



Joana de Sousa Almeida

Mestrado em Energias Renováveis – Conversão Eléctrica e
Utilização Sustentáveis

Conversão das vibrações provenientes do vento em electricidade

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Energias Renováveis – Conversão Eléctrica e Utilização
Sustentáveis

Orientador: Professor Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Professor Doutor Jorge Pamies Teixeira, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Mário Fernando da Silva Ventim Neves
Arguente: Prof. Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto
Vogal: Prof. Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev
Vogal: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2013



Joana de Sousa Almeida

Mestrado em Energias Renováveis – Conversão Eléctrica e
Utilização Sustentáveis

Conversão das vibrações provenientes do vento em electricidade

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Energias Renováveis – Conversão Eléctrica e Utilização
Sustentáveis

Orientador: Professor Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Professor Doutor Jorge Pamies Teixeira, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Mário Fernando da Silva Ventim Neves
Arguente: Prof. Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto
Vogal: Prof. Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev
Vogal: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2013

Título da Dissertação de Mestrado: Conversão das vibrações provenientes do vento em electricidade,
“Copyright” Joana de Sousa Almeida, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

“A faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor”.

Dedico esta dissertação, com um grande orgulho, à minha família, ao meu pai Carlos, à minha mãe Ângela, à minha irmã Cristina, à minha avó Rosa e a todos os meus amigos e colegas decisivos no meu percurso académico.

Agradecimentos

É com um enorme apreço que venho aqui deixar o meu muito obrigado a todas as pessoas que directa ou indirectamente estiveram envolvidas na realização deste projecto e consequente escrita da dissertação.

Gostaria de começar pelos meus pais, em especial à minha mãe, que sempre foram excepcionais no que toca à minha educação e formação profissional e pessoal, por todo o apoio e suporte, por toda a compreensão e por todos os sacrifícios nesta longa caminhada que é a formação académica, pela forma como respeitaram as minhas decisões, pela possibilidade de poder estudar e finalmente por todo o amor, dedicação e exemplo de vida que me transmitiram.

À minha irmã por tudo o que ela representa, pelo seu apoio incondicional e por nunca deixar de acreditar em mim.

Ao Pedro, que para além de namorado, sempre foi um grande amigo e companheiro dos bons e maus momentos, pelo seu apoio, motivação e por nunca me deixar desistir daquilo em que acredito e essencialmente pela sua colaboração neste projecto.

Um sincero agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev, pela sua disponibilidade e atenção, pela sua ajuda e orientação, pela sua transmissão de conhecimentos e simpatia, bem como ao meu co-orientador, Professor Doutor Jorge Pamies Teixeira por ter aceite este desafio, por se ter unido a nós neste projecto e assim tornar possível a cooperação entre os dois departamentos envolvidos, nomeadamente, o Departamento de Engenharia Electrotécnica e o Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, igualmente pela sua total disponibilidade, simpatia, pela sua preciosa ajuda, sugestões e material concedido, pois sem estes dois Professores a realização desta dissertação não seria possível.

Aos técnicos do laboratório de soldadura do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Sr. António Campos e Sr. Paulo Magalhães, pelo apoio prestado no desenvolvimento inicial deste estudo, nomeadamente, na concepção do protótipo.

Por último, mas não menos importante, a todos os meus amigos e colegas, em geral, sem querer nomear nomes, pois os mesmos sabem que foram relevantes, pela vossa amizade, pela ajuda na superação de obstáculos, por todos os momentos que vivemos juntos e a partilha de experiências.

Resumo

No presente trabalho foi estudada a viabilidade da utilização de transdutores piezoelétricos para a recolha de energia proveniente das vibrações induzidas pelo vento através de uma viga em consola com um corpo oscilante na extremidade livre, segundo a oscilação de flexão induzida.

Para esse efeito foi desenvolvido um protótipo de laboratório com três configurações diferentes de viga mais corpo oscilante. Em cada configuração foi colocado também, para além do transdutor piezoelétrico, um extensómetro, junto ao encastramento da viga, para medir a flexão da mesma, de forma a serem obtidas as amplitudes de vibração.

No que respeita às configurações, essencialmente, o que variou de umas para as outras foi o comprimento da viga e a espessura do corpo oscilatório, que é um prisma quadrangular de poliestireno extrudido (XPS).

O sistema de teste incluía desde o túnel de vento para realizar as medições de amplitudes e verificar as potências de energia que se podiam extrair do material piezoelétrico, aplicando várias velocidades de vento similares para cada configuração, até ao software para a aquisição de dados.

O funcionamento do circuito eléctrico foi baseado num quarto de ponte de *Wheatstone* e uma vez que o transdutor piezoelétrico utilizado foi um Compósito de Macro Fibras (*Macro Fibre Composite* ou MFC), utilizou-se um conversor que combina a impedância, a tensão de saída e a colheita de energia deste tipo de material, para um melhor rendimento.

O estudo compara as três configurações, verificando em qual se obtém maior quantidade de energia, bem como uma melhor optimização construtiva.

Do trabalho conclui-se a viabilidade deste tipo de tecnologia como uma alternativa aos tradicionais aerogeradores eólicos, não só pelo seu desempenho mas também devido à sua aplicabilidade em telhados ou fachadas de edifícios e à facilidade da criação de matrizes, extrapolando o número de colectores.

Palavras-chave: Transdutores piezoelétricos, Extensómetro, Amplitudes de Vibração, Quarto de Ponte de *Wheatstone* e Recolha de Energia

Abstract

In the present work the feasibility of piezoelectric transducers is studied in order to apply those transducers to collect energy from the wind-induced vibrations. The vibrations are obtained in cantilevered beam elements with an oscillating body at the free end. The bending of the beam is the source to obtain electric energy.

For this purpose it was developed a laboratory prototype in three different configurations. The variations consist in the length of the beam and the thickness of the oscillatory body (quadrangular prism made of polyester extruded, XPS).

A strain gage was placed on each beam, on the opposite side of the piezoelectric transducer, to measure the amplitude of the bending during the vibrations.

The experimental system includes the wind tunnel, as well as, software for data acquisition. The measurements were done at a varying wind speed. The speed was controlled by a frequency control of the blower.

The operation of the energy harvesting circuit is based on the Macro Fibre Composite (MFC) piezoelectric transducer and the measurement of the amplitudes are executed by a quarter-bridge Wheatstone tensiometer measuring instrument.

The study compares the three configurations of the harvester, in order to verify in which version the obtained energy is higher and the efficiency is optimized.

This work concludes that this technology is viable and may serve as an alternative to the conventional windmill generators. This method is preferable not only due to its better performance but also because of possibility to apply it on roofs or facades of buildings, making possible the creation of arrays of many harvesters together.

Keywords: Piezoelectric Transducers, Strain gage, Amplitudes of Vibration, Quarter-bridge Wheatstone and Energy Harvesting

Índice de Matérias

1.	Introdução	1
2.	Estado da Arte	3
2.1.	Energia Eólica	3
2.2.	Energia Eólica Não Convencional	3
3.	Fundamentos Teóricos	7
3.1.	Piezoelectricidade	7
3.1.1.	Propriedades Piezoelétricas	9
3.1.2.	Coeficientes piezoelétricos	10
3.1.3.	Coeficientes de acoplamento k	11
3.1.4.	Circuito equivalente	11
3.1.5.	Materiais piezoelétricos para recolha de energia	15
3.1.6.	Colector de Energia Mecânica com fibras piezoelétricas	16
3.2.	Vibrações Mecânicas	18
3.2.1.	Equação do movimento de vibrações livres	18
3.2.2.	Amortecimento e ressonância	19
3.2.3.	Sistemas de vibração em vigas	20
3.2.4.	Flexão transversal da viga	20
4.	Procedimento experimental	23
4.1.	Montagem Experimental	23
4.2.	Medição da amplitude de vibração	26
4.3.	Controlo de valores de vento	32
5.	Resultados Experimentais	35
6.	Discussão de Resultados	45
7.	Conclusão e Trabalho Futuro	49
8.	Referências Bibliográficas	51

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Turbinas eólicas de eixo horizontal (direita) e de eixo vertical (esquerda) [6].....	3
Figura 2.2 – Paraquedas turbinado, ligado a um gerador [7].....	4
Figura 2.3 – Tecnologia Flower Power [9].....	4
Figura 2.4 – Tecnologia Windstalk [10]	5
Figura 2.5 – Secções transversais; a) Secção da base da vara; b) Secção da vara; c) gerador [10] ...	5
Figura 2.6 – Vibro-wind aplicado em edifícios [14].....	6
Figura 3.1 – Pierre e Jacques Curie, 1880 [16].....	7
Figura 3.2 – Modelos moleculares; a) molécula não perturbada; b) molécula sujeita a uma força externa, e c) efeito de polarização na superfície do material [17]	8
Figura 3.3 - Polarização do material piezoeléctrico [18]	8
Figura 3.4 – Exemplo de efeitos piezoeléctricos [18].....	9
Figura 3.5 - a) Representação esquemática dos dipolos eléctricos de um material piezoeléctrico; b) Efeito piezoeléctrico directo; c) Efeito piezoeléctrico inverso [17]	9
Figura 3.6 – Resposta segundo as variáveis ij [18].....	11
Figura 3.7 – Exemplo de terminologia utilizada nos coeficientes piezoeléctricos.....	11
Figura 3.8 – Circuito eléctrico equivalente [21]	12
Figura 3.9 - Variação da impedância consoante a frequência e mudança do ângulo de fase [22]	12
Figura 3.10 – Dispositivo piezoeléctrico como gerador de energia eléctrica	13
Figura 3.11 – Representação esquemática do dispositivo piezoeléctrico utilizando um rectificador ..	13
Figura 3.12 – Compensação da impedância do dispositivo piezoeléctrico.....	14
Figura 3.13 - Constituição estrutural do MFC [20]	16
Figura 3.14 - Estrutura dos piezoeléctricos MFC [20]	16
Figura 3.15 - Modos operacionais do MFC [23]	17
Figura 3.16 – Tipos de deformações do MFC [24].....	17
Figura 3.17 – Diferentes modelos de MFC, da esquerda para a direita, matrizes de sensores/actuadores, matrizes personalizadas, MFC em estrela e MFC triangular [24]	17
Figura 3.18 – Tipos de amortecimento.....	20
Figura 3.19 – Forças implícitas na flexão da viga [21]	21
Figura 4.1 - Protótipo vibro-vento	23
Figura 4.2 – Conjunto de viga encastrada com corpo oscilante	23
Figura 4.3 - Configurações	24
Figura 4.4 – Posicionamento da célula piezoeléctrica [20]	24
Figura 4.5 - Célula MFC - modelo M8528 P2 [24].....	25
Figura 4.6 – Efeito d_{31} [24]	25
Figura 4.7 – Conversor referente ao modelo M8528 – P2 [24].....	26
Figura 4.8 - Sensor de deformação “strain gage” em conjunto com um quarto de ponte de “Wheatstone”, com um extensómetro passivo (dummy) [26].....	27
Figura 4.9 - Exemplo de extensómetro [27]	28

Figura 4.10 – a) Viga encastrada e b) Viga encastrada em vibração livre [28]	28
Figura 4.11 – Flexão da viga	29
Figura 4.12 – Distância ao encastramento	31
Figura 4.13 - Extensómetro junto do encastramento da viga, à esquerda e extensómetro passivo que foi colocado na proximidade da viga, à direita	31
Figura 4.14 - Sistema de aquisição de dados	32
Figura 4.15 – Túnel de vento	32
Figura 4.16 – Quadro de comando electrónico e quadro eléctrico	33
Figura 4.17 – Curva de calibração entre a velocidade do vento e a frequência de controlo	33
Figura 4.18 – Década de resistências em baixo e osciloscópio em cima	34
Figura 5.1 – Amplitudes de vibração para velocidades de 7 m/s	35
Figura 5.2 – Amplitudes de vibração para velocidades de 8 m/s	36
Figura 5.3 – Amplitudes de vibração para velocidades de 9 m/s	36
Figura 5.4 – Amplitudes de vibração para velocidades de 11 m/s	37
Figura 5.5 - Década de resistências	38
Figura 5.6 - Osciloscópio	39
Figura 5.7 - Registos do osciloscópio para ventos de 7 m/s. a) 1ª Configuração; b) 2ª Configuração e c) 3ª Configuração	39
Figura 5.8 - Registos do osciloscópio para ventos de 8 m/s. a) 1ª Configuração; b) 2ª Configuração e c) 3ª Configuração	39
Figura 5.9 - Registos do osciloscópio para ventos de 9 m/s. a) 1ª Configuração; b) 2ª Configuração e c) 3ª Configuração	40
Figura 5.10 - Registos do osciloscópio para ventos de 11 m/s. a) 1ª Configuração; b) 2ª Configuração e c) 3ª Configuração	40
Figura 5.11 - Gráfico da potência em função da resistência de carga referente à 1ª configuração	42
Figura 5.12 - Gráfico da potência em função da resistência de carga referente à 2ª configuração	42
Figura 5.13 – Gráfico da potência em função da resistência de carga referente à 3ª configuração ...	43
Figura 6.1 - Gráfico da amplitude de vibração em função da velocidade do vento	45
Figura 6.2 - Gráfico da potência em função da velocidade do vento	46
Figura 6.3 – Gráfico da amplitude de vibração em função da potência produzida	47

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Dispositivos piezoelétricos disponíveis no mercado (adaptado de [23]).....	15
Tabela 4.1 – Informação do fabricante para o modelo [24].....	25
Tabela 5.1 – Determinação das velocidades do vento em m/s	35
Tabela 5.2 – Potência produzida	41

Lista de Símbolos

Toda a simbologia presente neste documento encontra-se definida localmente. Contudo, apresenta-se de seguida a lista com os principais símbolos utilizados.

Nomenclatura em Latim

a	Distância do extensómetro até ao encastramento [mm]
A	Amplitude máxima do movimento oscilatório [mm]
A,B	Constantes de integração [adimensional]
b	Largura da viga [mm]
c	Coefficiente de amortecimento do sistema [N/s]
C₁ e C₂	Constantes de integração [adimensional]
d	Coefficiente de acoplamento piezoeléctrico [C/N]
d_{ij}	Constante de deformação [C/N]
D	Densidade de fluxo eléctrico [C/m ²]
E	Campo eléctrico [N/C]; Módulo de Young ou módulo de elasticidade [N/m ²]
f_a	Frequência natural de oscilação em paralelo [Hz]
f_r	Frequência natural de oscilação em série [Hz]
f	Frequência de vibração [Hz]
F₀	Amplitude da força de excitação [mm]
g_{ij}	Constante de potencial [(V/m)/(N/m ²)]
GF	Factor de calibração [adimensional]
h	Altura da viga [mm]
I	Momento de inércia da secção transversal [kg·m ²]
k	Coefficiente de rigidez do sistema [N/m]
k_{ij}	Coefficiente de acoplamento electromecânico [C/N]
L	Comprimento inicial da viga [mm]
m	Massa do sistema [kg]
M	Momento flector [N.m]
P	Potência [mW]; Carga pontual [N]
R	Resistência [Ω]
R_i	Resistência dos fios [Ω]
S	Extensão [adimensional]

S^e	Deformabilidade [m^2/N]
t_s	Tempo total do ensaio ou largura da janela do osciloscópio [s]
t	Tempo [s]
t_{ON}	Tempo em máxima tensão de saída [s]
t_{OFF}	Tempo sem tensão de saída [s]
T	Pressão mecânica [N/m^2]; Período de vibração [s]
U	Tensão [V]
U_0	Saída diferencial de tensão eléctrica [V]
U_i	Tensão eléctrica de excitação [V]
V	Velocidade do vento [km/h]
X	Deslocamento da massa [mm]; Amplitude de vibração livre [mm]; Coordenada ao longo do eixo longitudinal [mm]
x'	Distância ao encastramento [mm]
\dot{x}	Velocidade da massa [m/s]
\ddot{x}	Aceleração da massa [m/s^2]
x_0	Deslocamento inicial do sistema [mm]
\dot{x}_0	Velocidade inicial do movimento [m/s]
$y(0)$	Flecha da viga [N]
$y'(0)$	Inclinação da extensão [rad]

Nomenclatura Grega

ε	Extensão longitudinal [adimensional]
ε^T	Permitividade da célula piezoeléctrica [F/m]
α	Distância do extensómetro ao encastramento [mm]
ζ	Constante de amortecimento [adimensional]
θ	Ângulo de deslocamento [rad]
σ	Tensão mecânica no material [N/m^2]
φ_d	Ângulo de fase devido à resposta do sistema [rad]
ψ	Ângulo de fase da excitação [rad]
ω	Frequência de excitação [Hz]; Frequência angular [Hz]
ω_d	Frequência natural amortecida [Hz]
ω_n	Frequência natural não amortecida [Hz]
ΔL	Varição do comprimento da viga [mm]
ΔR	Varição da resistência [Ω]

Abreviaturas

AQS	Aquecimento de águas sanitárias
CO₂	Dióxido de Carbono
CPC	Colectores parabólicos compostos
GEE	Gases com efeito de estufa
H₂O	Água
MFC	<i>Macro Fibre Composite</i> (Compósito de Macro Fibras)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica)
PVC	Cloreto de polivinil
O₂	Oxigénio
XPS	Poliestireno extrudido

1.Introdução

Com o aumento da população e das suas necessidades veio-se verificar como consequência um aumento das carências energéticas, dando origem ao que se pode chamar de “crise energética”.

A reflexão desta crise ao longo dos tempos tem como principal e maior causa, o facto da humanidade em geral ser uma grande consumidora de energia, muitas das vezes consumindo mais do que realmente necessita e conseqüentemente explorando as fontes de energia não renováveis, como o carvão, o gás natural e o petróleo, mais do que podem ser produzidas pela Natureza para que haja um equilíbrio perfeito.

Para além do previsto esgotamento deste tipo de recursos energéticos a médio e longo prazo, os mesmos contribuem, através da sua combustão, para produtos poluentes e tóxicos prejudiciais não só para o meio ambiente, como para a saúde humana.

A energia tornou-se um factor condicionante dos futuros modelos de desenvolvimento socioeconómicos e satisfazer a procura da mesma no local e momento em que é necessária e sob a forma adequada é actualmente um dos principais paradigmas com que a sociedade é confrontada no decorrer deste século [1], embora actualmente já haja uma maior capacidade e facilidade em transformar e utilizar a energia de uma forma sistemática [2]. Sendo assim, no sentido de reduzir a energia proveniente de fontes não renováveis originou-se a definição de estratégias de intervenção, onde estão presentes, no topo da lista, as energias renováveis.

O consumo de electricidade está a crescer mais depressa do que qualquer outra forma de energia, e por isso, o desafio é conseguir diminuir os impactos negativos ao mesmo tempo que se satisfaz a crescente necessidade energética mantendo a relação custo/benefício ao nível da dos combustíveis fósseis aliado à necessidade de controlo das emissões de CO₂ para a atmosfera e pela sustentabilidade resultante duma maior segurança ao nível do abastecimento e da acessibilidade [3].

Dentro das energias renováveis existem variadas tecnologias consideradas como uma alternativa ao modelo energético tradicional, tanto pela sua disponibilidade presente e futura, como pelo menor impacte ambiental. Das diversas formas de energias renováveis desenvolvidas até então, as mais utilizadas em Portugal são, a energia geotérmica, a energia hídrica, a energia solar e a energia eólica.

De todas as tecnologias associadas às energias renováveis, a produção de electricidade através do vento é sem dúvida uma das tecnologias mais maduras a nível mundial, contudo, considerando as turbinas eólicas convencionais, têm surgido questões e preocupações quanto ao seu impacte ambiental e desta forma surge uma necessidade de explorar novas formas de colher a energia do vento através de outro tipo de dispositivos que não sejam os aerogeradores, pois no mercado da energia, factores a longo prazo como o crescente aumento anual do consumo de energia, a necessidade de substituir a infraestrutura de energia antiga e inflexível e a colocação do sistema de energia global numa base sustentável, são a causa da actual optimização contínua do sistema. Por trás dessa optimização há uma infraestrutura de rede inteligente (*Smart Grid*). Sendo

que o uso de redes inteligentes envolve a instalação de sensores nas linhas da rede de energia eléctrica e uma vez que o aproveitamento do potencial eólico pode ser realizado com recurso à energia piezoeléctrica, é interessante estudar a recolha de energia para baixos consumos. De igual forma, hoje é essencial aproximar as tecnologias do consumidor final. No caso dos computadores, por exemplo, quando foram desenvolvidos, eram máquinas de grandes dimensões que através da evolução tecnológica, foram diminuindo no seu tamanho ao mesmo tempo que era melhorado o seu desempenho, criando e reinventando novas funções. O mesmo começa a acontecer no mercado da energia. É cada vez mais importante o desenvolvimento de tecnologias capazes de aproveitar a energia cinética do vento, transformando-a em energia eléctrica mas para consumos de baixas potências.

