012054.
- [6] V. R. Challa, M. G. Prasad, Y. Shi, and F. T. Fisher, “A vibration energy harvesting device with bidirectional resonance frequency tunability,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 17, no. 1, Feb. 2008, doi: 10.1088/0964-1726/17/01/015035.
- [7] “jorgefilho_m_me_sjbv”.
- [8] S. Priya and D. J. Inman, *Energy harvesting technologies*. Springer US, 2009. doi: 10.1007/978-0-387-76464-1.
- [9] C. Ba, “UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA CAMPUS DE ARARAQUARA,” 2006.
- [10] V. Weber, B. De Freitas¹, J. Da, and C. E. Silva¹, “Sensor de Vibração Mecânica Utilizando Plataforma Arduino e Material Piezoelétrico,” 2017. [Online]. Available: <https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/ecop>
- [11] M. Antonio, J. Coelho, and P. Alegre, “UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL ESCOLA DE ENGENHARIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GRADUAÇÃO GRADUAÇÃO GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA ELÉTRICA,” 2015.
- [12] P. Energy and H. Kit, “Piezo Energy PIEZOBENDING GENERATOR & ENERGY HARVESTING Piezoelectric Energy Harvesting Kit Circuit Harvester Specifications,” *Energy*, pp. 1–2, 2008, [Online]. Available: www.piezo.com
- [13] C. G. M. Lima, “Transdutores piezoelétricos na recolha da energia cinética das vibrações,” p. 91, 2018, [Online]. Available: https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/9926/1/6691_14228.pdf

- [14] A. Devices, “Energy Harvesting (EH) Multi-Source Demo Board with Transducers,” *DC2080A Demo Man.*, pp. 1–18, 2018.