Como tal, o objectivo geral deste trabalho é o estudo do potencial de aproveitamento da energia eólica a partir de elementos piezoeléctricos colocados em sistemas vibrantes. Dentro das diferentes possibilidades foi decidido utilizar um sistema de uma viga em consola com uma massa na extremidade que será excitada pela acção do vento.

Para uma melhor compreensão da presente dissertação, a mesma será composta essencialmente por seis capítulos, sendo estes as linhas condutoras deste trabalho.

No primeiro capítulo será feita uma descrição do estado da arte relativa ao aparecimento da produção de energia eléctrica através das vibrações induzidas pelo vento, o segundo capítulo refere os fundamentos teóricos utilizados no decorrer desta investigação, referenciando noções sobre piezoelectricidade, vibrações mecânicas e amplitudes de vibração. O terceiro capítulo explica o procedimento experimental. No quarto capítulo são apresentados os resultados experimentais relativos às amplitudes de vibração e às potências produzidas, onde é feita no quinto capítulo uma análise dos valores obtidos. Finalmente no sexto capítulo tiram-se as principais conclusões desta dissertação relatando futuras investigações no âmbito deste trabalho.

2. Estado da Arte

2.1. Energia Eólica

A energia eólica é a produção de energia eléctrica através da conversão de energia cinética do vento com recurso a um aerogerador, que é o conjunto de turbina eólica mais gerador. As diferenças de pressão atmosféricas causadas pelo aquecimento diferencial terrestre provocam massas de ar, sendo a deslocação dessas mesmas massas de ar o que representa o vento [4].

É um fenómeno influenciado pelas diferenças de temperatura ou de humidade, que resultam das condições locais onde se encontram as massas de ar, sendo estas a rugosidade do solo, o mar aberto, orografia, entre outros e enquanto recurso energético, tal como foi referido na energia oceânica, a energia proveniente do vento possui uma característica muito importante que é a sua variabilidade, tanto temporal como geograficamente, manifestando-se em diferentes escalas de tempo e de espaço [5].

O aerogerador faz accionar um alternador que, como o próprio nome indica, transforma a energia cinética do vento em energia eléctrica (em corrente alternada ou em corrente contínua), que pode ser injectada na rede eléctrica directamente ou armazenada em acumuladores. Segundo a Lei de Betz, proposta pelo físico Albert Betz (1919), da energia cinética disponível apenas 59% é convertível em energia mecânica [5].

Os dois tipos correntes de aerogeradores possuem um eixo de rotação, horizontal ou vertical, em que os de eixo horizontal são os mais comuns e em geral, constituídos por três pás. Os de eixo vertical têm a vantagem de ser insensíveis à direcção do vento, mas têm a desvantagem de necessitarem de um motor auxiliar para o arranque [4].

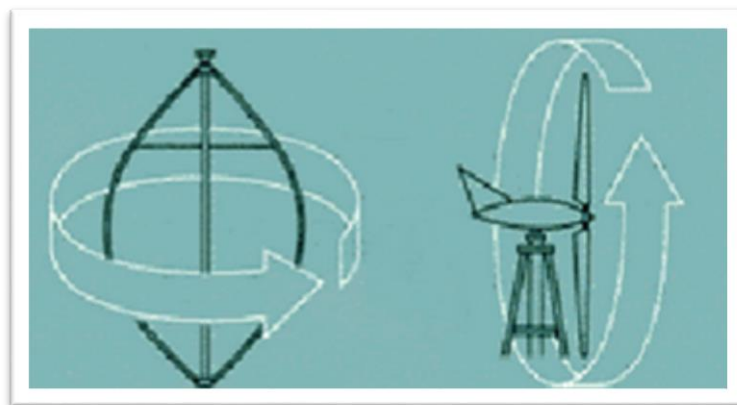


Figura 2.1 - Turbinas eólicas de eixo horizontal (direita) e de eixo vertical (esquerda) [6]

2.2. Energia Eólica Não Convencional

Quando se faz referência ao aproveitamento do potencial eólico, normalmente está a considerar-se a conversão da energia cinética do vento em energia mecânica e posteriormente em

energia eléctrica, a qual se processa, como se referiu, num gerador rotativo, embora na última década se ter vindo a assistir a um aumento de estudos, publicações e protótipos para captar a energia do vento por outros meios, como por exemplo:

- Papagaios ou paraquedas turbinados – que seguem o mesmo princípio dos desportos aquáticos, como o *kite surf*, em que o surfista usa o seu paraquedas para impulsionar a prancha. O movimento do papagaio provocado pelo vento, em alturas até 330 m, acciona um gerador móvel que transforma a energia cinética em energia eléctrica, girando continuamente em circuito fechado [7] e [8].



Figura 2.2 – Paraquedas turbinado, ligado a um gerador [7]

- *Flower Power* – é um equipamento desenvolvido na Holanda, em forma de árvore, constituído por um tubo de aço com ramos na parte superior. Nesses ramos estão instaladas mini turbinas de eixo vertical, sendo cada ramo composto por 3 a 12 turbinas. Embora sejam menos eficientes do que as turbinas eólicas convencionais, ao serem mais leves e de menor dimensão, podem ser instaladas em zonas urbanas, aproximando a tecnologia aos consumidores finais [9].



Figura 2.3 – Tecnologia *Flower Power* [9]

- *Windstalk* – A ideia é similar a um campo de trigo que balança ao sabor do vento. Este projecto consiste na instalação de varas em compósito de carbono onde são incorporadas fibras piezocerâmicas, com 55 metros de altura, ancoradas ao solo. Pela acção do vento, os dispositivos piezocerâmicos são comprimidos, gerando energia eléctrica que é colectada em dispositivos externos através de conversores adequados [10].



Figura 2.4 – Tecnologia *Windstalk* [10]

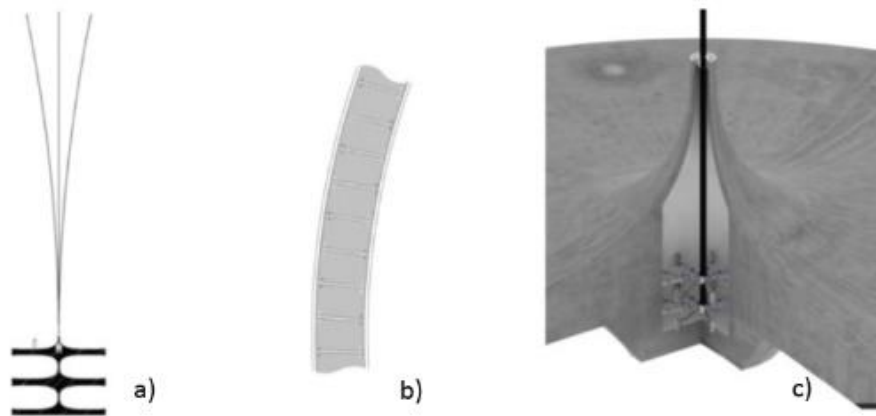


Figura 2.5 – Secções transversais; a) Secção da base da vara; b) Secção da vara; c) gerador [10]

A piezoelectricidade foi descoberta, em 1880, em França pelos irmãos Pierre e Jacques Curie, ao estudarem o efeito da pressão na geração de uma tensão eléctrica através de cristais [11].

A piezoelectricidade caracteriza-se pela produção de cargas eléctricas pela deformação de cristais, gerando uma subida de tensão eléctrica nos seus terminais. Este fenómeno é reversível, pois impondo uma tensão nos terminais dos cristais eles deformam em conformidade [11].

Este fenómeno permite a conversão de energia cinética em eléctrica através das deformações mecânicas provocadas pelas forças do vento numa determinada estrutura. Dado que as estruturas são sistemas elásticos as deformações produzidas pelas forças do vento não são estáticas e produzem vibrações nos sistemas, à semelhança de um sistema massa-mola-amortecedor [12]. É nisto que se baseia o sistema *vibro-wind* desenvolvido na Universidade de Cornell, USA [13].

O painel de osciladores desenvolvido por esta equipa consiste num conjunto de vigas em consola com uma massa na extremidade livre, que expostas ao vento vibram transversalmente [14].

Segundo Francis Moon [15], o painel de vinte e cinco osciladores ocupando um metro quadrado de área e a funcionar com velocidades do vento de 2 a 3 m/s, pode gerar energia eléctrica com potência até 54 W, que é semelhante à energia produzida por um painel solar com a mesma área [13].

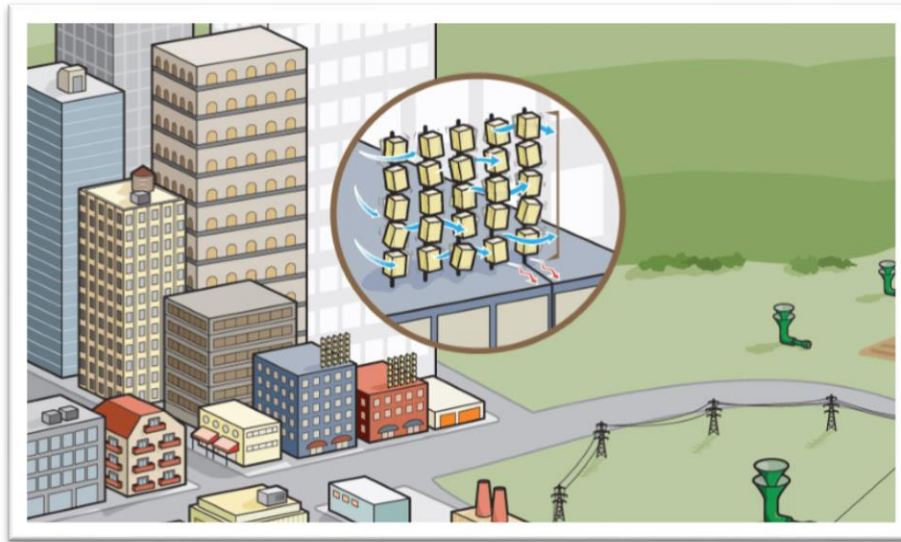


Figura 2.6 – Vibro-wind aplicado em edifícios [14]

3. Fundamentos Teóricos

O estudo efectuado baseia-se na viabilidade da utilização de transdutores piezoelétricos para a recolha de energia proveniente das vibrações induzidas pelo vento em elementos de viga em consola com um corpo oscilante na extremidade livre, segundo a oscilação de flexão induzida e, para tal, foi desenvolvido, em laboratório, um protótipo com três configurações diferentes de viga mais corpo oscilatório, onde foi colocado também, para além do transdutor piezoelétrico, um extensómetro, junto ao encastramento da viga, para medir a flexão da mesma, de forma a serem obtidas as amplitudes de vibração.

Para um melhor entendimento da metodologia experimental é necessário rever alguns conceitos teóricos.

3.1. Piezoelectricidade

A piezoelectricidade deriva da palavra grega “piezein”, que significa, na mais moderna terminologia, “pressionar” e foi descoberta pelos irmãos Curie, Pierre e Jacques, figura 3.1, em 1880, em França, enquanto estudavam o efeito da pressão na geração de carga eléctrica através de cristais [11]. Na altura foi considerada uma grande descoberta, sendo rapidamente apelidada de piezoelectricidade, de maneira a distingui-la de outros fenómenos como a piroelectricidade (electricidade gerada nos cristais pelo calor) ou a electricidade electroestática [11].

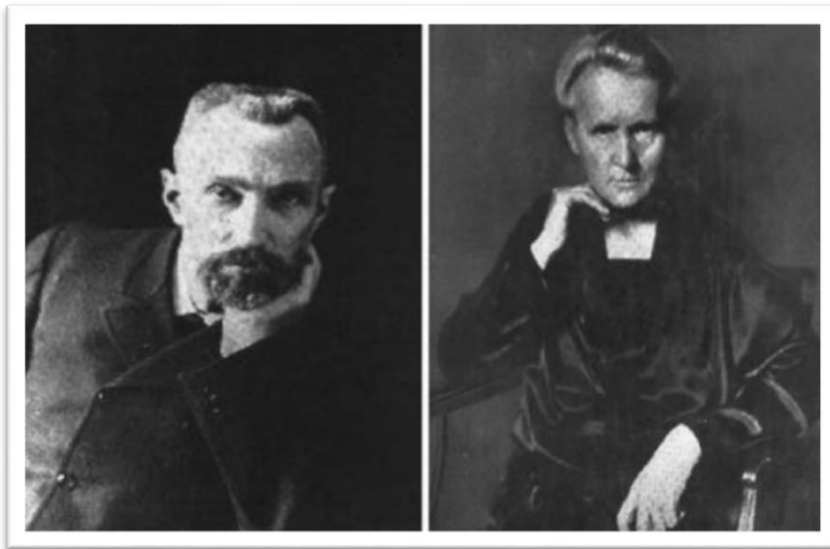


Figura 3.1 – Pierre e Jacques Curie, 1880 [16]

Chama-se efeito piezoelétrico à capacidade que alguns materiais têm de gerar uma tensão em resposta a uma tensão mecânica. É um efeito reversível.

Para uma melhor compreensão do efeito piezoelétrico, a figura 3.2, mostra um modelo molecular simples baseado nas variações da polarização do material.

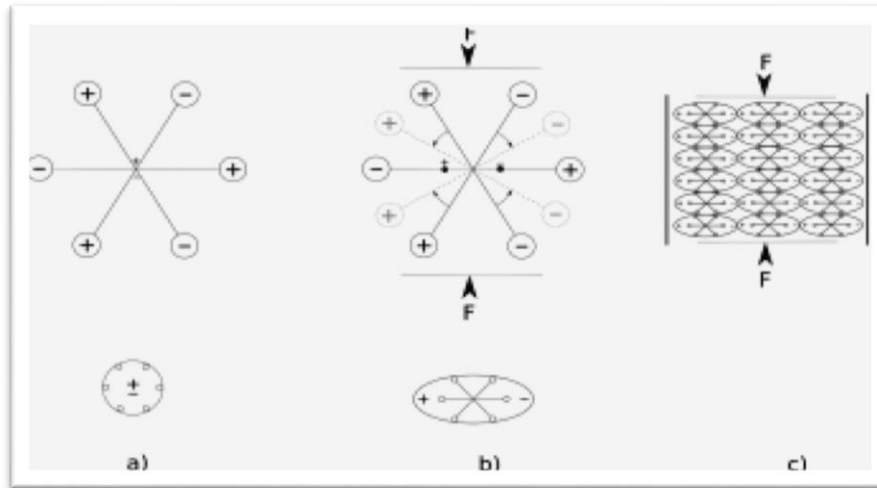


Figura 3.2 – Modelos moleculares; a) molécula não perturbada; b) molécula sujeita a uma força externa, e c) efeito de polarização na superfície do material [17]

Na figura 3.2a vê-se que antes do material ser submetido a uma força externa, o centro de gravidade das cargas negativas e positivas coincidem em cada molécula, sendo o efeito das mesmas cancelado mutuamente, dando origem a uma molécula electricamente neutra. Quando o material é pressionado, a estrutura molecular sofre uma deformação, provocando a separação dos centros de gravidade das cargas negativas e positivas, aparecendo pequenos dipolos (figura 3.2b). É gerada à superfície do material uma distribuição de cargas (figura 3.2c), ficando a polarização desse mesmo material completa. Concluída a polarização, gera-se um campo eléctrico que pode ser usado na transformação da energia mecânica em energia eléctrica, através da deformação do material [17].

Para a produção do efeito piezoeléctrico, os momentos dipolares, devem ainda, ser alinhados sob o efeito de um campo eléctrico forte, campo este, que força todos os dipolos do cristal a alinharem, preferencialmente, na direcção e sentido do campo aplicado (figura 3.3) [18].

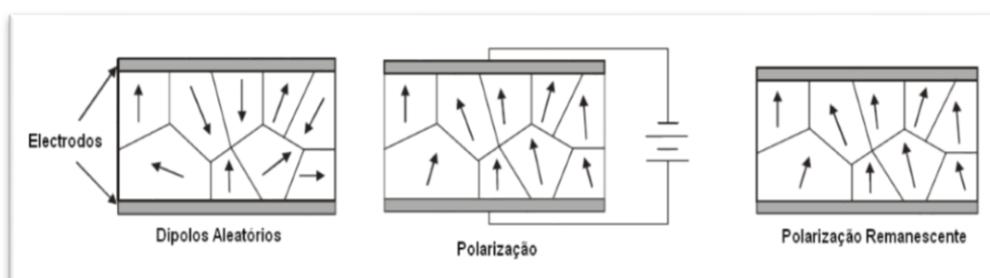


Figura 3.3 - Polarização do material piezoeléctrico [18]

O efeito piezoeléctrico pode ser observado de diversas maneiras. Segundo a figura 3.4a verifica-se o material piezoeléctrico quando não está sujeito a nenhum campo eléctrico nem a nenhuma força, em b) mostra que quando há compressão, surge uma tensão eléctrica que tem o sentido do eixo de polarização e em c) observa-se que durante a tracção a tensão gerada tem o sentido inverso ao do eixo de polarização. De igual modo, em d) ao ser aplicada uma tensão com o sentido inverso ao dos eixos de polarização o material vai expandir, ao contrário de e) em que a

mesma tensão ao ser aplicada no sentido do eixo de polarização o material comprime-se, por outro lado, pode-se constatar que, se a tensão aplicada for variável, por exemplo sinusoidalmente, o material vibra com uma frequência igual à do sinal, como pode ser visto em f) [18].

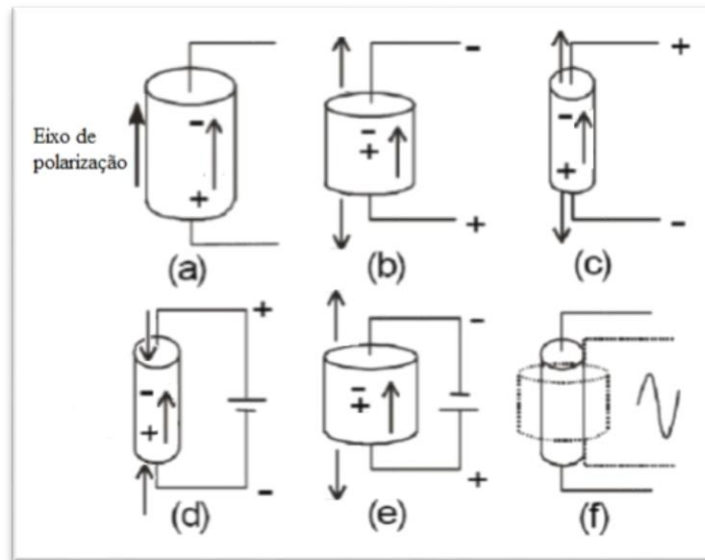


Figura 3.4 – Exemplo de efeitos piezoelétricos [18]

Resumindo, por alteração do seu estado mecânico ou elétrico, os materiais piezoelétricos têm características que lhes permite gerar energia mecânica ou elétrica, respectivamente, considerando-se como efeitos principais, o efeito piezoelétrico directo (figura 3.5b) e o efeito piezoelétrico inverso (figura 3.5c), em que o directo é a geração de energia elétrica quando sujeito a um estado de tensão mecânica e o inverso corresponde a uma deformação mecânica quando submetido a uma tensão elétrica.

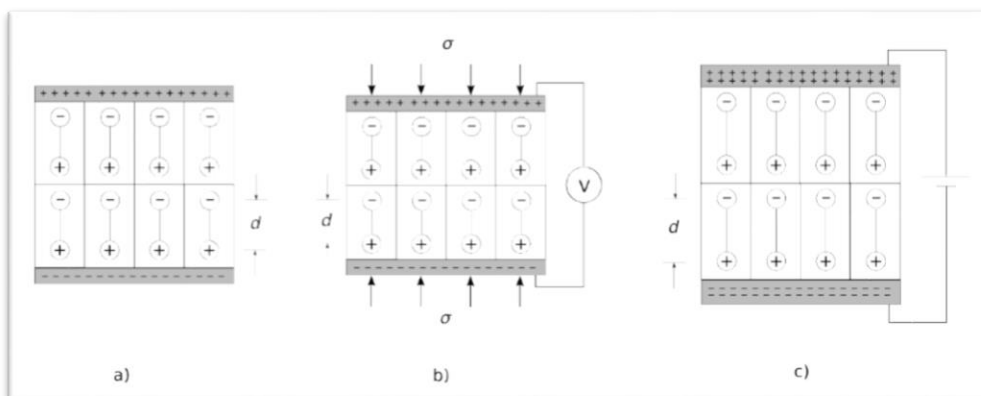


Figura 3.5 - a) Representação esquemática dos dipolos elétricos de um material piezoelétrico; b) Efeito piezoelétrico directo; c) Efeito piezoelétrico inverso [17]

3.1.1. Propriedades Piezoelétricas

A forte interação electromecânica é traduzida segundo duas equações:

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (3.1)$$

$$S = s^E T + dE \quad (3.2)$$

Em que, D é a densidade de fluxo eléctrico [C/m²], S a extensão [adimensional], d a constante de carga piezoeléctrica [C/N], T a pressão mecânica [N/m²], E o campo eléctrico [N/C], ϵ^T a permitividade com T constante [F/m] e s^E a deformabilidade com E constante [m²/N] [18]. A equação 3.1 descreve o efeito piezoeléctrico directo, enquanto a equação 3.2 representa o efeito piezoeléctrico inverso [18].

3.1.2. Coeficientes piezoeléctricos

Existem dois tipos de coeficiente piezoeléctricos, os coeficientes piezoeléctricos “d” – constantes de deformação (equação 3.3), responsáveis pela relação entre tensão eléctrica recolhida nos eléctrodos com a tensão mecânica aplicada, e os coeficientes piezoeléctricos “g” – constantes de potencial (equação 3.4), que correspondem às constantes relacionadas com o campo eléctrico produzido por uma tensão mecânica [19].

$$d_{ij} = \frac{\text{Tensão recolhida nos eléctrodos}}{\text{Tensão mecânica aplicada}} = \frac{\text{Deformação desenvolvida}}{\text{Campo eléctrico aplicado}} \quad (3.3)$$

$$g_{ij} = \frac{\text{Campo eléctrico produzido}}{\text{Tensão mecânica aplicada}} = \frac{\text{Deformação desenvolvida}}{\text{Densidade de tensão mecânica aplicada}} \quad (3.4)$$

Os coeficientes d_{ij} são expressos em [(C/m²)/(N/m²)], que normalmente, sempre que a força aplicada seja distribuída pela área que está totalmente coberta com electrões, as unidades de área anulam-se, ficando os coeficientes apenas expressos em termos de carga por unidade de força, Coulomb por Newton [C/N]. As unidades dos coeficientes g_{ij} são expressas em Volt/metro por Newton/metro quadrado [(V/m)/(N/m²)] [19].

As variáveis ij indicam o sentido da polarização da força (figura 3.6), em que:

- $ij=33$, figura 3.6a; medição da tensão no sentido do eixo de polarização e força aplicada no mesmo sentido;
- $ij=31$, figura 3.6b; medição da tensão no sentido do eixo de polarização e força aplicada perpendicularmente a este;
- $ij=15$, figura 3.6c; medição da tensão nos sentidos perpendiculares aos eixos e a força é de torção.

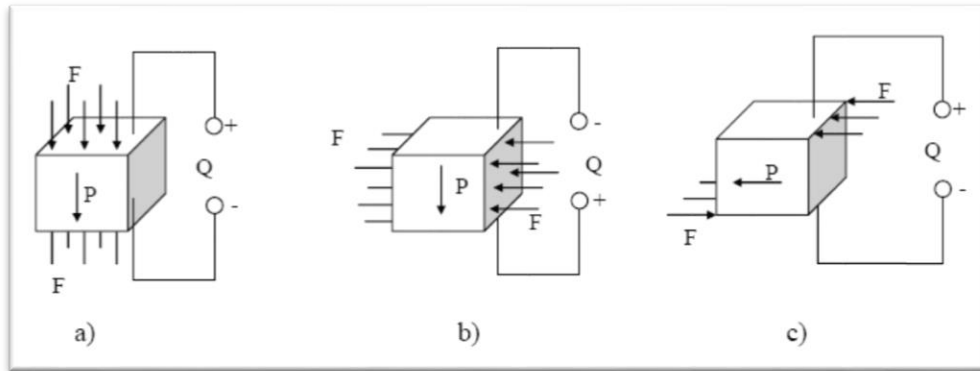


Figura 3.6 – Resposta segundo as variáveis ij [18]

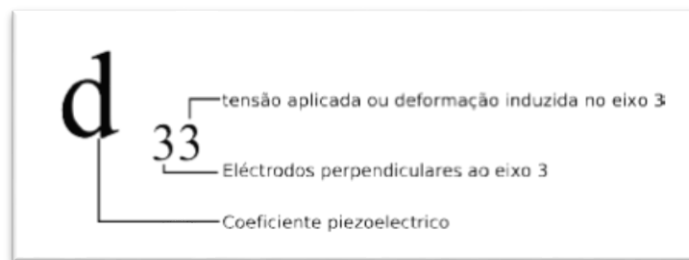


Figura 3.7 – Exemplo de terminologia utilizada nos coeficientes piezoeléctricos

3.1.3. Coeficientes de acoplamento k

O que descreve a conversão de energia através do elemento piezoeléctrico da forma mecânica para a forma eléctrica ou vice-versa é o acoplamento eletromecânico k_{33} , k_{31} , k_p e k_{15} . A relação da energia convertida é definida como o quadrado do coeficiente de acoplamento e uma vez que são quocientes entre energias, não têm dimensões [19].

$$k_{ij} = \sqrt{\frac{\text{energia mecânica armazenada}}{\text{energia eléctrica fornecida}}} \quad (3.5)$$

Fazendo a analogia aos coeficientes piezoeléctricos, os sub-índices dos coeficientes de acoplamento indicam a direcção relativa das quantidades eléctricas e mecânicas.

3.1.4. Circuito equivalente

O comportamento do material piezoeléctrico quando submetido a tensões mecânicas pode ser representado pela capacitância vista do exterior dos seus contactos eléctricos. Electricamente o comportamento é representado por um circuito mais complexo que envolve um circuito RLC em série (figura 3.8) [20].

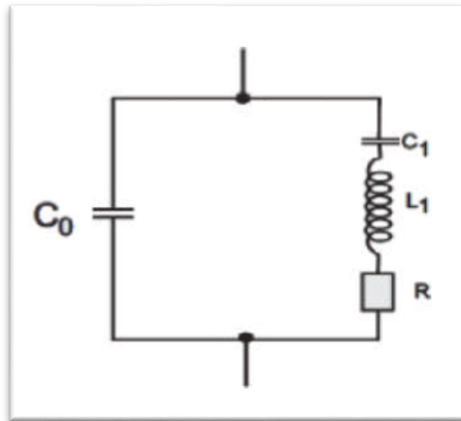


Figura 3.8 – Circuito eléctrico equivalente [21]

A ligação da indutância L1 em série com a capacitância C1 tem uma impedância muito baixa na frequência de ressonância (série), designada como f_r na figura 3.9. Existe mais uma frequência de ressonância (paralela) com impedância muito elevada, designada como f_a .

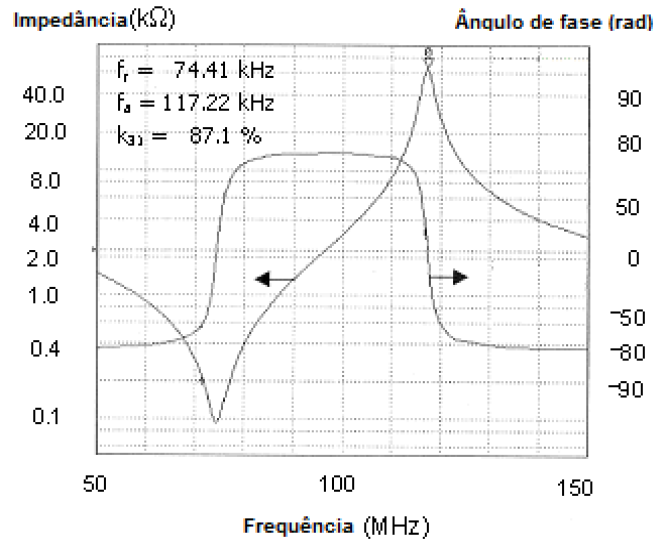


Figura 3.9 - Variação da impedância consoante a frequência e mudança do ângulo de fase [22]

Para valores de frequência inferiores a f_r e superiores a f_a , o material piezoeléctrico assume um comportamento capacitivo, para valores entre f_r e f_a tem um comportamento indutivo.

As frequências de ressonância em paralelo e série, f_a e f_r respectivamente, são determinadas pelas seguintes equações [17]:

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_0 + C_1}{L_1 C_0 C_1}} \quad (3.6)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} \quad (3.7)$$

O comportamento do dispositivo piezoeléctrico na frequência de ressonância em série pode ser representado no esquema equivalente, como fonte de corrente (figura 3.10). Na mesma figura

existe um elemento importante: a capacitância C_{par} . Esse elemento corresponde aos contactos feitos pela metalização do cristal piezoelétrico. Um outro elemento, R_{perda} , representa as perdas no dielétrico. A resistência, R_{consum} , representa o consumidor final. A tensão eléctrica aplicada sobre a resistência do consumidor final é sinusoidal, para este caso.

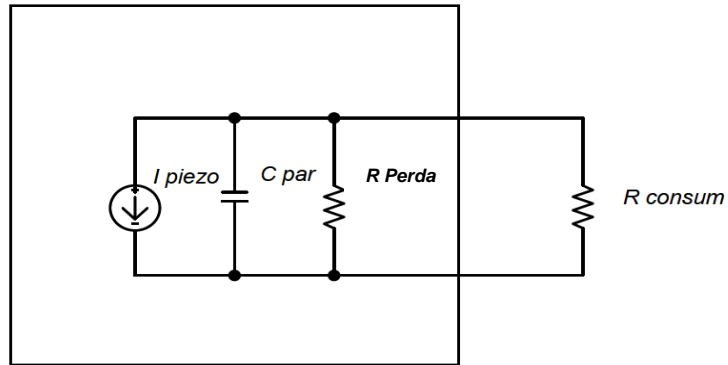


Figura 3.10 – Dispositivo piezoelétrico como gerador de energia eléctrica

Para obter a tensão continua que é exigida, geralmente, pelos dispositivos electrónicos é necessário a utilização de um retificador (figura 3.11). Nessa figura, está prevista a utilização de um conversor de potência que estabiliza os parâmetros da energia eléctrica apresentada ao consumidor. Neste caso, existe um consumo interno do conversor que não pode ser desprezado.

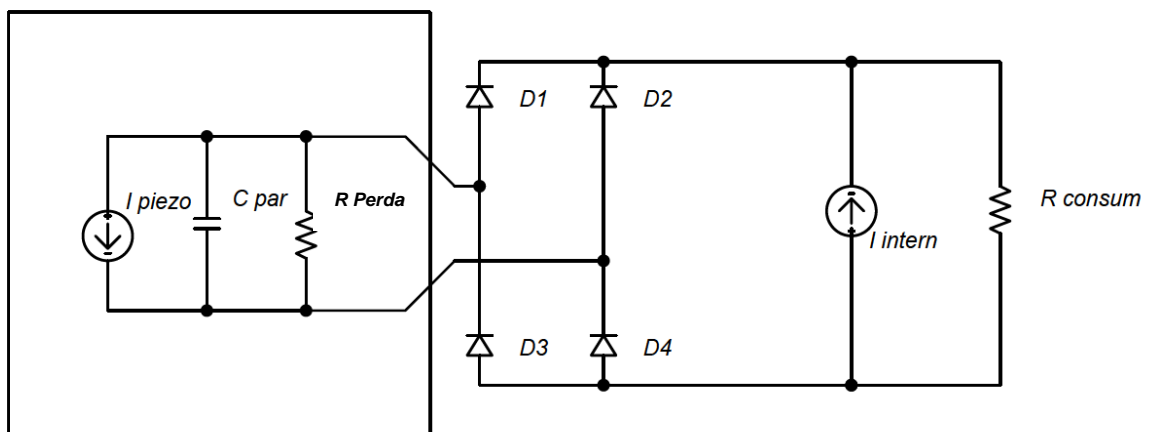


Figura 3.11 – Representação esquemática do dispositivo piezoelétrico utilizando um retificador

A fonte de corrente, I_{intern} , representa o consumo interno. O comportamento capacitivo devido a C_{par} deve ser compensado para obter a máxima potência na saída. Sendo assim, é necessário fazer uma adaptação das impedâncias com recurso à indutância $L1$ (figura 3.12).

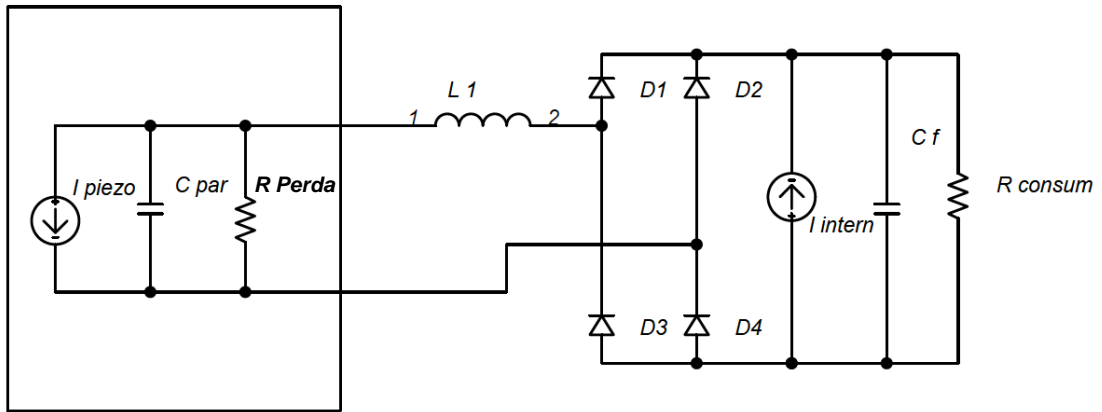



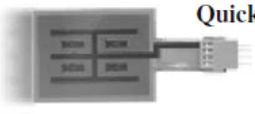

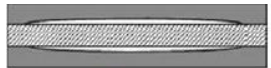



Figura 3.12 – Compensação da impedância do dispositivo piezoelétrico

3.1.5. Materiais piezoelétricos para recolha de energia

Atualmente existem disponíveis no mercado vários dispositivos piezoelétricos para diversos fins, como mostra a tabela 3.1 [23]:

Tabela 3.1 - Dispositivos piezoelétricos disponíveis no mercado (adaptado de [23])

Dispositivos piezoelétricos	Fabricante/Características
 <p>Multilayer</p>	<p><u>Exemplo de Fabricante:</u> Morgan electroceramics, APC International, Tokin, PI. <u>Características:</u> baixa frequência (~10 Hz), indicado para grandes tensões mecânicas num só sentido, fácil montagem.</p>
 <p>Macro Fiber Composite (MFC)</p>	<p><u>Exemplo de Fabricante:</u> Smart Material. <u>Características:</u> 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><u>Exemplo de Fabricante:</u> Face International. <u>Características:</u> aplicável para diversas curvaturas e pesos fornecendo uma grande amplificação da tensão mecânica, indicado para muito baixa frequência (~1 Hz).</p>
 <p>Bimorphs</p>	<p><u>Exemplo de Fabricante:</u> APC International. <u>Características:</u> ressonância ajustável entre os 5 e os 100 Hz, usado em várias aplicações como vigas oscilantes, diafragma e outros.</p>
 <p>Amplified Piezoelectric Actuator</p>	<p><u>Exemplo de Fabricante:</u> Cedrat. <u>Características:</u> altamente eficiente sobre grandes tensões mecânicas ressonâncias ajustáveis em grandes gamas (~100 Hz).</p>
 <p>QuickPack</p>	<p><u>Exemplo de Fabricante:</u> Mide. <u>Características:</u> semelhante aos bimorphs (duplos) mas mais simples de montar, grande largura de banda, amplamente usada em configuração de encastramento.</p>
 <p>Rainbow</p>	<p><u>Características:</u> superfície curva resultando num maior aproveitamento sobre uma dada tensão mecânica, pode ser empilhado para amplificar a carga.</p>
 <p>Moonie</p>	<p><u>Exemplo de Fabricante:</u> Micromechatronics.</p>
 <p>Cymbal</p>	<p><u>Características:</u> capas metálicas revestindo a parte cerâmica permitem aplicações de alta tensão mecânica, alto carregamento devido à amplificação da tensão mecânica, ressonâncias variáveis por alteração das dimensões dos revestimentos metálicos e do material.</p>

Dentro dos materiais piezoelétricos, as cerâmicas são as mais utilizadas, pois possuem

elevadas constantes dielétricas e frequências de ressonância, resultantes do seu processo de polarização [20].

No decorrer do presente trabalho, o dispositivo piezoelétrico utilizado no protótipo para a conversão de energia mecânica em energia eléctrica, foi o colector de energia mecânica com fibras piezoelétricas.

3.1.6. Colector de Energia Mecânica com fibras piezoelétricas

Mais conhecido como Compósito de Macro Fibras (MFC), este dispositivo é um sensor de alto desempenho. Na sua constituição estrutural estão presentes barras piezocerâmicas rectangulares, aplicadas entre camadas adesivas, eléctrodos e película de polamida [24].

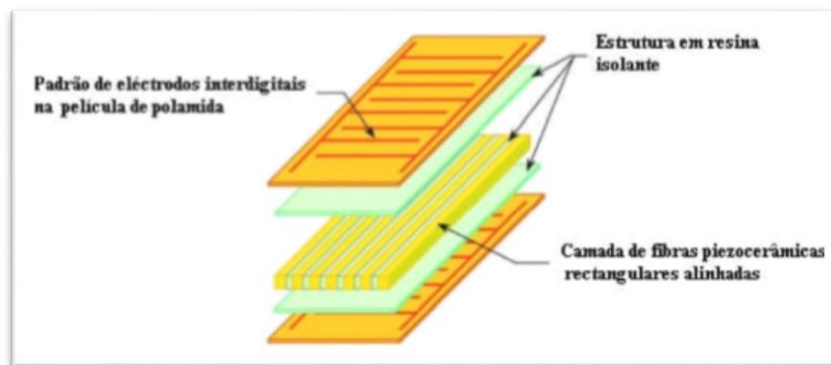


Figura 3.13 - Constituição estrutural do MFC [20]

Segundo um padrão interdigital, os eléctrodos são associados à película, que transfere a tensão eléctrica aplicada directamente nas barras em forma de fita [24].

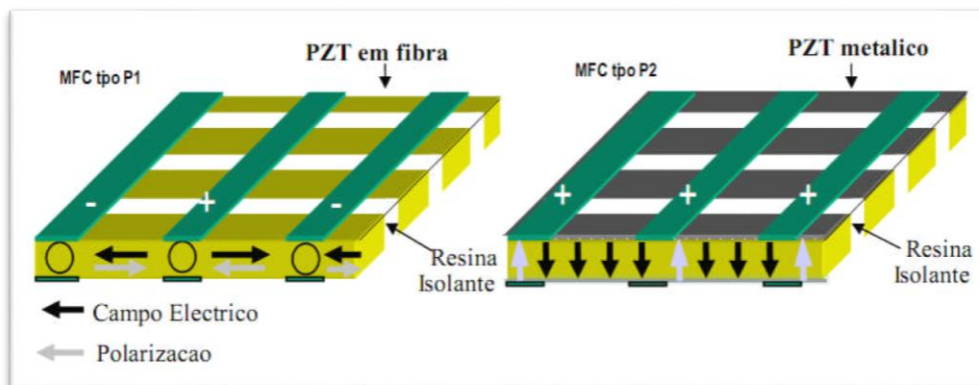


Figura 3.14 - Estrutura dos piezoelétricos MFC [20]

O MFC opera em dois modos distintos, o modo 33, característico de colectores MFC do tipo P1, e o modo 31, característico de colectores MFC do tipo P2. No modo 33 a direcção da força aplicada e a tensão gerada através da polarização do material são idênticas, enquanto no modo 31 a força aplicada é direccionada segundo o eixo perpendicular ao da polarização, como pode ser visto na figura 3.15 abaixo representada [24].

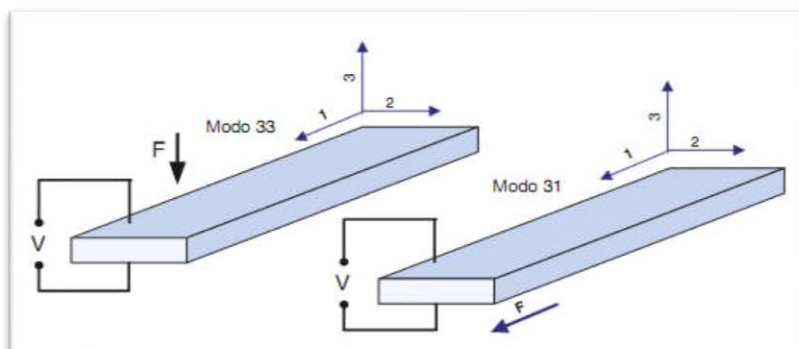


Figura 3.15 - Modos operacionais do MFC [23]

Como apresenta uma estrutura extremamente fina e ajustável, este tipo de células pode ser facilmente soldada em várias tipos de estruturas ou até mesmo em estruturas complexas.

Quando é aplicada uma tensão eléctrica sobre o material piezoeléctrico, esta dobra, deforma ou provoca vibrações no substrato do mesmo – efeito inverso [24].

Por outro lado, segundo o seu efeito directo, este tipo de células tem uma elevada sensibilidade às deformações, ao ruído e às vibrações, de onde se recolhe a energia proveniente dessas acções [24].

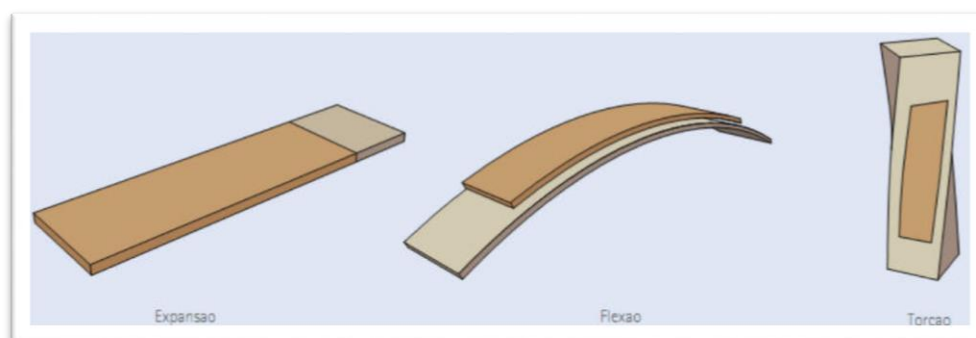


Figura 3.16 – Tipos de deformações do MFC [24]

Para terminar este capítulo, o MFC pode ter outras aplicações, como por exemplo, no controlo de vibrações na cauda e nas hélices de aviões e helicópteros, respectivamente, na captação de energia em saltos/palmilhas de sapatos ou ténis e em pavimentos piezoeléctricos.

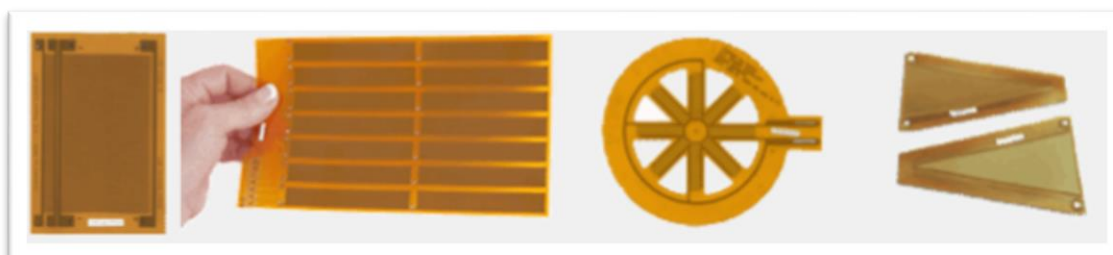


Figura 3.17 – Diferentes modelos de MFC, da esquerda para a direita, matrizes de sensores/actuadores, matrizes personalizadas, MFC em estrela e MFC triangular [24]

3.2. Vibrações Mecânicas

A vibração, de uma forma geral, é em muitos casos um desperdício de energia indesejável. Esta afirmação torna-se verdadeira, por exemplo, para o caso particular de máquinas, pois geram ruído, danos em peças e transmitem forças e movimentos menos apropriados para o bom funcionamento das mesmas.

Uma vibração pode ser classificada como:

- Livre - quando o movimento se mantém apenas devido às forças de restituição;
- Forçada - quando se aplica uma força variável no tempo;
- Amortecida - quando os efeitos do atrito não são desprezáveis;
- Não amortecida - quando os efeitos do atrito são desprezáveis.

Desta forma, a frequência natural de amortecimento é a frequência de um sistema de vibração livre com atrito não desprezável e a frequência natural não amortecida é a frequência de um sistema de vibração livre, sem atrito [25].

Para a eliminação dos efeitos adversos da maior parte das vibrações faz-se um estudo da equação do movimento, em que a primeira abordagem feita é a idealização e simplificação em termos de massa, mola e amortecedor, que determinam o corpo sujeito a vibrações, representando a elasticidade e o atrito do sistema de vibração. A equação do movimento expressa o deslocamento em função do tempo ou, por outro lado, dá a distância entre qualquer posição instantânea do corpo vibrante durante o seu movimento e a posição inicial de equilíbrio, sendo a frequência natural, que é uma propriedade de referência do sistema de vibração, obtida a partir da mesma [25].

3.2.1. Equação do movimento de vibrações livres

A vibração livre, ou seja, a vibração de um sistema mecânico com um grau de liberdade é um movimento periódico observado quando o sistema de vibração é deslocado da sua posição de equilíbrio estático considerando nula a força externa aplicada, sendo a sua equação representada por:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (3.8)$$

Em que:

m - massa do sistema;

c - coeficiente de amortecimento do sistema;

k - coeficiente de rigidez do sistema;

x - deslocamento da massa m;

$\dot{x} = \dot{x}(t) = \frac{dx}{dt}$ - velocidade da massa m;

$\ddot{x} = \ddot{x}(t) = \frac{d^2x}{dt^2}$ - aceleração da massa m.

Integrando a equação 3.8 obtem-se como solução geral:

$$x = e^{-\zeta\omega_n t}(A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t) \quad (3.9)$$

Onde:

x – amplitude de vibração livre;

ζ – constante de amortecimento;

ω_n – frequência natural não amortecida;

ω_d – frequência natural amortecida;

A, B – constantes de integração dependentes das condições iniciais do movimento.

Escrevendo a equação do movimento desta forma, são introduzidas três grandezas que usualmente são utilizadas para caracterizar o comportamento dinâmico de um sistema com um grau de liberdade, como a frequência natural não amortecida que é dada por:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.10)$$

A constante de amortecimento:

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (3.11)$$

E a frequência natural amortecida:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3.12)$$

A solução geral da equação do movimento pode também ser escrita como:

$$x(t) = A \cdot e^{-\zeta\omega_n t} \cdot \sin(\omega_d t + \phi) \quad (3.13)$$

Na equação 3.13, A é a amplitude máxima do movimento oscilatório e ϕ é o ângulo de fase da resposta, sendo definidos como:

$$A = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{\dot{x}_0 + \zeta\omega_n x_0}{\omega_d}\right)^2} \quad (3.14)$$

$$\phi_d = \tan^{-1}\left(\frac{x_0\omega_d}{\dot{x}_0 + \zeta\omega_n x_0}\right) \quad (3.15)$$

3.2.2. Amortecimento e ressonância

Os sistemas mecânicos, em geral, são sistemas amortecidos. O amortecimento, nas suas diversas formas, opõe-se ao movimento. A resposta dos sistemas às excitações externas depende do factor de amortecimento. Caso não houvesse amortecimento o sistema, a uma excitação inicial,

vibraria indefinidamente (figura 3.18 (a)). Se este for baixo, o sistema diz-se subamortecido, e vibra com uma oscilação com um decaimento gradual (figura 3.18 (b)). Se o amortecimento for elevado, o sistema diz-se sobreamortecido e não oscilará possuindo apenas um retorno à sua posição inicial em forma exponencial [25].

A ressonância ocorre quando a frequência de excitação é igual à frequência natural do sistema de vibração. Quando tal acontece, a amplitude de vibração aumentará sendo regulada apenas pela quantidade de amortecimento presente no sistema [25].

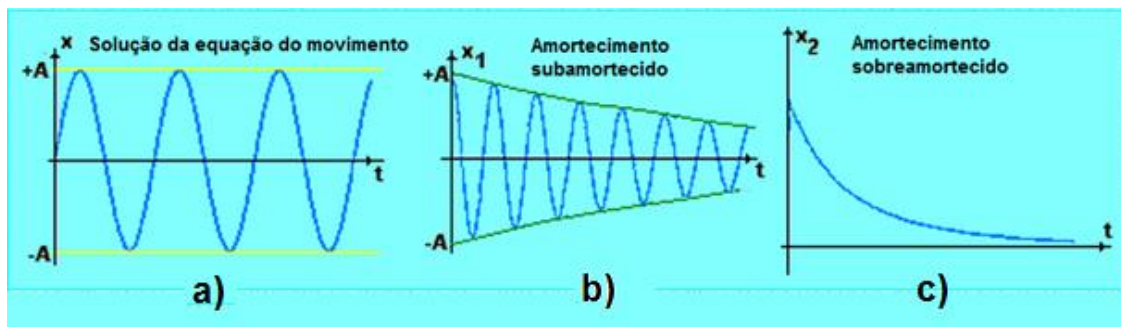


Figura 3.18 – Tipos de amortecimento

3.2.3. Sistemas de vibração em vigas

Sistemas vibracionais com massas e forças elásticas distribuídas, tais como cabos, barras, vigas, chapas, entre outros, pertencem à classe de sistemas de vibração em meios contínuos [25].

Estes sistemas são constituídos por um número infinitamente grande de partículas e, portanto, necessitam igualmente de um grande número de coordenadas para especificar as respectivas configurações. Consequentemente, os sistemas mecânicos desta classe têm um número infinito de frequências naturais e os seus modos naturais de vibração [25].

Em geral, estas vibrações são regidas por equações diferenciais às derivadas parciais, e na sua análise, todos os materiais são considerados homogêneos e isotrópicos [25].

3.2.4. Flexão transversal da viga

A equação diferencial do movimento para a flexão transversal das vigas pode ser derivada a partir da curva de deflexão de uma viga [25]:

$$EI \cdot \frac{d^2y}{dx^2} = -M \quad (3.16)$$

Em que, E é o módulo de elasticidade e I o momento de inércia, sendo EI conhecido como a rigidez à flexão da viga, M é o momento flector em qualquer secção transversal e y a deflexão da viga.

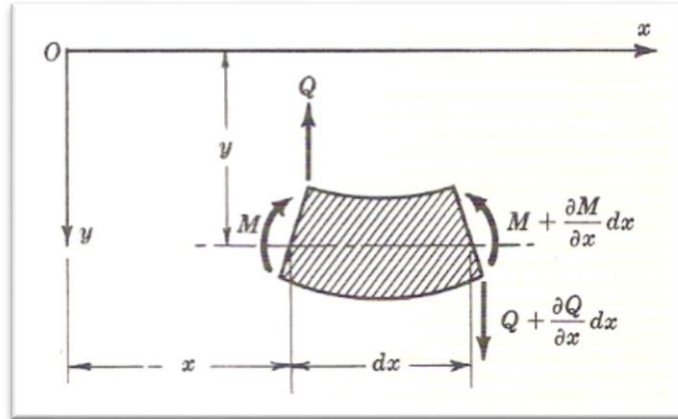


Figura 3.19 – Forças implícitas na flexão da viga [21]

4. Procedimento experimental

4.1. Montagem Experimental

O protótipo, realizado para este estudo, tem características semelhantes ao do concebido pela Universidade de Cornell [13], mas apenas com uma viga encastrada, em vez de uma matriz de vigas, de maneira a que houvesse um maior rigor e precisão dos resultados e dados obtidos, podendo no futuro, esses mesmo resultados serem calculados e extrapolados consoante o número de colectores.



Figura 4.1 - Protótipo vibro-vento

Para o estudo criaram-se três configurações distintas do conjunto viga e corpo oscilante, em que a viga encastrada de chapa metálica com 0,5 mm de espessura tinha colocado na extremidade oposta à do encastramento, um prisma rectangular de poliestireno extrudido (XPS).

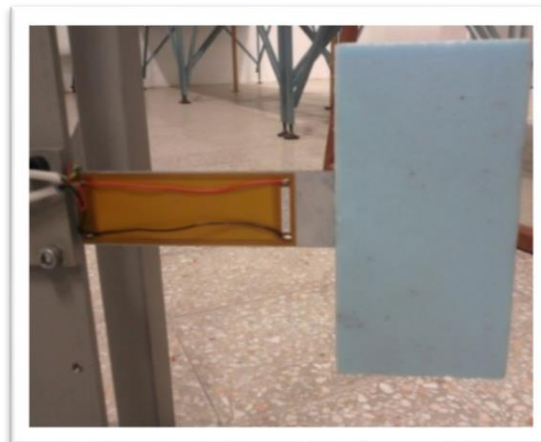


Figura 4.2 – Conjunto de viga encastrada com corpo oscilante

Nas configurações as variáveis foram, a largura do corpo oscilante (2ª configuração, figura

4.3) e o comprimento da viga (3ª configuração, figura 4.3), sendo a 1ª configuração considerada como a original.

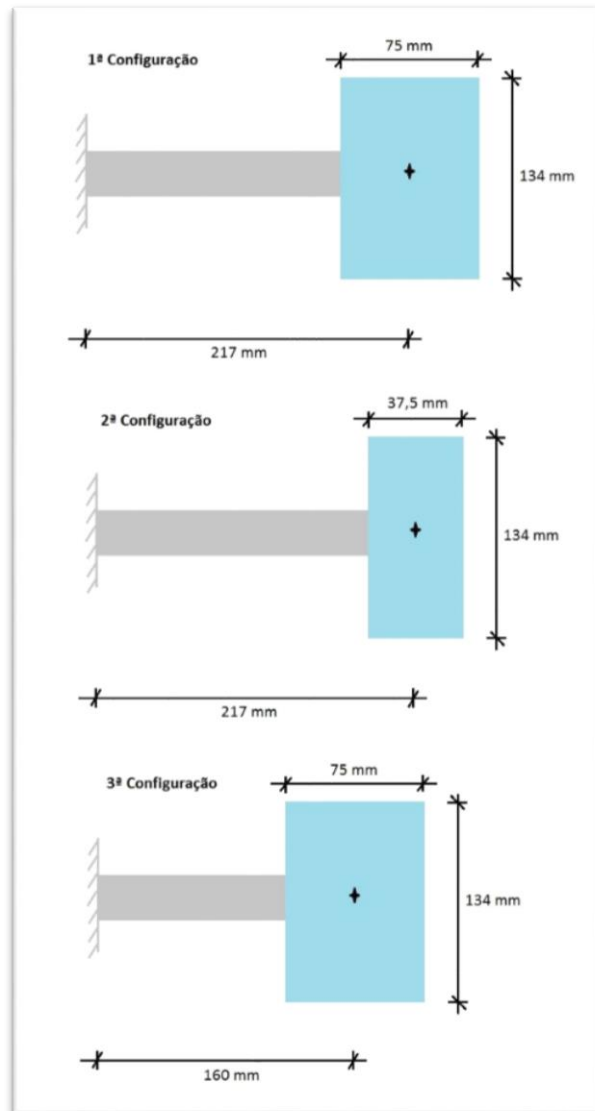


Figura 4.3 - Configurações

Sobre uma das extremidades da viga, junto ao encastramento da mesma, foi colocada uma célula piezoelétrica sensível a deformações, como mostra a figura 4.4.

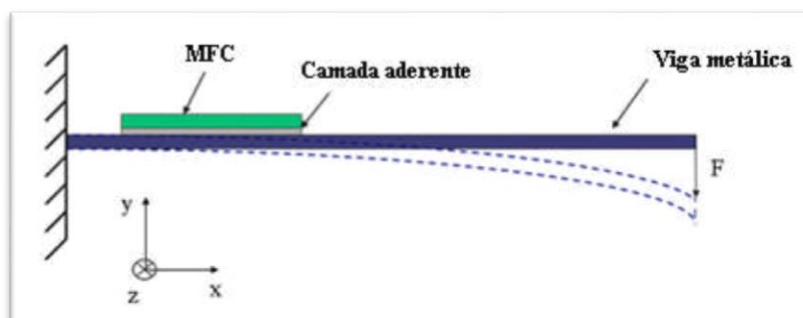


Figura 4.4 – Posicionamento da célula piezoelétrica [20]

A tecnologia escolhida para a célula piezoelétrica foi o MFC do tipo P2 (figura 4.5), que é um actuador e simultaneamente um sensor de efeito d_{31} (figura 4.6), ou seja, tem a direcção de polarização perpendicular à direcção da extensão, como foi explicado no ponto 3.1 referente à piezoelectricidade, e sendo indicada para movimentos de contracção lateral.



Figura 4.5 - Célula MFC - modelo M8528 P2 [24]

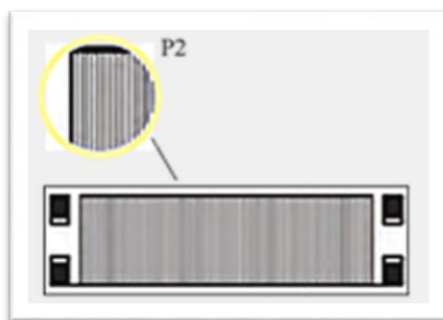


Figura 4.6 – Efeito d_{31} [24]

A tabela 4.1 confere as características do fabricante para a tecnologia usada.

Tabela 4.1 – Informação do fabricante para o modelo [24]

Modelo	Comprimento para colheita [mm]	Largura para colheita [mm]	Comprimentos Absoluto [mm]	Largura Absoluta [mm]	Capacidade [nF]	Tensão de saída [V]	Corrente de saída [mA]	Energia de saída [mJ]
M8528 P2	85	28	103	31	172	3,3	40	Varia entre 0,5 e 2

Ao ser utilizado um MFC do tipo P2, foi necessário um conversor (figura 4.7) concebido igualmente pelo mesmo fabricante do MFC, garantindo um melhor rendimento do material.

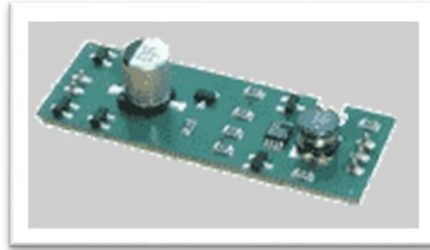


Figura 4.7 – Conversor referente ao modelo M8528 – P2 [24]

4.2. Medição da amplitude de vibração

A transformação das deformações em amplitudes de vibração, para perceber qual a flexão na ponta da viga consoante a velocidade de vento incidente no corpo colocado na extremidade livre, foi conseguida com a utilização de extensómetros. Estes dispositivos variam a sua resistência em função da deformação provocada [26].

Sendo a extensão longitudinal expressa por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (4.1)$$

Sabendo que a variação ΔL do seu comprimento inicial L provocada pela deformação da viga onde o extensómetro está colocado, origina uma variação de resistência ΔR da resistência inicial R do extensómetro. A expressão do factor de calibração, conhecido como “*gage factor*”, que reflete esta relação é [26]:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (4.2)$$

Ao substituir a extensão longitudinal (equação 4.1) na expressão do factor de calibração (equação 4.2), obtém-se a relação da variação de resistência do extensómetro, ΔR , com a deformação aplicada, ε [26]:

$$\varepsilon = \frac{1}{R \cdot GF} \Delta R \quad (4.3)$$

Normalmente, o uso do extensómetro efectua-se em conjunto com uma ponte de *Wheatstone*, pois ao impor-se uma tensão de excitação, U_i , estando a ponte equilibrada, a diferença de potencial entre os pontos intermédios da ponte é nula. Quando houver uma variação de resistência (ΔR), a ponte desequilibra passando a haver uma diferença de potencial não nula entre os referidos terminais. Esta tensão é proporcional à extensão sofrida.

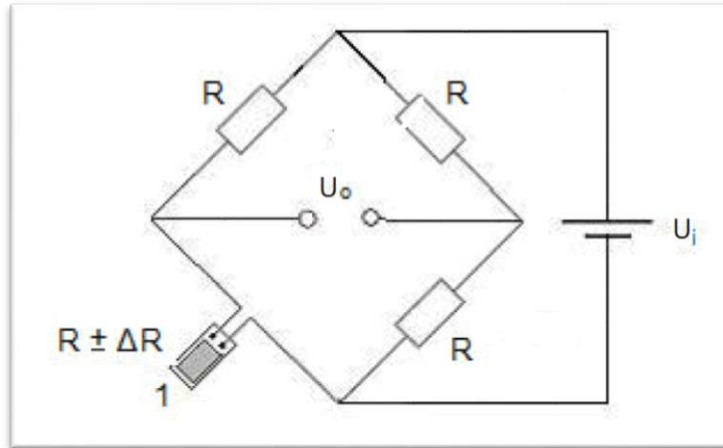


Figura 4.8 - Sensor de deformação “strain gage” em conjunto com um quarto de ponte de “Wheatstone”, com um extensômetro passivo (*dummy*) [26]

A figura 4.8 mostra a configuração da ponte de *Wheatstone* usada neste trabalho, ou seja, um quarto de ponte de dois fios. É constituída por dois extensômetros, em que o extensômetro 1 representado na figura 4.8 é o activo e o 2 é o extensômetro passivo mais conhecido como “*dummy gage*”. O extensômetro passivo, para além de completar a ponte de *Wheatstone*, também minimiza a sensibilidade à temperatura, pois estando montados no mesmo material, as dilatações térmicas serão iguais, mantendo a ponte equilibrada [27].

A relação da saída diferencial de tensão, U_o , e a tensão de excitação, U_i , para a figura 4.8, é [26]:

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{R + \Delta R + 2R_l}{2R + \Delta R + 4R_l} - \frac{R}{2R} \quad (4.4)$$

Onde R_l é a resistência dos fios que ligam os terminais do extensômetro à ponte de *Wheatstone*. Posteriormente, ao substituir a equação 4.3 na equação 4.4 obtém-se a expressão para U_o/U_i para um quarto da ponte, sendo ela [26]:

$$\frac{U_o}{U_i} = \left(\frac{GF \cdot \varepsilon}{4} + \frac{R_l}{2R} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{R_l}{R} + \frac{GF \cdot \varepsilon}{2}} \right) \quad (4.5)$$

Uma vez que a resistência dos fios é muito baixa em relação a R , pode ser desprezada surgindo a seguinte aproximação [26]:

$$\frac{U_o}{U_i} = \left(\frac{GF}{4} \right) \cdot \varepsilon \quad (4.6)$$

O extensômetro é composto por uma grelha metálica apoiada numa base, como se pode ver na figura 4.9.

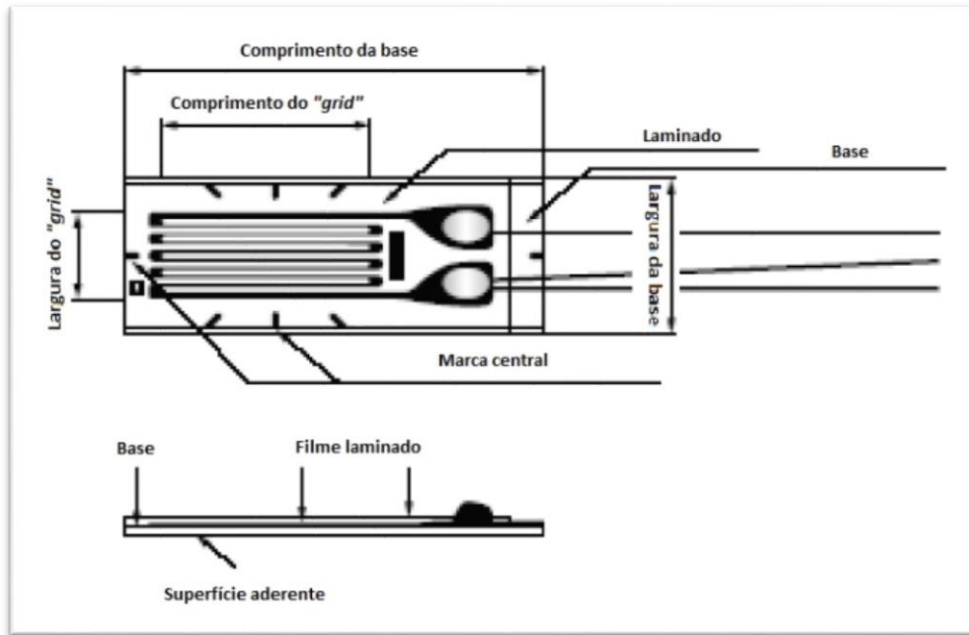


Figura 4.9 - Exemplo de extensômetro [27]

Como os extensômetros estão normalmente localizados em ambientes ruidosos procedeu-se a uma filtragem para garantir a eliminação dos ruídos, através de um filtro passa-baixo e antes de começar com as medições propriamente ditas fez-se a calibração interna do circuito. Posto isto, os resultados são usados para corrigir erros de calibração no decorrer das medições ou simplesmente para verificar a operação na generalidade ganhando confiança na configuração [26].

Neste trabalho, quando a extremidade livre da viga encastrada foi submetida a uma carga pontual, P, a viga flectiu e quanto maior fosse a carga aplicada, maior seria a flexão.

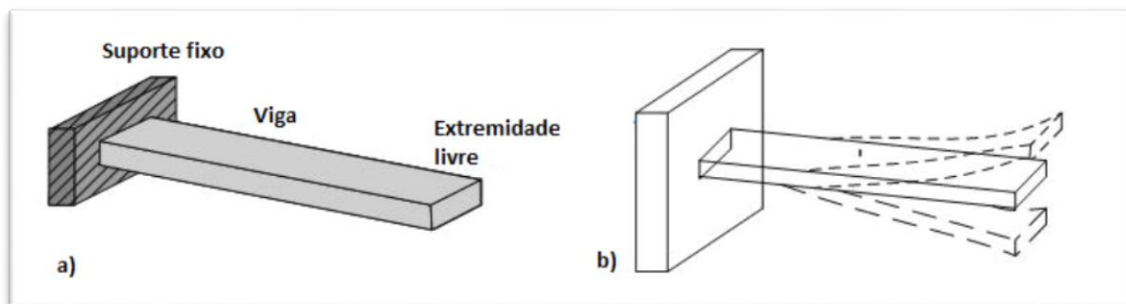


Figura 4.10 – a) Viga encastrada e b) Viga encastrada em vibração livre [28]

Como foi referido no ponto 3.2.4, anteriormente:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI} \quad (4.9)$$

Em que E é o módulo de elasticidade e I o momento de Inércia da secção transversal. Para a carga P mostrada na figura 4.11, a expressão do momento de flexão em função da distância x do

encastramento da viga é:

$$M(x) = -Px \quad (4.10)$$

Assumindo que P é a força que vai ser exercida pelo corpo colocado na extremidade devido à acção do vento.

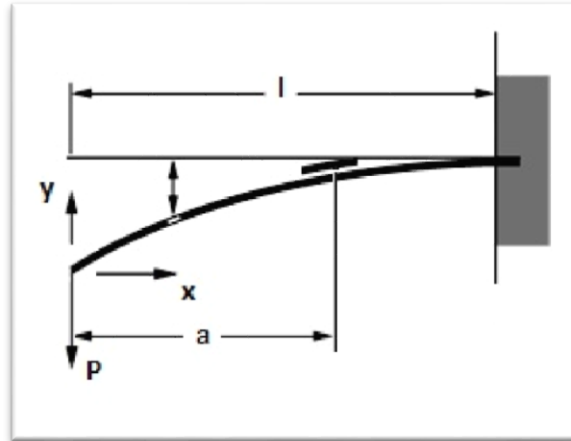


Figura 4.11 – Flexão da viga

Substituindo o momento flector na segunda derivada tem-se que:

$$y''(x) = \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{-Px}{EI} \Leftrightarrow EI \cdot \frac{d^2y}{dx^2} = -Px \quad (4.11)$$

Para descobrir a flexão na extremidade livre é preciso primitivar o momento de flexão:

$$EI \cdot y'(x) = -\frac{1}{2}Px^2 + C_1 \quad (4.12)$$

$$EI \cdot y(x) = -\frac{1}{6}Px^3 + C_1x + C_2 \quad (4.13)$$

Como $y'(l)=0$ e $y(l)=0$, ou seja, determina-se as constantes C_1 e C_2 , ao serem substituídas em ambas as equações anteriores, por l em vez de x :

$$y'(l) = 0 \Leftrightarrow -\frac{1}{2}Pl^2 + C_1 = 0 \Leftrightarrow C_1 = \frac{1}{2}Pl^2 \quad (4.14)$$

$$y(l) = 0 \Leftrightarrow -\frac{1}{6}Pl^3 + \frac{1}{2}Pl^2 \cdot l + C_2 = 0 \Leftrightarrow C_2 = \frac{1}{6}Pl^3 - \frac{1}{2}Pl^3 = \frac{1}{3}Pl^3 \quad (4.15)$$

As constantes ao serem substituídas na equação 4.13 tem-se que:

$$EI \cdot y(x) = -\frac{1}{6}Px^3 + \frac{1}{2}Pl^2x + \frac{1}{3}Pl^3 \quad (4.16)$$

Na extremidade livre da viga a força P pode ser relacionada com a deflexão:

$$EI \cdot y(0) = \frac{1}{3}Pl^3 \Leftrightarrow y(0) = \frac{1}{3} \cdot \frac{Pl^3}{EI} \quad (4.17)$$

As tensões na viga são dadas por:

$$\sigma = \frac{M}{\left(\frac{I}{v}\right)} \quad (4.18)$$

Em que M é o momento flector e $\left(\frac{I}{v}\right)$ é o módulo de flexão.

O momento flector resultante da força P é:

$$M(x) = Px \quad (4.19)$$

Como a secção da viga é rectangular, o momento de inércia I é:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (4.20)$$

e

$$v = \frac{h}{2} \quad (4.21)$$

Assim:

$$\sigma = \frac{6Px}{bh^2} \quad (4.22)$$

Pela lei de Hooke:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (4.23)$$

Então:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{6Px}{Ebh^2} \quad (4.24)$$

Se colocar um extensómetro em $x=\alpha$:

$$P = \frac{Ebh^2}{6} \cdot \frac{\varepsilon}{\alpha} \quad (4.25)$$

Substituindo a expressão anterior, da carga P, na equação 4.17, após alguma metodologia algébrica, determina-se então a deflexão da viga para a amplitude quando a viga flecte:

$$y(0) = \frac{2}{3} \cdot \frac{l^3}{h} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right) \quad (4.26)$$

Do mesmo modo, a equação 4.27, dá-nos o ângulo de rotação no encastramento:

$$y'(x) = \frac{l^2}{h} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right) = \theta \quad (4.27)$$

Por fim, para determinar as equações anteriores segundo a distância do encastramento:

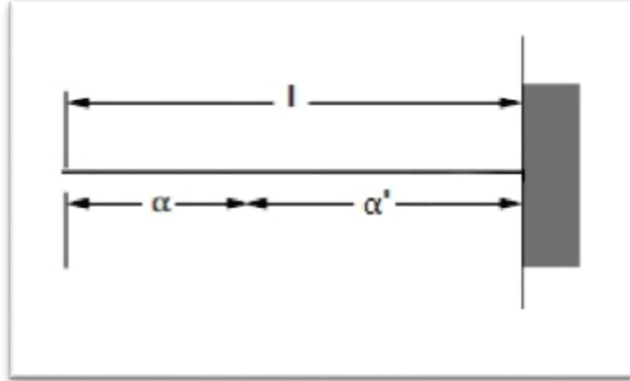


Figura 4.12 – Distância ao encastramento

$$\alpha' = l - \alpha \Leftrightarrow \alpha = l - \alpha' \quad (4.28)$$

$$y(0) = \frac{2}{3} \cdot \frac{l^3}{h} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{l - \alpha'}\right) \quad (4.29)$$

$$y'(0) = \frac{l^2}{h} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{l - \alpha'}\right) \quad (4.30)$$

Assim, as equações 4.29 e 4.30 dão-nos a flecha e a inclinação da extensão num ponto arbitrário localizado em α , utilizadas no software desenvolvido para a aquisição de dados.

A instalação dos extensómetros é a representada na figura 4.13:



Figura 4.13 - Extensómetro junto do encastramento da viga, à esquerda e extensómetro passivo que foi colocado na proximidade da viga, à direita

Na medição das amplitudes foram ainda utilizadas placas de aquisição de dados, que em conjunto com um *software* desenvolvido especificamente para este projecto com recurso ao *National*

Instruments Measurements & Automation Explorer e o *LabView*. Em anexo pode ser visto o painel frontal e o circuito desenvolvido.

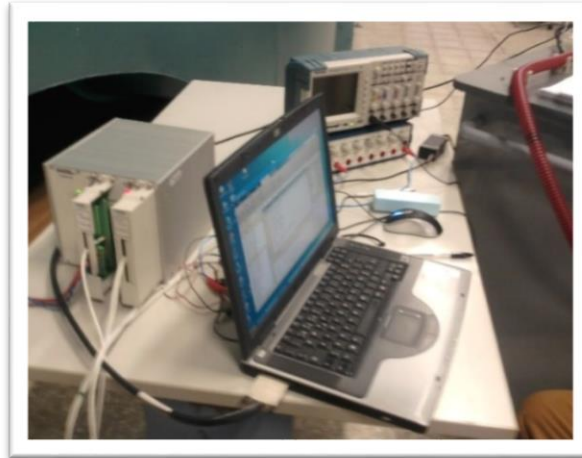


Figura 4.14 - Sistema de aquisição de dados

4.3. Controlo de valores de vento

A excitação do sistema foi realizado num túnel de vento (figura 4.15) que possui um conjunto de turbinas que permitem, por regulação de velocidade de rotação, controlar a velocidade do vento.



Figura 4.15 – Túnel de vento

O túnel de vento, figura 4.15, permite a simulação das principais características de ventos naturais e a velocidade do escoamento na secção de ensaios é controlada através de um quadro de comando, figura 4.16, que varia a rotação do ventilador que movimenta o ar.



Figura 4.16 – Quadro de comando electrónico e quadro eléctrico

A curva de calibração entre a frequência no quadro de comando e a velocidade do escoamento na câmara de experiências relaciona-se como mostra a figura 4.17. Ao ser ajustada a frequência de comando faziam-se variar as velocidades do vento, pois o controlo é uma variação da frequência e a respectiva curva de calibração (figura 4.17)

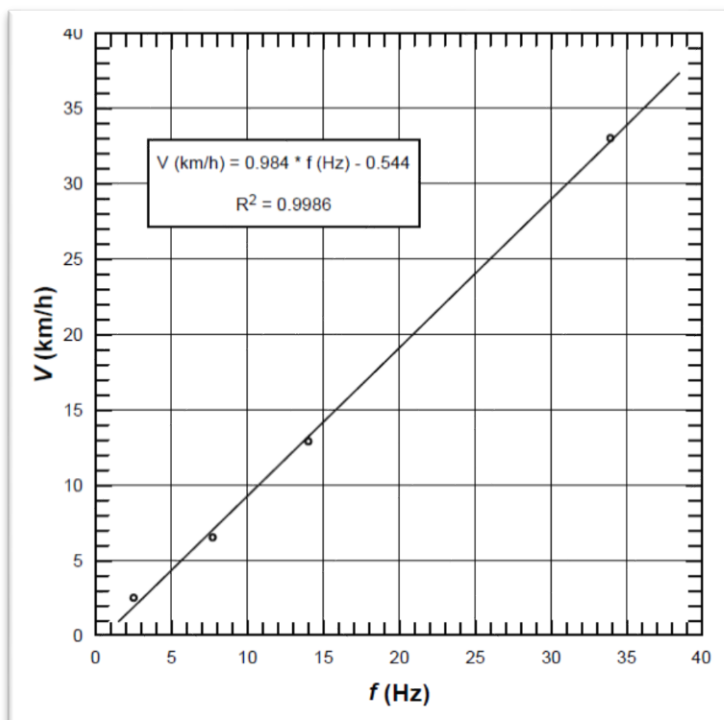


Figura 4.17 – Curva de calibração entre a velocidade do vento e a frequência de controlo

Ainda para esta relação é importante fazer referência que a frequência no quadro de comando, durante os ensaios, é quase directamente proporcional à velocidade do vento, ou seja, através da expressão:

$$V(\text{km/h}) = 0,984 \times f(\text{Hz}) - 0,544 \quad (4.31)$$

Ao serem substituídas as frequências para as quais foram feitas as medições conseguem-se determinar as respectivas velocidades de vento em km/h.

Finalmente, para determinar a quantidade de energia extraída em cada ensaio realizado consoante a velocidade do vento, foi utilizada uma década de resistências M2115 da *Metrel*, constituída por comutadores rotativos com 10 posições e um osciloscópio digital TPS 2024 da *Tektronics*, para representar graficamente os sinais eléctricos no domínio temporal (figura 4.18).

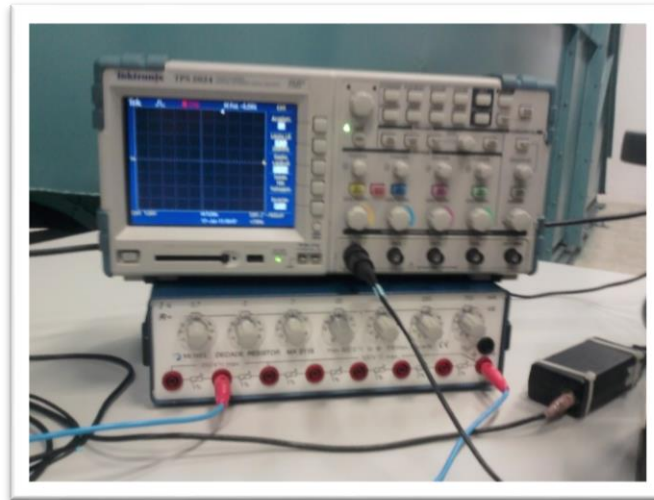


Figura 4.18 – Década de resistências em baixo e osciloscópio em cima

A década de resistências variável permite investigar a adaptação do piezoeléctrico a diferentes cargas, obtendo-se então a resistência que corresponde à máxima potência produzida.

5. Resultados Experimentais

Como foi referido anteriormente, para a realização dos ensaios, foram utilizadas três configurações distintas do conjunto viga e corpo oscilante e para cada uma delas foram feitas medições para diferentes velocidades de vento. Essas velocidades foram controladas através de um conversor de frequências utilizando, nomeadamente, frequências de 25, 30, 35 e 40 Hz, visto ser no intervalo de frequências entre os 25 e os 40 Hz onde se obtinha um melhor comportamento do conjunto para este estudo.

Posto isto, calculando a velocidade do vento a partir da expressão 4.31, onde as frequências são convertidas para velocidades em km/h, e posteriormente, em m/s, tem-se:

Tabela 5.1 – Determinação das velocidades do vento em m/s

Frequências [Hz]	Velocidade do vento [km/h]	Velocidade do vento [m/s]
25	24	7
30	29	8
35	34	9
40	39	11

Comparando as configurações para cada velocidade medida tem-se que, em ventos na ordem dos 7 m/s as amplitudes de vibração extraídas para cada configuração foram:

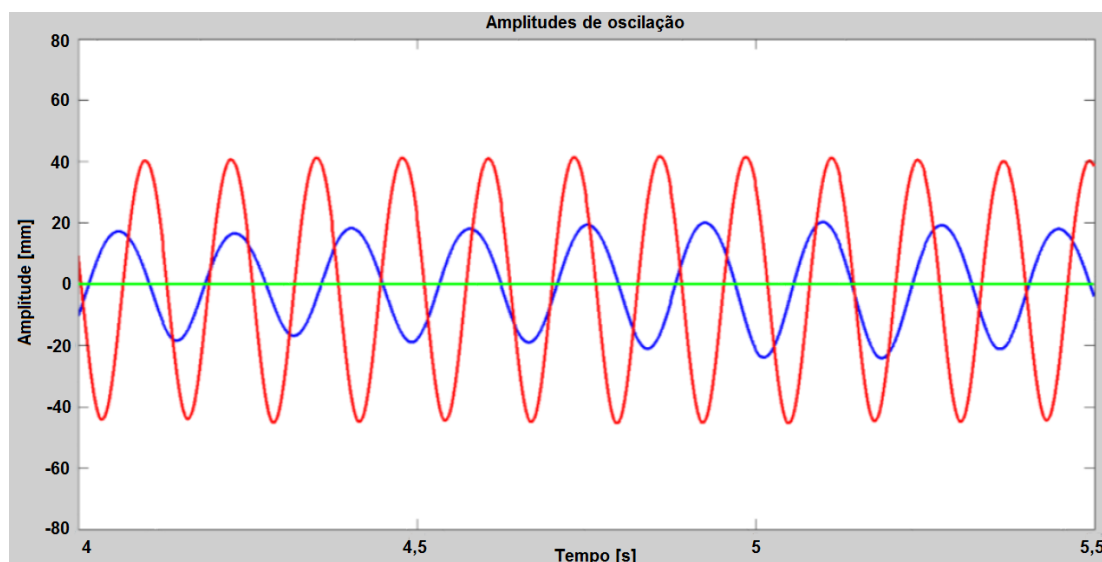


Figura 5.1 – Amplitudes de vibração para velocidades de 7 m/s

Quanto maior for a frequência das vibrações maior deveria ser a energia obtida mas como a recolha de energia depende também muito das amplitudes de oscilação, para velocidades de 7 m/s, verifica-se que a 3ª configuração é a que tem um menor desempenho. Este desempenho é caracterizado por amplitudes de oscilação quase nulas. Entre a 1ª e 2ª configuração a que apresenta

uma maior frequência e maiores amplitudes de oscilação é a 2ª, daí ter uma maior produção de potência quando comparada com a 1ª configuração. Aqui é observado o facto de, quanto maiores forem as frequências, maior será a potência conseguida, embora isto não se verifique sempre como uma regra excepcional.

Para ventos de 8 m/s as amplitudes obtidas são:

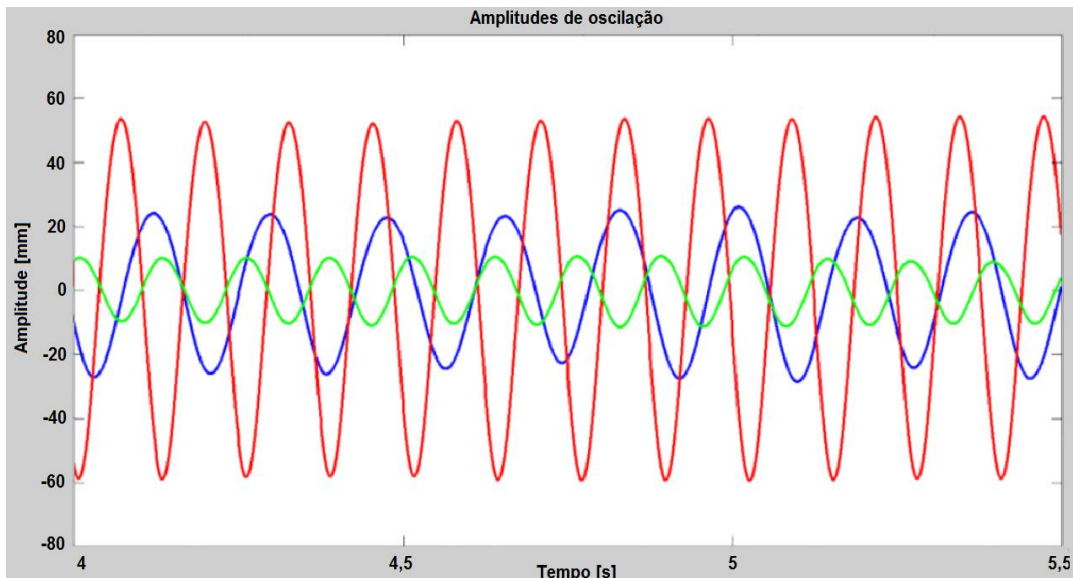


Figura 5.2 – Amplitudes de vibração para velocidades de 8 m/s

Neste caso, para velocidades de 8 m/s, verifica-se que a 2ª e 3ª configuração são as mais rápidas ao nível de frequências, ao contrário da 1ª configuração que é a mais lenta. Uma vez que a 2ª configuração apresenta maiores amplitudes de oscilação, comparativamente à 3ª configuração será esta a que confere uma maior produção. Como foi referido anteriormente, é notável que apesar das frequências serem maiores na 3ª configuração, a 2ª configuração é a que vai produzir maior potência pois tem maiores amplitudes de oscilação, ou seja, embora as frequências sejam maiores, não é verificado uma maior produção de energia pois as amplitudes de oscilação são as principais responsáveis por uma maior ou menor potência produzida.

Igualmente para velocidades de 9 m/s as amplitudes de vibração verificadas foram:

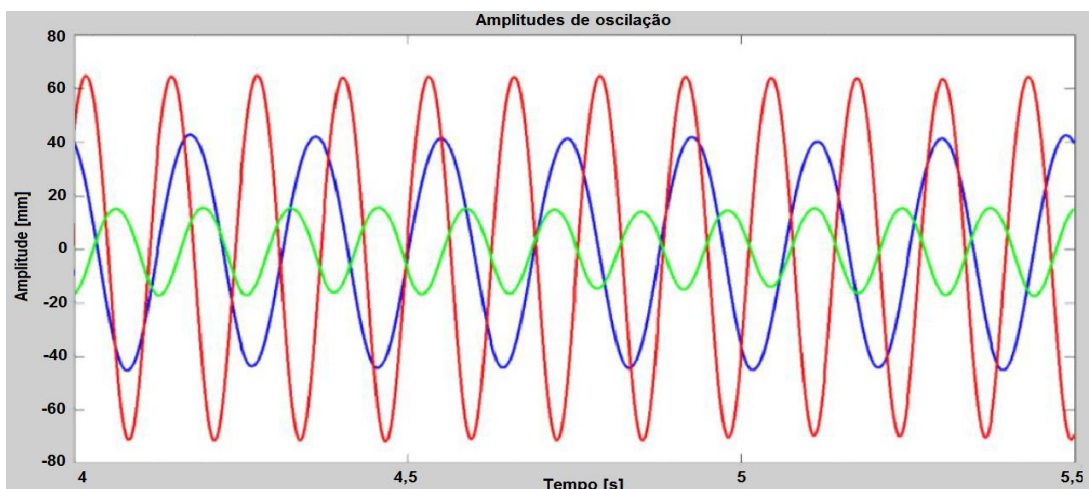


Figura 5.3 – Amplitudes de vibração para velocidades de 9 m/s

Para velocidades de 9 m/s verifica-se que a 1ª configuração é a mais das frequências, apesar das amplitudes serem maiores comparativamente com a 3ª configuração que é a mais rápida. Mas como a 2ª configuração é aquela que, uma vez mais, apresenta frequências maiores e amplitudes maiores do que a 1ª e 3ª configuração, será a que terá conseqüentemente uma maior potência.

Finalmente, as amplitudes de vibração obtidas para ventos de 11 m/s são:

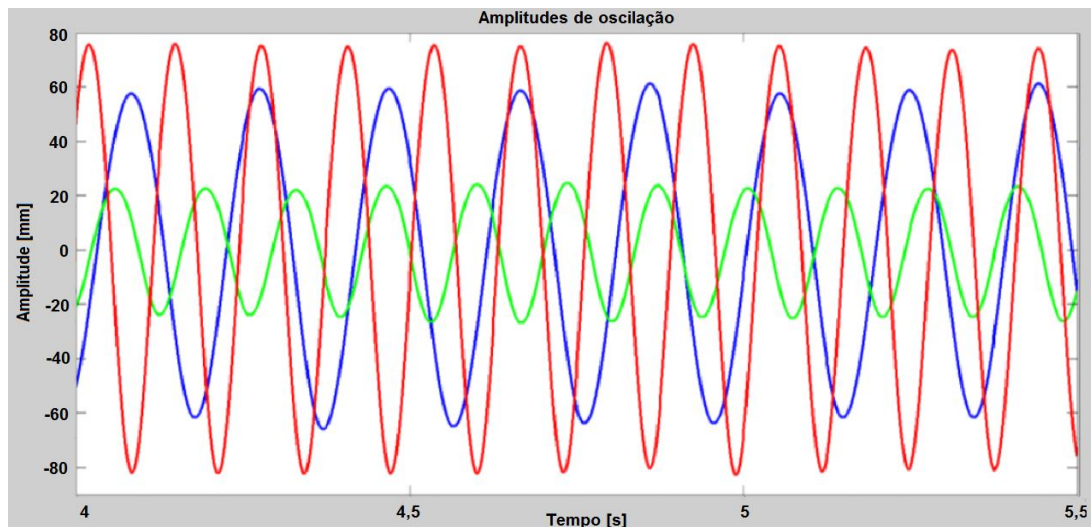


Figura 5.4 – Amplitudes de vibração para velocidades de 11 m/s

Quando a velocidade do vento aumenta para 11 m/s, continua na mesma a 2ª configuração a ser a mais determinante devido às suas elevadas amplitudes e maiores frequências.

Embora o estudo tenha sido realizado para velocidades de vento entre os 7 e os 11 m/s, devido a haver uma maior estabilidade, é de se notar que à medida que se aumentavam essas mesmas velocidades, o aumento das amplitudes de oscilação tinham de certa forma um crescimento proporcional à velocidade do vento e por isso obtinham-se maiores potências. É igualmente importante referir que as características das configurações eram deterministas nos resultados observados, pois constatou-se que o comprimento da viga não seria muito relevante apesar de apresentar frequências de vibração maior (verificando-se, anteriormente, que não era o factor de maior importância para uma maior potência), ao contrário da diminuição da largura do corpo oscilante, onde eram conseguidas grandes amplitudes de vibração que são as principais responsáveis para uma maior produção de potência.

A medição da potência obtida pelo colector foi realizada com recurso a décadas de resistências, figura 5.5, como carga, ligada na saída do conversor. Este conversor (figura 4.7) prevê a produção de uma tensão estabilizada de 3,3 V quando o consumo na saída deste não ultrapassar a potência na entrada, nem o consumo interno dos circuitos.



Figura 5.5 - Década de resistências

Através do circuito da década de resistências, figura 5.5, o conversor de potência deveria apresentar uma tensão estabilizada de 3,3 V, quando a potência entregue na entrada do mesmo fosse suficiente para o consumo interno do circuito eléctrico e para o consumidor. Durante as medições, não foi verificada esta afirmação, pois a tensão na saída não era passível de se manter estabilizada devido à potência produzida não ser muito elevada e por isso o consumo interno do conversor exigir o desligamento periódico desse mesmo circuito.

Como o objectivo do estudo era conseguir sempre a máxima potência produzida em qualquer medição, era preciso assegurar um menor número de interrupções de tensão mantendo assim a estabilidade em 3,3 V e para isso obrigava-se a que o funcionamento estivesse sempre no limite dessa mesma estabilização, aumentando consecutivamente a resistência da carga. Quanto maior fosse a resistência de carga menor era a potência produzida, o que também não era pretendido, mas com o aumento das velocidades do vento e consoante o tipo de configuração verificou-se que a resistência já não necessitava de ser tão elevada, produzindo maior potência. Ainda com a existência de algumas interrupções, o consumo foi calculado através do somatório do tempo em que o osciloscópio (figura 5.6) marca a tensão estabilizada prevista de 3,3V, produzida pelo conversor (figura 4.7), pelas seguintes equações:

(5.1)

$$P = \frac{U^2}{R}$$

(5.2)

$$P_{V_{out}} = \frac{t_{ON}}{t_s} \cdot \frac{V^2}{R}$$

(5.3)

$$t_{ON} = \sum \text{tempo em máxima tensão de saída}$$



Figura 5.6 - Osciloscópio

Retiraram-se os seguintes registos no osciloscópio:

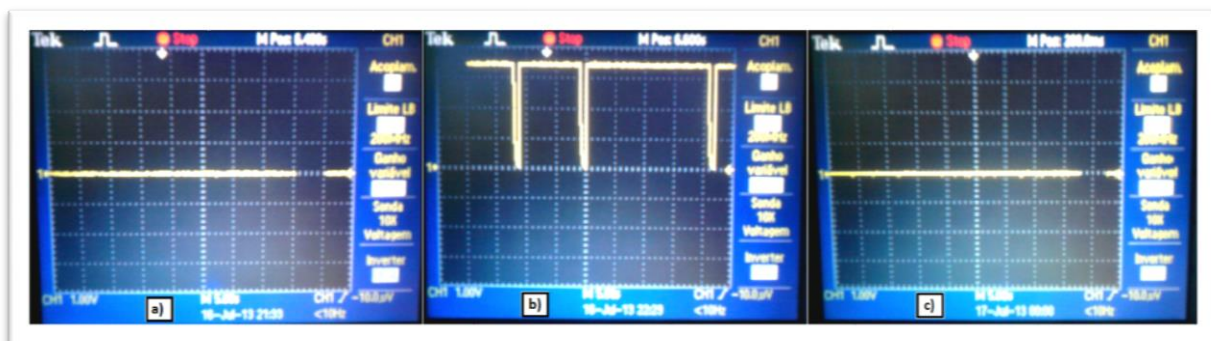


Figura 5.7 - Registos do osciloscópio para ventos de 7 m/s. a) 1ª Configuração; b) 2ª Configuração e c) 3ª Configuração

Na 1ª e 3ª configurações, embora tenham sido aplicadas resistências de carga elevadas não era mostrada, no osciloscópio, nenhuma tensão na saída, o que significa que a velocidade do vento de 7 m/s não era suficiente para produzir energia. Só na 2ª configuração, como é a que tem um melhor desempenho em todos os aspectos é que se obtém tensão na saída.

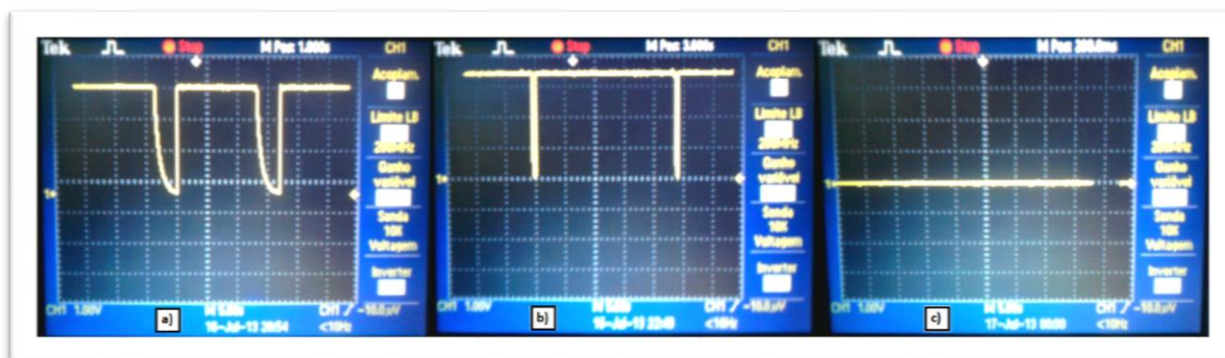


Figura 5.8 - Registos do osciloscópio para ventos de 8 m/s. a) 1ª Configuração; b) 2ª Configuração e c) 3ª Configuração

Com o aumento da velocidade do vento de 7 para 8 m/s, apenas a 3ª configuração continua sem mostrar tensão na saída pelas mesmas razões explicadas anteriormente. Entre a 1ª e 2ª configuração é de se notar que a 2ª é a que tem uma tensão estabilizada quase linear, enquanto a 1ª tem maiores interrupções devido à resistência de carga ter de ser ainda muito elevada para ser conseguida tensão na saída e também devido à velocidade do vento ainda não ser suficiente para produzir uma maior potência de forma a baixar a resistência de carga.

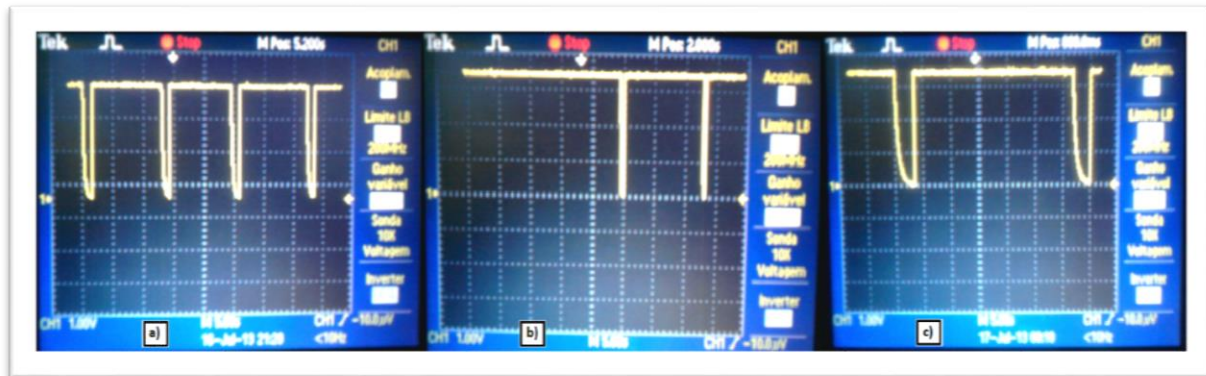


Figura 5.9 - Registos do osciloscópio para ventos de 9 m/s. a) 1ª Configuração; b) 2ª Configuração e c) 3ª Configuração

A partir dos 9 m/s já se verifica tensão na saída em todas as configurações. A 1ª e 3ª configuração continuam com interrupções ainda pouco aceitáveis. Embora na 1ª configuração estejam representadas quatro quebras, ao contrário da 3ª configuração que apresenta apenas duas quebras, essas mesmas duas quebras conseguem ainda ser menos produtivas, pois os intervalos até que retomem os 3,3 V de tensão são maiores do que o somatório de todas as interrupções da 1ª configuração. Em relação à 2ª configuração continua-se a manter uma tensão quase constante.

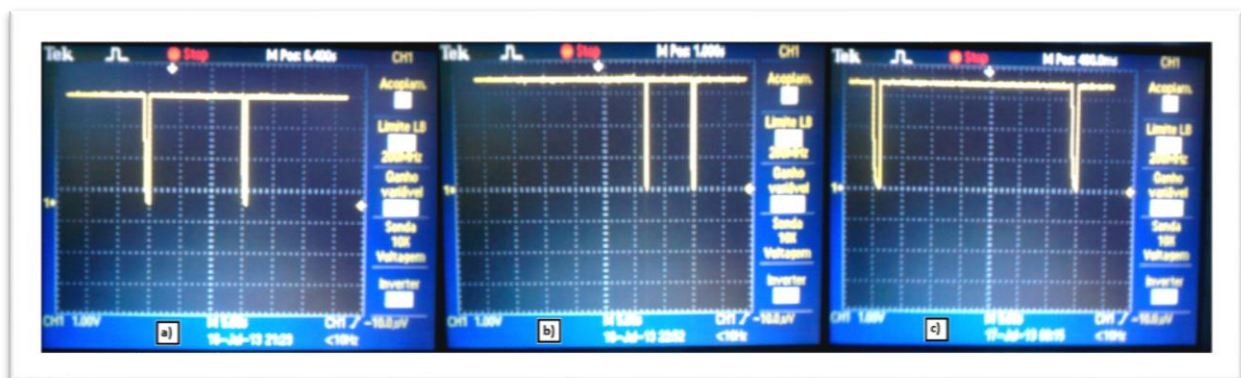


Figura 5.10 - Registos do osciloscópio para ventos de 11 m/s. a) 1ª Configuração; b) 2ª Configuração e c) 3ª Configuração

Com o aumento da velocidade de vento, nomeadamente, a partir dos 11 m/s observa-se uma redução nas interrupções. Na 1ª configuração passa-se de quatro interrupções para duas, na 2ª configuração, as interrupções são quase nulas e na 3ª configuração ainda que se mantenham as mesmas duas interrupções, as mesmas diminuíram muito no tempo de recuperação do circuito

interno fazendo com que fosse mostrada tensão na saída por mais tempo.

Numericamente, a tabela 5.2 faz um apanhado dos valores obtidos para as figuras anteriormente vistas.

Tabela 5.2 – Potência produzida

Configurações	Tempo _{ON} [s]	R [kΩ]	Total segundos [s]	Tensão [V]	Velocidade do Vento [m/s]	P [mW]
1ª	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	7	n.a.
2ª	47	7,3	50	3,3	7	1,402
3ª	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	7	n.a.
1ª	42,5	38,1	50	3,3	8	0,243
2ª	49	4,3	50	3,3	8	2,482
3ª	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	8	n.a.
1ª	45,4	11,1	50	3,3	9	0,891
2ª	49,3	2,8	50	3,3	9	3,835
3ª	43,9	27,1	50	3,3	9	0,353
1ª	48,5	5,5	50	3,3	11	1,921
2ª	49,7	2,1	50	3,3	11	5,155
3ª	48	9,9	50	3,3	11	1,056

Na tabela quando aparece não aplicável (n.a.) significa que para velocidades de vento de 7 e 8 m/s, o osciloscópio não mostrava tensão de saída, apenas eram retiradas as amplitudes de vibração. Poderá ser consultada, em anexo, a tabela inicial e completa da recolha dos dados de laboratório.

Para uma melhor interpretação da tabela 5.2 e do que foi observado no osciloscópio seguem-se as seguintes figuras:

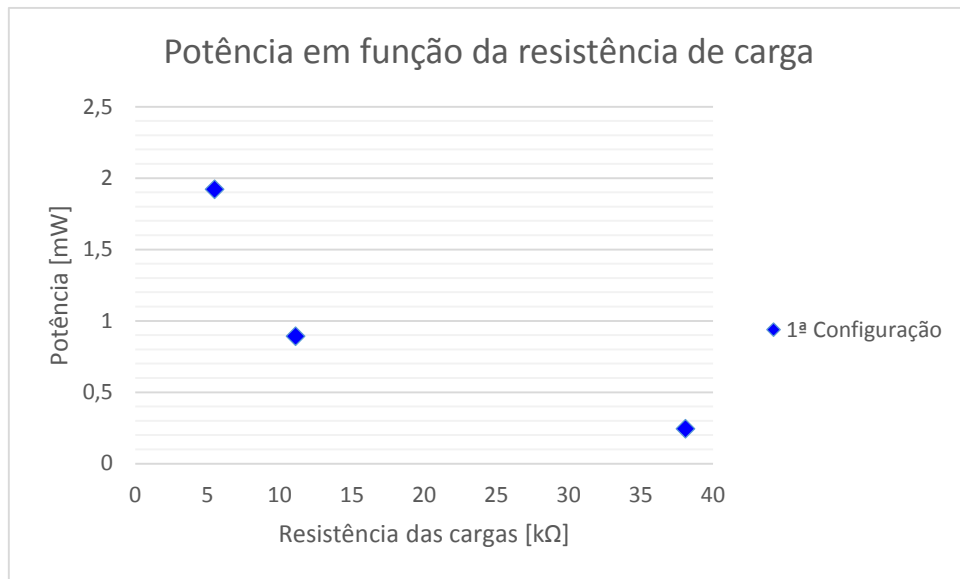


Figura 5.11 - Gráfico da potência em função da resistência de carga referente à 1ª configuração

Como foi referido, quanto maiores forem as resistências menores serão as potências produzidas. Para a 1ª configuração esta constatação é verificada bem como para as seguintes configurações e esta configuração, das três, é a que apresenta uma necessidade maior da aplicação de cargas mais elevadas, embora produza maior potência do que a 3ª configuração (figura 5.13).

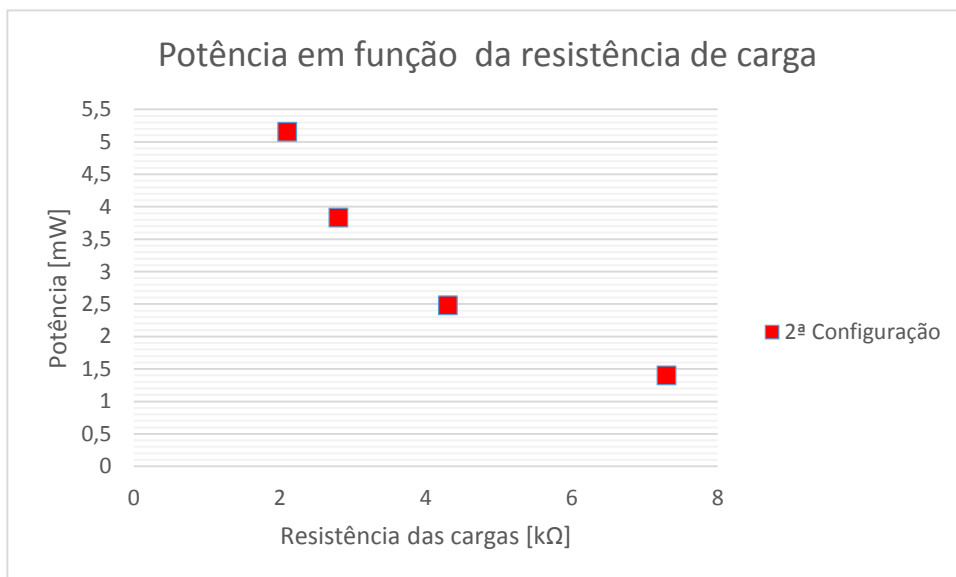


Figura 5.12 - Gráfico da potência em função da resistência de carga referente à 2ª configuração

Na 2ª configuração, é onde se consegue produzir maiores potências, uma vez que nas suas características de configuração, o facto da largura do corpo oscilante ser reduzida para metade da largura inicial (1ª configuração), faz com que haja uma facilidade na excitação do conjunto viga em consola mais corpo oscilatório, consoante as velocidades do vento (independentemente de serem reduzidas ou elevadas) e daí resultar que não é necessário aplicar resistências de carga muito elevadas para que a tensão na saída seja estável. Sendo assim esta é a configuração que apresentou resistência das cargas mais baixas.

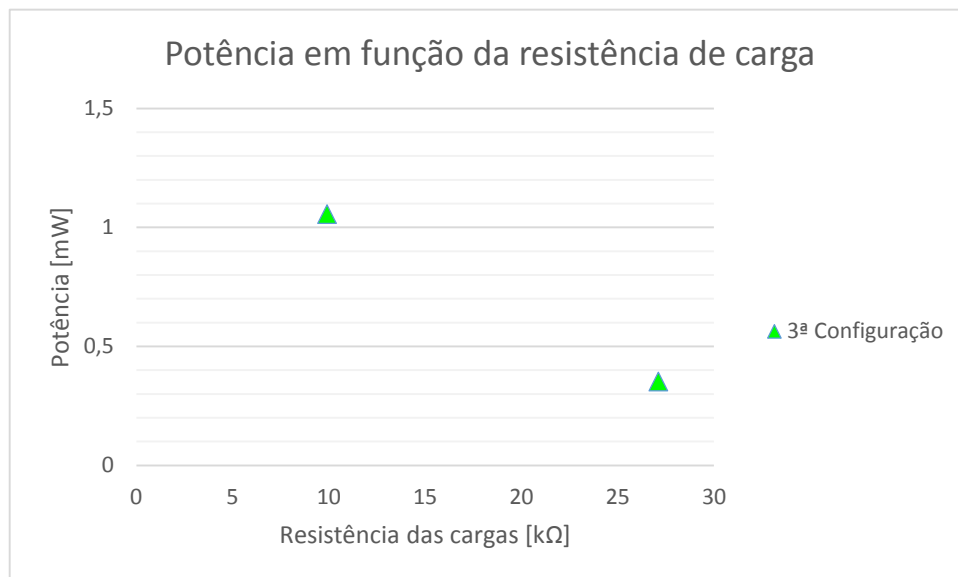


Figura 5.13 – Gráfico da potência em função da resistência de carga referente à 3ª configuração

Por fim, na figura 5.13, vê-se que a 3ª configuração é a que representa uma menor produção de potência, não só devido ao comprimento da viga ser menos curto (o que se tem vindo a verificar que não é a melhor solução construtiva) como também ao facto de precisar de resistências de carga mais elevadas.

6. Discussão de Resultados

Em forma de análise pode afirmar-se que relativamente às amplitudes de vibração:

- Na figura 5.1, para velocidades de vento de 7 m/s, a configuração que apresenta maior amplitude de oscilação é a 2ª configuração, oscilando entre os -40 e 40 mm, e a que apresenta menor amplitude é a 1ª configuração, que oscila entre os -20 e os 20 mm. Na 3ª configuração as amplitudes são praticamente nulas pois apresentam valores muito reduzidos, aproximados de zero;
- Na figura 5.2, para velocidades de vento de 8 m/s, a 2ª configuração é a que tem maior amplitude, oscilando, aproximadamente, entre os -60 e os 60 mm, e a 3ª configuração a que tem uma menor amplitude de vibração, pois oscila entre os -10 e os 10 mm;
- Na figura 5.3, em velocidades de vento de 9 m/s, para as amplitudes maiores que variam entre os -70 e 70 mm, aproximadamente, tem-se a 2ª configuração e para as menores amplitudes, a variar entre os -20 e os 20 mm, tem-se a 3ª configuração;
- Na figura 5.4, em velocidades de vento de 11 m/s, quando as amplitudes variam entre os -80 e 80 mm, aproximadamente, significa que se trata da 2ª configuração onde as amplitudes são maiores e quando os valores variam entre -20 e 20 mm, dizem respeito à 3ª configuração, que tem as menores amplitudes.

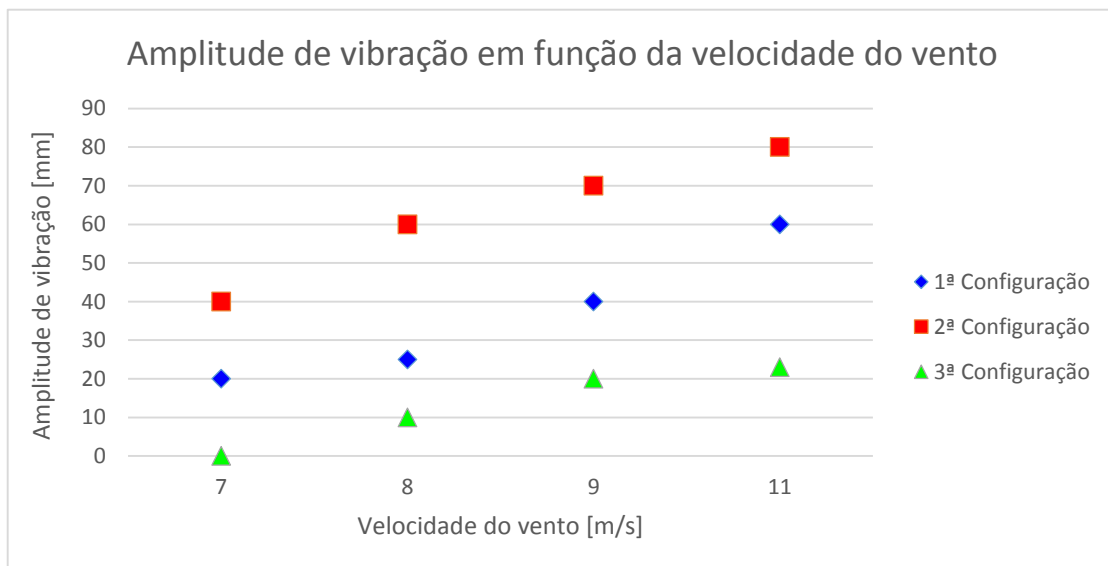


Figura 6.1 - Gráfico da amplitude de vibração em função da velocidade do vento

Resumidamente, em relação às amplitudes de vibração as verificações mais importantes que foram constatadas são, quanto maior a velocidade do vento maiores são as amplitudes de oscilação e comparando as três configurações, a que apresenta maiores amplitudes, independentemente da

velocidade do vento ser baixa ou elevada, é a 2ª, ou seja, a configuração em que o corpo oscilante tem menores dimensões, e por sua vez quanto maior for o corpo oscilante e menor for o comprimento da viga (3ª configuração) pior será a performance do conjunto.

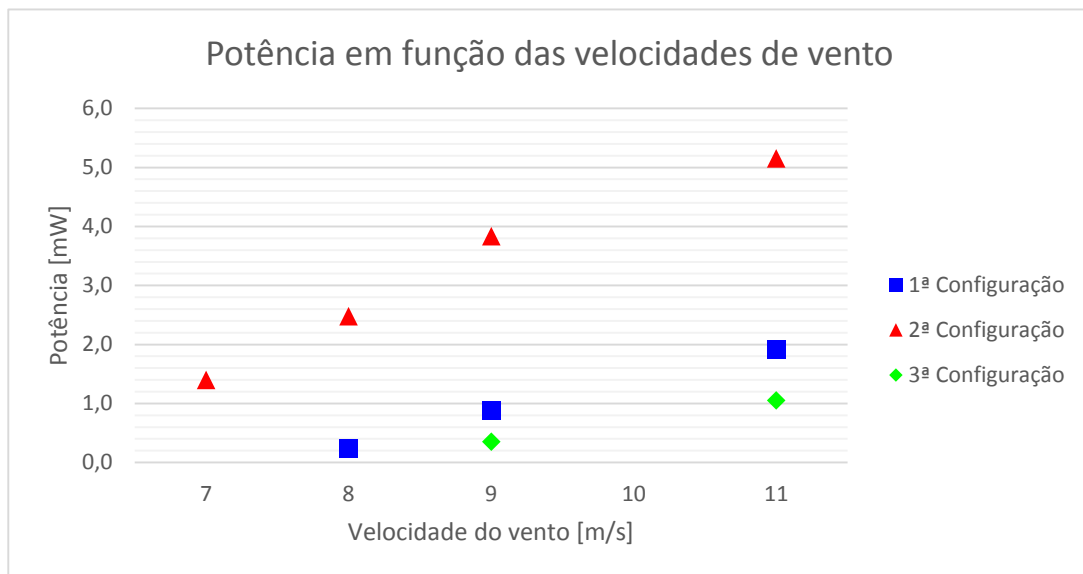


Figura 6.2 - Gráfico da potência em função da velocidade do vento

Relativamente às quantidades de potência produzida verifica-se igualmente que a 2ª configuração é a que produz maior potência e essa potência será tanto maior quanto maiores forem as velocidades do vento, continuando a 3ª configuração a ser a que contribui com um menor desempenho na produção de energia.

Na 1ª configuração o osciloscópio só captava tensão na saída, ou seja, só havia produção de energia, para ventos de velocidades acima dos 7,5 m/s e na 3ª configuração acima dos 8,9 m/s, comparativamente com a 2ª configuração que funcionava para velocidades inferiores.

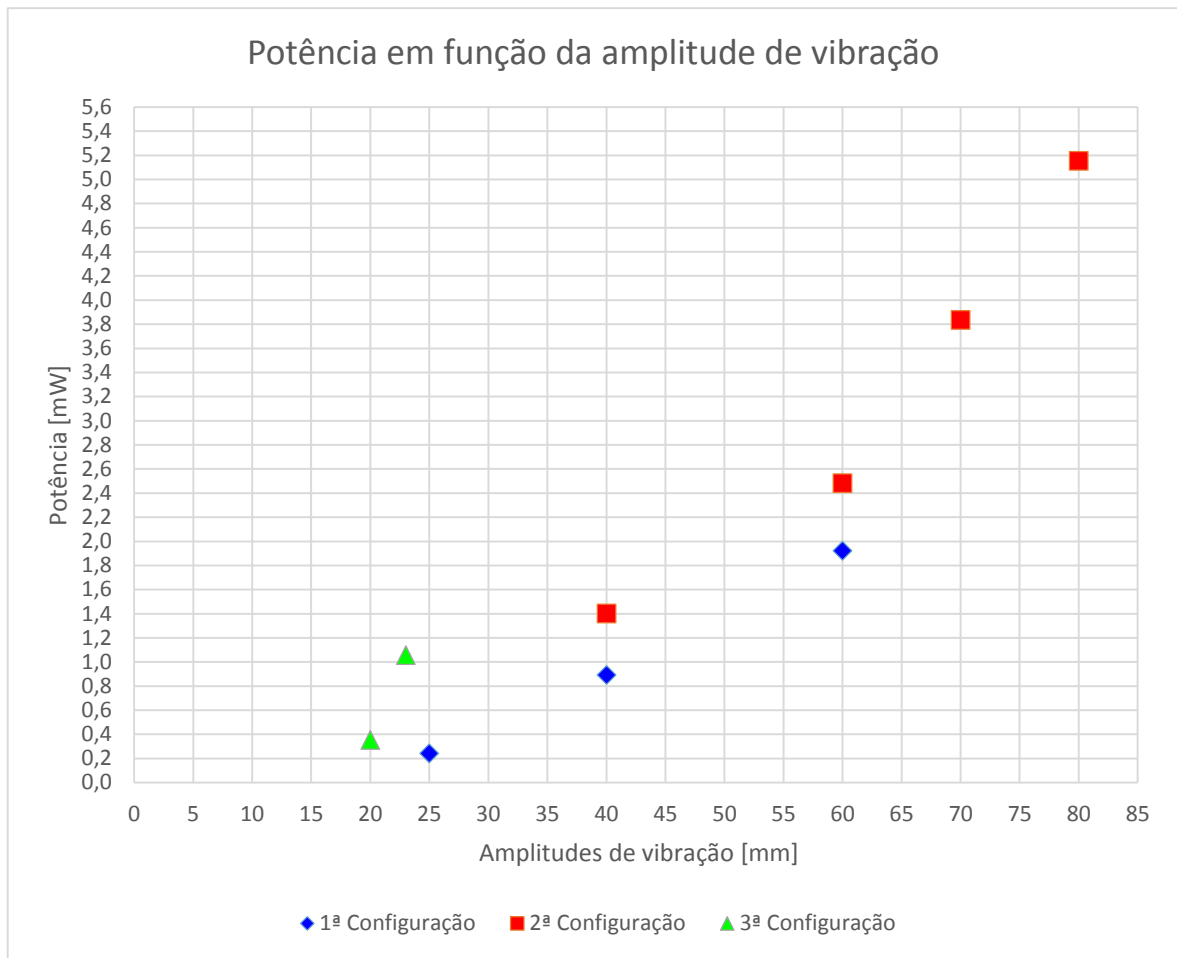


Figura 6.3 – Gráfico da amplitude de vibração em função da potência produzida

De igual modo, a potência produzida será tanto maior quanto maior for a amplitude de vibração, sendo a 2ª configuração a que apresenta maiores amplitudes e por isso uma maior potência e a 3ª configuração a que irá produzir menores potências devido à sua baixa amplitude de vibração.

Na 1ª configuração, sendo esta a configuração original de onde parte as comparações relativas às outras duas configurações pode afirmar-se que:

- As amplitudes de oscilação variaram entre os 20 e os 60 mm, aproximadamente;
- É a configuração que apresenta menor frequências de ressonância em qualquer velocidade de vento;
- Só a partir dos 7,5 m/s é que se verifica tensão na saída, embora houvesse interrupções com intervalos de tempo muito grandes;
- Foi a configuração que necessitou de resistência de cargas mais elevadas de forma a garantir menores interrupções na tensão de saída.

Na 2ª configuração, sendo a que obteve melhor desempenho em todas as medições realizadas e dados registados, pode afirmar-se que:

- As amplitudes de oscilação variaram entre os 40 e os 80 mm, aproximadamente;

- Das três configurações é a que apresenta sempre maiores amplitudes de oscilação;
- É sempre verificada tensão na saída, embora houvesse interrupções com intervalos de tempo não muito significativos;
- Foi a configuração que necessitou de resistência de cargas mais baixas de forma a garantir menores quebras e manter a tensão de saída estável no seu funcionamento limite, ou seja em 3,3 V, de maneira a produzir continuamente potência.

Finalmente, na 3ª configuração, foi a que demonstrou menor desempenho e por isso:

- As amplitudes de oscilação variaram entre os 0 e os 20 mm, aproximadamente;
- Das três configurações é a que apresenta sempre menores amplitudes de oscilação;
- Só a partir dos 8,9 m/s é que se verifica tensão na saída, embora houvesse interrupções com intervalos de tempo pouco aceitáveis;

No geral, verificou-se que quanto maior for a velocidade do vento maior serão as amplitudes de oscilação e as frequências de ressonância. Apesar das frequências de ressonância serem maiores o factor principal e determinante para uma maior potência produzida são as amplitudes de oscilação e não as frequências. Quanto maiores forem as resistências de carga aplicada para que se conseguisse manter a tensão de saída estável nos 3,3 V (valor previsto pelo conversor) menores são as potências. Nem sempre era possível manter esta estabilidade devido ao circuito interno do próprio conversor, pois o mesmo também precisa de ser alimentado.

De uma forma comparativa, as frequências de ressonância, normalmente, eram mais rápidas, para qualquer velocidade de vento, na 2ª e 3ª configuração do que na 1ª, ficando a 2ª configuração com um melhor desempenho na produção de potência devido às suas elevadas amplitudes de oscilação provocadas por uma melhor excitação do conjunto viga em consola mais corpo oscilatório, graças à menor largura do corpo oscilante. A 1ª configuração foi a que necessitou de resistências de carga mais elevadas em relação à 2ª e 3ª configuração, pois era a que apresentava maiores dificuldades em manter a tensão esperada na saída do conversor no seu funcionamento limite, ou seja, estável e constante, ao contrário da 2ª configuração que foi a que necessitou de resistência de cargas mais baixas. Na figura 6.3 é possível ainda verificar que a 1ª e 3ª configuração conseguem produzir a mesma potência mas, o problema é que, a 1ª configuração para conseguir uma potência, por exemplo de 1 mW, precisa de amplitude na ordem dos 42,5 mm enquanto a 3ª configuração só necessita de amplitudes de oscilação na ordem dos 22,5 mm. A explicação para tal acontecimento é que, como a 3ª configuração tem um comprimento da viga menor que o da 1ª configuração, consegue ser mais facilmente excitada pelo vento e ter frequências de ressonância maiores e mesmo sendo a 1ª configuração a que demonstra amplitudes de oscilação maiores, como é menor ao nível das frequências de ressonância, acabam por produzir a mesma potência na saída. Igualmente entre a 1ª e a 2ª configuração, por exemplo para a produção de 1,8 mW, a 1ª configuração necessita de amplitudes de oscilação na ordem dos 57,5 mm enquanto a 2ª configuração necessita de menos 10 mm, ou seja, 47,5 mm de amplitude para conseguir a mesma potência, mas ao contrário da 3ª configuração, a explicação não se prende pelo comprimento da viga mas sim pela menor largura do corpo oscilante, sendo da mesma maneira, mais facilmente excitada do que a 1ª configuração.

7. Conclusão e Trabalho Futuro

Uma das principais barreiras que dificulta o crescimento da convencional energia eólica é o seu preço. As turbinas eólicas são caras e só podem ser instaladas em locais específicos, em que o vento e o relevo devem ser favoráveis à sua instalação.

De uma maneira semelhante ao que acontece com os painéis solares, o vibro-vento é um pequeno colector que consegue realizar as funções das turbinas de uma forma simples e económica.

Apesar de ser ainda um protótipo, esta tecnologia tem vantagens relativamente às tecnologias da geração de energia eólica tradicional. Para além do seu baixo custo, ocupa menos espaço, podendo ser utilizado em grandes centros urbanos e aplicado facilmente nas fachadas e telhados de edifícios e oferece menos riscos para animais voadores.

Em suma, a geração de energia por parte de transdutores piezoeléctricos tem um elevado potencial, sendo que num sistema de viga com extremidade livre mais corpo oscilante, a amplitude é directamente proporcional à velocidade do vento.

Os resultados obtidos mostram que o MFC pode gerar potências na ordem do mW e as principais conclusões desta dissertação são:

1. Quanto mais próximo do encastramento da viga estiver o MFC, maior será a produção de energia, pois é onde as deformações da viga têm uma maior amplitude;
2. Esta tecnologia depende da massa, das propriedades mecânicas e principalmente da geometria do corpo oscilante;
3. Para configurações do corpo oscilatório com larguras mais estreitas, maior será a amplitude de vibração e conseqüentemente maior a potência produzida;
4. A tensão de saída é proporcional à amplitude de oscilação quando esta é uniforme e quando a frequência de oscilação se mantém;
5. Em geral, há uma maior potência produzida quanto maior for a velocidade do vento;
6. Quando a frequência de ressonância é menor pode ser obtida igual potência para amplitudes mais elevadas (figura 6.3);
7. Geralmente, a potência produzida aumenta linearmente em função as amplitudes de vibração;

Através destes factos, os trabalhos que poderão ser desenvolvidos futuramente, no que respeita a esta matéria são, a melhoria contínua da optimização das dimensões do corpo oscilante da 2ª configuração, visto ser a configuração com a obtenção de melhores resultados e com mais perspectiva para ser utilizada, determinando com uma maior precisão as dimensões ideais e posteriormente desenvolver um protótipo em painel, composto por uma matriz com vários conjuntos de viga de extremo livre mais corpo oscilante, dimensionado para as quantidades de energia pretendida. Para além disso, seria também interessante estudar quais as melhores geometrias e dimensões a aplicar na modelação dos painéis variando conforme o local de instalação, as necessidades de energia e o tipo de material para o fabrico das matrizes.

Enquanto não passar de um protótipo a potência produzida já é suficiente para alimentar um microcontrolador (dispositivo de baixa potência que é programado para controlar as funções ou

acções de um determinado produto, como por exemplo a televisão). Sendo que este microcontrolador não necessita de um fornecimento de energia elevado, isto quer dizer, que o protótipo é interessante e importante para baixos consumos de energia dentro da electrónica, e no futuro poderá ter impacto na redução dos custos finais de certos produtos.

8. Referências Bibliográficas

- [1] Santos, F. D. (2007). *Que futuro? Ciência, Tecnologia, Desenvolvimento e Ambiente*. Gradiva. Lisboa.
- [2] Marques, S. (2007). *Energias Fósseis versus Energias Renováveis: proposta de intervenção de Educação Ambiental no 1º Ciclo do Ensino Básico*. Mestrado em Estudos da Criança Promoção da Saúde e do Meio Ambiente. Instituto de Estudos da Criança da Universidade do Minho. Portugal.
- [3] Lavado, A. L. C. (2009). *Os actuais desafios da energia. Implementação e Utilização das Energias Renováveis*. Mestrado em Ciências e Tecnologias do Ambiente. Departamento de Biologia Animal da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Portugal.
- [4] – Costa, R. T. P. N. (2008). *As Energias Renováveis Aliadas à Construção Sustentável*. Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro. Portugal.
- [5] PER (2002-2009). *Eólica*. Acedido a 20 de Agosto de 2013, em: <http://www.energiasrenovaveis.com>
- [6] Viridian. *Energia Eólica*. Acedido a 20 de Agosto de 2013, em: <http://www.viridian.com.br>
- [7] Associação de Engenheiros Brasil-Alemanha - VDI (2013). *Pipas geram energia*. Acedido a 4 de Setembro de 2013, em: <http://www.vdibrasil.com.br>
- [8] Inovação Tecnológica (1999-2013). *Energia cinética*. Acedido a 4 de Setembro de 2013, em: <http://www.inovacaotecnologica.com.br>
- [9] Gizmag (2013). *Power Flowers to domesticate wind turbines*. Acedido a 4 de Setembro de 2013, em: <http://www.gizmag.com>
- [10] ADNA (2010). *Windstalk*. Acedido a 4 de Setembro de 2013, em: <http://atelierdna.com>
- [11] Paulo, J. e Gaspar, P.D. (2010). *Review and Future Trend of Energy Harvesting Methods for Portable Medical Devices*. Proceedings of the World Congress on Engineering. Vol II. London. U.K.
- [12] Lopes, R.P.G. (2010). *Captação energética com recurso a piezoeléctricos*. Mestrado Integrado de Engenharia Física. Departamento de Física da Universidade de Aveiro. Portugal.
- [13] Cornell Chronicle (2013). *Students harness vibrations from wind for electricity*. Acedido a 16 de Fevereiro de 2013, em: <http://www.news.cornell.edu>
- [14] WindTech International. *Vibro-Wind Energy Technology for Architectural Applications*. Acedido a 16 de Fevereiro de 2013, em: <http://windtech-international.com>
- [15] Kluger, J.M., Moon, F.C. e Rand, R.H. (2013). *Shape optimization of blunt body Vibro-wind galloping oscillator*. Journal of Fluids and Structures. **40**: 185-200.
- [16] Jalili, N. (2010). *Piezoelectric-Based Vibration Control – From Macro to Micro/Nano Scale Systems*. Departmente of Mechanical and Industrial Engineering. USA.
- [17] Castro, H.F. (2006). *Sensores e actuadores baseados em polímeros piezoeléctricos*. Mestrado em Electrónica Industrial. Escola de Engenharia. Universidade do Minho. Portugal
- [18] *PZT Application Manual*. Acedido a 29 de Março de 2013, em: www.aurelienr.com/electronique/piezo/piezo.pdf
- [19] Ikeda, T. (1990). *Fundamentals of Piezoelectricity*. Oxford University Press. Oxford Science

Publications.

[20] Gonçalves, T.R.S. (2011). *Colheita Piezoelétrica de Energia*. Mestrado em Energias Renováveis – Conversão Elétrica e Utilização Sustentáveis. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Portugal

[21] Casimiro, F., Gaspar, P. D. e Gonçalves, L. C. (2009). *Aplicação do princípio piezoelétrico no desenvolvimento de pavimentos para aproveitamento energético*. Universidade da Beira Interior, Portugal.

[22] Acedido a 22 de Novembro de 2013, em:
http://www.eng.nus.edu.sg/EResnews/0306/rd/rd_11.html

[23] Inman, D. J. e Priya, S. (2009). *Energy Harvesting Technologies*. Virginia Tech Center for Intelligent Material Systems and Structures, USA.

[24] Smart Material, Corp. *Macro Fiber Composite – MFC*. Acedido a 9 de Setembro de 2013, em <http://www.smart-material.com>

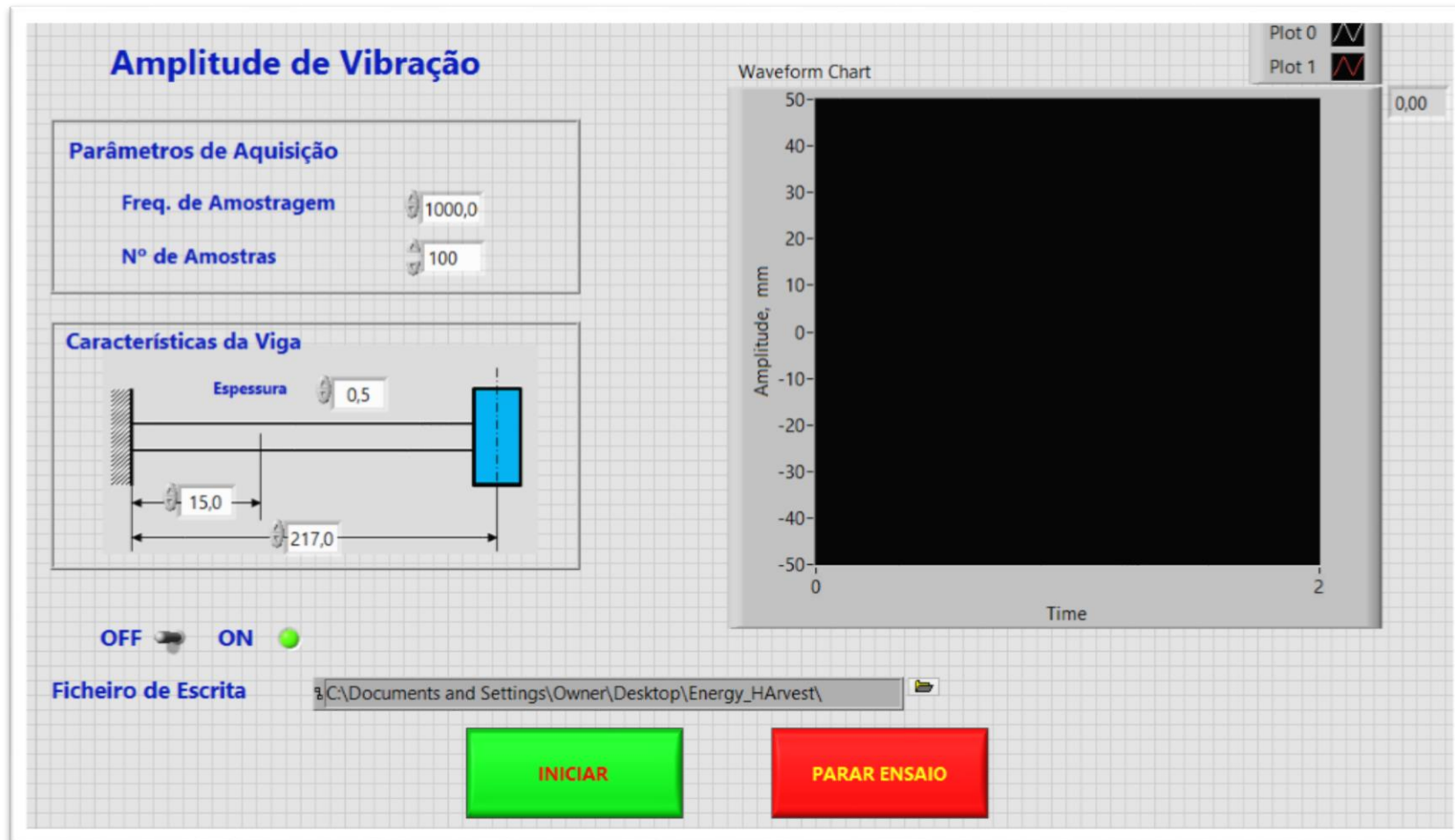
[25] Seto, W. W. (1964). *Theory and Problems of Mechanical Vibrations*. Schaum Publishing CO. New York

[26] Paulo. (2011). *Instrumentação*. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Brasil

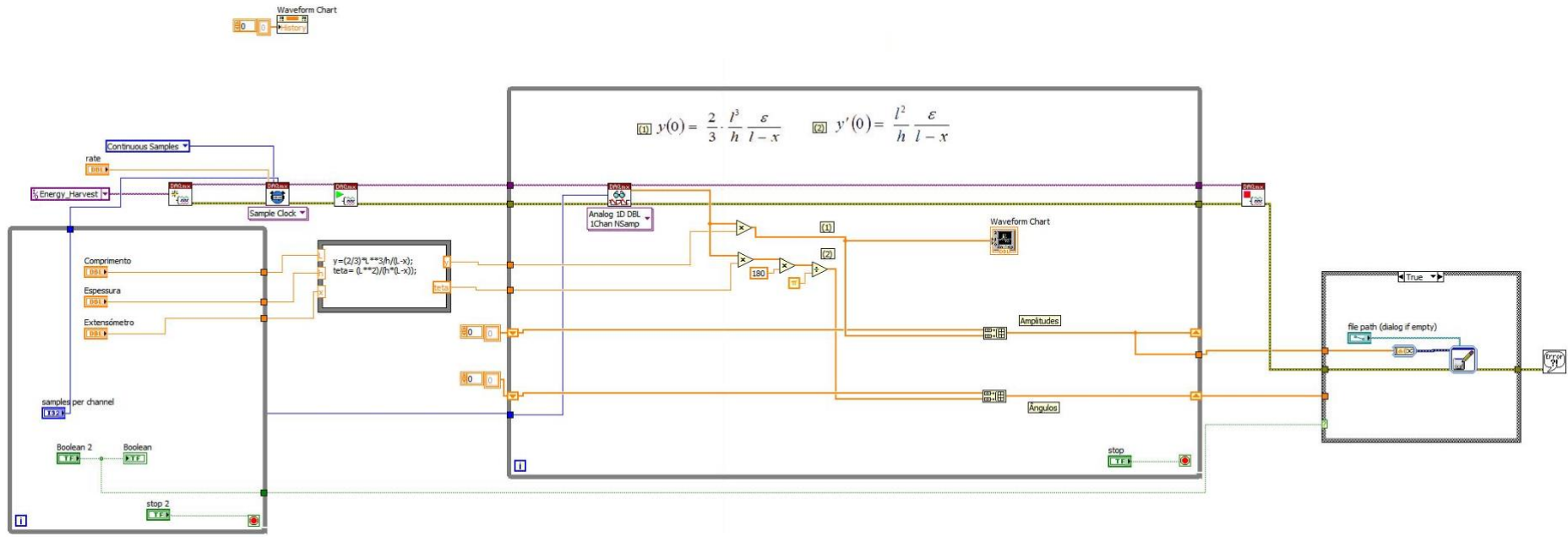
[27] National Instruments. *Medindo distensão com Strain Gages*. Acedido a 16 de Setembro de 2013, em <http://www.ni.com>

[28] Sakshat Virtual Labs. *Free Vibration of Cantilever Beam (Continuous System)*. Acedido a 16 de Setembro de 2013, em <http://www.iitg.vlab.co.in>

Anexos



Software desenvolvido, Front Panel



Software desenvolvido – Block diagram

Ensaio	ton [s]	toff [s]	R [kΩ]	R [Ω]	Total segundos [s]	Tensão [V]	P [μW]	P [mW]	Frequência [Hz]	Velocidade do Vento [km/h]	Velocidade do Vento [m/s]
E_217_75_25	Osciloscópio não capta tensão (apenas amplitudes)										
E_217_75_28	5	45	38,5	38500	50	3,3	0,00003	0,028	28	27,008	7,502
E_217_75_30	42,5	7,5	38,1	38100	50	3,3	0,00024	0,243	30	28,976	8,049
E_217_75_32	42	8	21,7	21700	50	3,3	0,00042	0,422	32	30,944	8,596
E_217_75_35	45,4	4,6	11,1	11100	50	3,3	0,00089	0,891	35	33,896	9,416
E_217_75_40	48,5	1,5	5,5	5500	50	3,3	0,00192	1,921	40	38,816	10,782
E_217_37,5_25	47	3	7,3	7300	50	3,3	0,00140	1,402	25	24,056	6,682
E_217_37,5_30	49	1	4,3	4300	50	3,3	0,00248	2,482	30	28,976	8,049
E_217_37,5_32	49,3	0,7	3,8	3800	50	3,3	0,00283	2,826	32	30,944	8,596
E_217_37,5_35	49,3	0,7	2,8	2800	50	3,3	0,00383	3,835	35	33,896	9,416
E_217_37,5_40	49,7	0,3	2,1	2100	50	3,3	0,00515	5,155	40	38,816	10,782
E_160_75_25	Osciloscópio não capta tensão (apenas amplitudes)										
E_160_75_30	Osciloscópio não capta tensão (apenas amplitudes)										
E_160_75_33	39,2	10,8	58,1	58100	50	3,3	0,00015	0,147	33	31,928	8,869
E_160_75_35	43,9	6,1	27,1	27100	50	3,3	0,00035	0,353	35	33,896	9,416
E_160_75_40	48	2	9,9	9900	50	3,3	0,00106	1,056	40	38,816	10,782

Tabela completa da recolha de dados em laboratório

Os ensaios são descritos nesta tabela com, por exemplo, E_217_75_25, em que:

E – significa ensaio;

217 – é o comprimento da viga;

75 – é a largura do XPS;

25 – é a frequência imposta no túnel de vento.